Machine Translated by Google

Enciclopedia

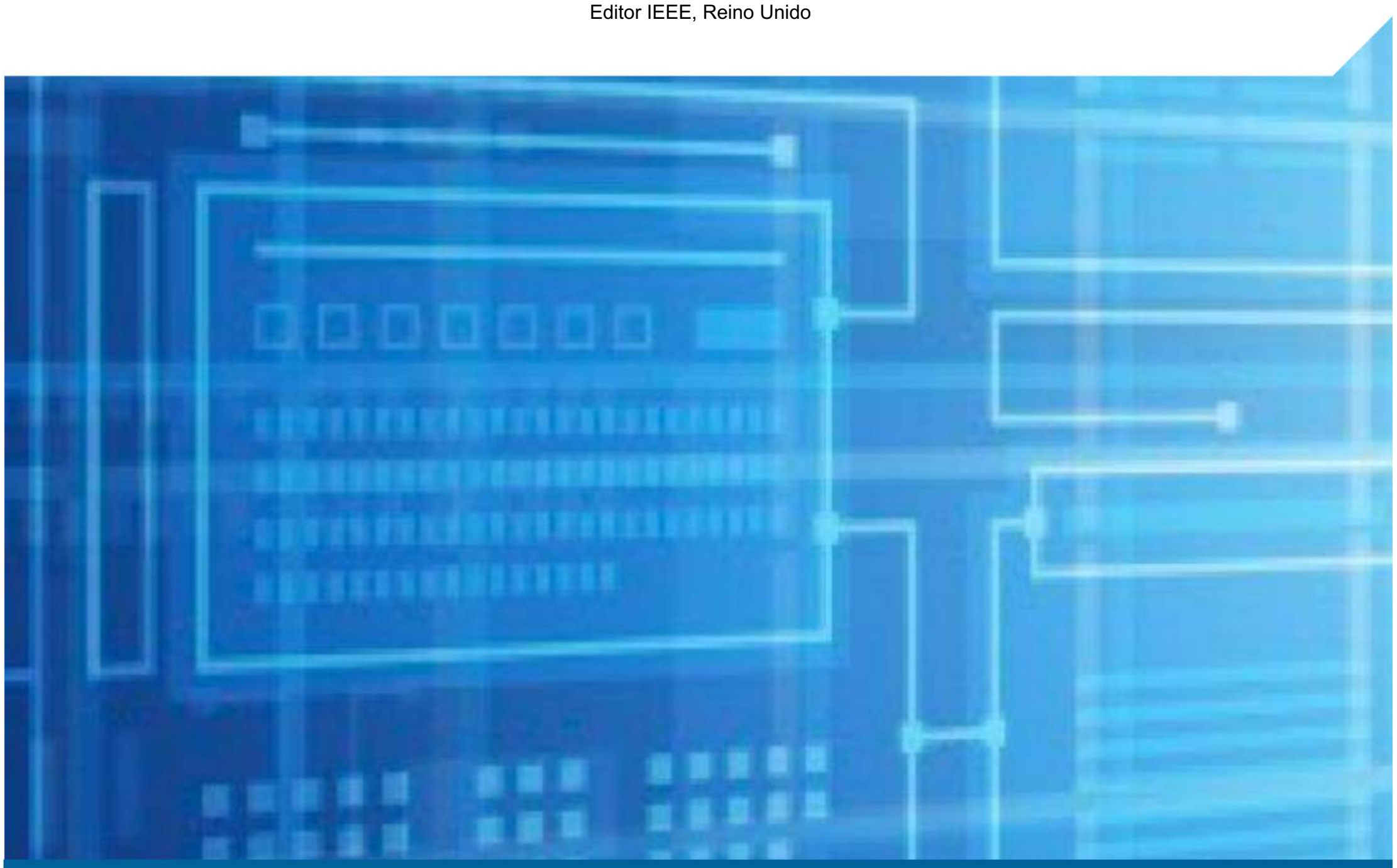
Autor y editor

Elzein Salah Elzein

Miembro del IEEE

- Artículos en Electrónica

Editor IEEE, Reino Unido



Este contenido es confidencial

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Agarre selectivo de piezas de formas complejas mediante topología Extracción de esqueleto

Andrea Pennisi [1], Mónica Sileo [2], Domenico Daniele Bloisi [1] y Francesco Pierri 2,*

[1] Departamento de Humanidades Internacionales y Ciencias Sociales, UNINT Universidad Internacional de Roma, 00147 Roma, Italia; andrea.pennisi@gmail.com (AP); domenico.bloisi@unint.eu (DDB)
[2] Escuela de Ingeniería, Universidad de Basílicata, 85100 Potenza, Italia; monica.sileo@unibas.it
* Correspondencia: francesco.pierri@unibas.it; Tel.: +39-0971-205020

Resumen: Para mejorar la autonomía y flexibilidad de los sistemas robóticos, la capacidad de percibir y captar objetos desempeña un papel crucial . Más detalladamente, los manipuladores de robots deben detectar la presencia de objetos dentro de su espacio de trabajo, identificar el punto de agarre y calcular una trayectoria para acercarse a los objetos con una postura del efector final adecuada para realizar la tarea. Estas pueden ser tareas desafiantes en presencia de geometrías complejas, donde se pueden detectar múltiples candidatos a puntos de captación. En este artículo, presentamos un enfoque novedoso para tratar piezas automotrices de formas complejas que consiste en un método basado en aprendizaje profundo para la extracción de esqueleto topológico y un mecanismo de selección de postura de agarre activo. En particular, utilizamos una versión modificada del conocido algoritmo Lightweight OpenPose para estimar el esqueleto topológico de piezas de automóviles del mundo real. El esqueleto estimado se utiliza para seleccionar la mejor postura para agarrar el objeto en cuestión. Nuestro enfoque está diseñado para ser más eficiente computacionalmente con respecto a otros métodos de detección de postura de agarre existentes. Los experimentos cuantitativos realizados con un manipulador de 7 DoF en diferentes componentes automotrices del mundo real demuestran la efectividad del enfoque propuesto con una tasa de éxito del 87,04%.

Palabras clave: visión por computadora para manufactura; aprendizaje profundo en captación y manipulación; aprendizaje visual

check for updates

Cita: Pennisi, A.; Sileo, M.; Bloisi, DD; Pierri, F. Agarre selectivo de piezas de formas complejas mediante extracción de esqueleto topológico. Electrónica 2024, 13 , 3021. https://doi.org/10.3390/electronics13153021

Editores académicos: Krzysztof Okarma y Piotr Lech

Recibido: 4 de junio de 2024
Revisado: 23 de julio de 2024
Aceptado: 29 de julio de 2024
Publicado: 31 de julio de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Los componentes con formas geométricas complejas se utilizan ampliamente en la industria manufacturera, por ejemplo en el sector del automóvil. El uso de robots para manipular piezas de formas complejas sigue siendo una tarea desafiante debido a problemas de percepción, planificación y razonamiento. En particular, las incertidumbres en la posición del objeto a agarrar y la percepción del ruido debido a los materiales reflectantes son desafíos comunes en los escenarios industriales.

Agarrar objetos con geometrías complejas se puede clasificar a grandes rasgos en métodos basados en modelos que se basan en modelos 3D preexistentes y técnicas basadas en aprendizaje que emplean aprendizaje automático para predecir puntos de agarre. Ambos enfoques necesitan percibir el entorno externo utilizando algoritmos basados en la visión, basados en cámaras y nubes de puntos para la detección, segmentación y estimación de pose de objetos, como en [1,2], o estrategias táctiles, como en [3]. , que requieren sensores para medir la fuerza, retroalimentación háptica y detección de deslizamiento. Los enfoques híbridos combinan múltiples métodos para lograr solidez, incluida la fusión de múltiples sensores y la percepción activa.

En este artículo, presentamos un proceso completo para el manejo de piezas de automóviles de formas complejas utilizando un robot manipulador de 7 grados de libertad. En particular, adoptamos un enfoque basado en el aprendizaje profundo para diseñar un detector de objetos múltiples destinado a extraer el esqueleto topológico perteneciente a la parte a agarrar para estimar con precisión su pose. Después de estimar la postura, se lleva a cabo una selección de la mejor postura de agarre para aumentar las posibilidades de agarrar el objeto con éxito.

La contribución de este trabajo es triple.

Machine Translated by Google

1. El proceso de extracción del esqueleto proporciona una representación de la pose del objeto en el espacio 3D. Por tanto, también permite una estimación precisa de la orientación del objeto.
2. Usamos MobileNetV3 para reemplazar la red troncal MobileNetV1 original en la red de extracción de esqueletos y la personalizamos para detectar el esqueleto de objetos industriales con geometría compleja desde la vista frontal y posterior, incluso si los objetos tienen diferentes formas en cada lado.
3. La selección de la postura de agarre se realiza mediante un enfoque dinámico. Esto significa que un error en la extracción del esqueleto se detecta de forma autónoma y el robot modifica activamente su posición para realizar mejor el agarre.

Hemos realizado varios experimentos con piezas de automóviles del mundo real para validar nuestro enfoque, que puede detectar los puntos clave del objeto desde vistas invertidas, sin ninguna restricción.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. La Sección 2 contiene una breve descripción del trabajo relacionado existente. Nuestro método se presenta en la Sección 3. Los experimentos que demuestran la efectividad del enfoque propuesto se muestran en la Sección 4. Finalmente, en la Sección 5 se extraen conclusiones y direcciones futuras .

2. Trabajo relacionado

En los últimos años, gracias a la disponibilidad de potentes GPU, los métodos de aprendizaje profundo se han vuelto adecuados para abordar la detección de puntos de comprensión. Han demostrado ser capaces de reemplazar los enfoques analíticos tradicionales basados en propiedades geométricas, modelos físicos y análisis de fuerzas. En [4] se presenta una arquitectura de red neuronal convolucional (CNN) llamada GraspNet, capaz de segmentar regiones captables en las superficies de los objetos . En [5], se ha utilizado una CNN, en combinación con la información proporcionada por una cámara de profundidad, para detectar la presencia del objeto y la mejor postura de agarre.
Se propusieron varios enfoques para mejorar la precisión de la CNN profunda, véase, por ejemplo, [6,7], pero normalmente requieren un tiempo de cálculo prolongado (es decir, del orden de segundos).

En [8,9] se han propuesto enfoques más eficientes, que requieren sólo imágenes de profundidad .
Más detalladamente, en [8], se entrenó una red neuronal convolucional profunda en un entorno simulado para aprender características relevantes para el agarre y devolver una solución de agarre único para cada objeto. En [9], se propuso la llamada red neuronal convolucional de captación generativa (GG-CNN) . Permite la evaluación directa de la calidad de la captura y la postura de la captura para cada píxel en una imagen de profundidad de entrada, y es lo suficientemente rápido para realizar la captura en entornos dinámicos. El rendimiento de GG-CNN se ha mejorado mediante la introducción de GG-CNN2 [10], que es una CNN basada en la arquitectura de segmentación semántica de [11].
Una característica común de los métodos basados en aprendizaje profundo para la detección de puntos de captación es la necesidad de calcular el valor de la calidad de captación para cada píxel de la imagen en cuestión, lo que requiere mucho tiempo.

Cuando el conocimiento del objeto y las posturas candidatas de agarre no están disponibles, es posible aproximar el objeto usando primitivas de forma, por ejemplo, usando mediciones multivista [12] o identificando características en datos sensoriales [13]. El método propuesto en [14] consiste en seleccionar candidatos a posturas de agarre después de localizar áreas donde ya se ha experimentado un agarre exitoso. En [1], se propone capturar objetos parcialmente conocidos en entornos no estructurados basándose en una extensión al contexto industrial de la conocida técnica de Sustracción de Fondo [15]. Gracias a la difusión de sensores de profundidad de bajo coste, se han aprovechado muchos algoritmos de registro 3D para solucionar el problema de agarre de objetos. Por ejemplo, en [2], se genera un modelo del objeto a agarrar utilizando un conjunto de nubes de puntos adquiridas desde diferentes posiciones, y se fija la postura nominal de agarre. Posteriormente, este modelo se compara con la vista del objeto en tiempo de ejecución para calcular la postu

En este trabajo, proponemos un enfoque basado en esqueletos para detectar las posturas de agarre, que es inherentemente menos exigente desde el punto de vista computacional debido a la representación compacta del objeto a través del esqueleto.

Machine Translated by Google

En la Tabla 1 se muestra una comparación cualitativa y cuantitativa entre nuestro enfoque y los artículos más relevantes descritos en esta sección. Esta comparación tiene en cuenta tener en cuenta no sólo los resultados sino también las limitaciones de cada trabajo.

Tabla 1. Tabla comparativa entre diferentes enfoques de agarre de objetos.

Métodos	Aplicaciones	Resultados cuantitativos	Limitaciones
Arquitectura CNN con DDF módulo [4]	Agarre robótico en tiempo real	90% de precisión en Cornell captar el conjunto de datos	Error al predecir la orientación para algunos objetos
Estructura basada en más rápido. R-CNN y DACAB [5]	Agarrar objetos con el móvil manipulador	86,3% de tasa de éxito	Método de búsqueda ineficiente
GQ_CNN para clasificar robusto agarrando [6]	Agarrar objetos del hogar	99% de precisión	Largo tiempo de cálculo
DCNN basado en imágenes de profundidad predecir la postura de agarre [8]	Agarrar objetos desconocidos	92% (70%) de precisión con de forma cilíndrica objetos (en forma de caja)	Generación de un solo agarre solución para un solo objeto
NN para aprender prototípicos partes [14]	Agarrar objetos similares	N / A	Agarrando formas complejas. objetos con objetos nunca antes vistos características.
esqueleto topológico extracción (este trabajo)	Agarrando formas complejas. piezas de automóviles	87,04% de tasa de éxito	Necesita una buena cámara calibración

3. Método propuesto

La Figura 1 muestra la arquitectura funcional general de nuestro enfoque. Esta hecho de cuatro módulos principales, a saber, adquisición de datos visuales, extracción de esqueleto topológico, agarre Selección de pose y agarre del robot. Cada módulo se detalla a continuación.

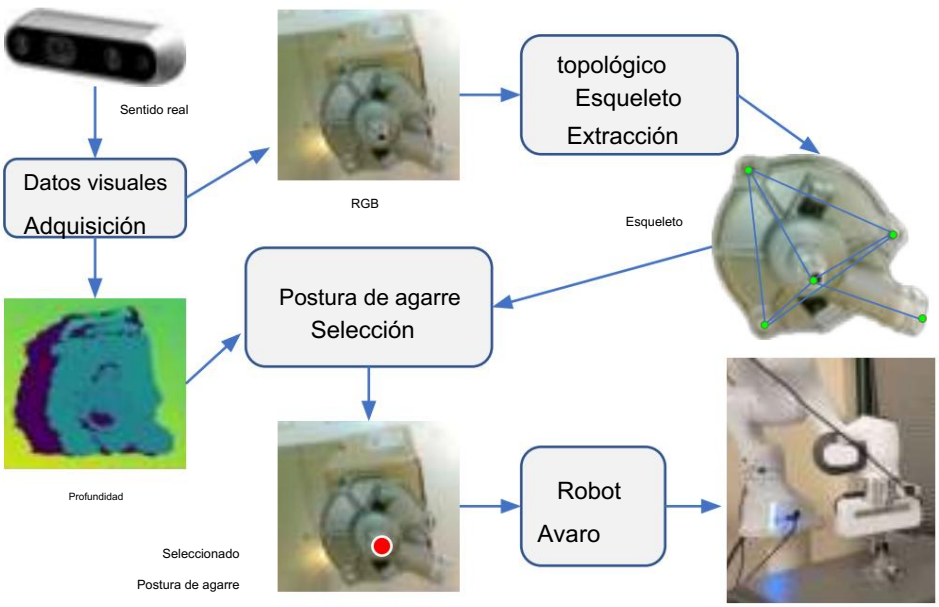


Figura 1. Arquitectura funcional del enfoque propuesto.

Machine Translated by Google

3.1. Adquisición de datos

visuales Los datos visuales (tanto RGB como de profundidad) se adquieren utilizando una cámara Intel Realsense D435 RGBD, montada en el efector final a través de un soporte impreso en 3D en la llamada configuración ojo en mano . La Figura 2 muestra los marcos de referencia adjuntos al efector final del robot, Fe , y a la cámara, Fc.

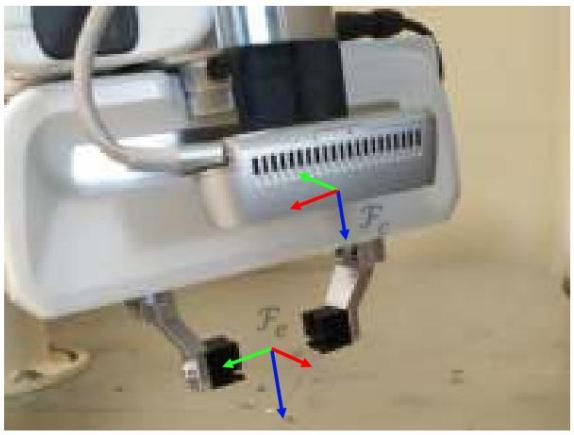


Figura 2. Marcos de referencia de cámara y efector final.

La cámara Intel Realsense D435 tiene una distancia de profundidad mínima más allá de la cual no es capaz de proporcionar una medida de profundidad aproximadamente igual a 28 cm y la adquisición de datos de la cámara requiere la biblioteca realsense-ros ya que la comunicación entre los módulos se realiza a través del Sistema Operativo del Robot (ROS). La cámara ha sido calibrada previamente utilizando 30 imágenes de un patrón plano de tablero de ajedrez 2D. El proceso de calibración incluye calibraciones tanto intrínsecas como extrínsecas. El primero tiene como objetivo determinar los parámetros de la cámara que describen cómo la cámara transforma las coordenadas 3D de la escena en coordenadas 2D de la imagen, como la distancia focal, el punto principal y las distorsiones ópticas, mientras que el segundo proporciona los parámetros. que describen la transformación rígida que asigna las coordenadas 3D del mundo real a las coordenadas 3D del sistema de referencia de la cámara. La implementación del procedimiento de calibración propuesta por la biblioteca VISP [16], basada en [17,18], se ha adoptado utilizando un tablero de ajedrez compuesto por 9 × 6 cuadrados con dimensiones de 0,02645 m.

Vale la pena recordar que un buen procedimiento de calibración es crucial para el éxito del procedimiento de agarre, ya que garantiza una percepción precisa del entorno, lo que permite una identificación y posicionamiento precisos de los puntos en el espacio tridimensional para una manipulación exitosa.

3.2. Extracción de esqueleto

topológico El método propuesto ha sido desarrollado para objetos que:

- son rígidos, ya que no son aplicables a objetos deformables;
- no son perfectamente simétricos ya que aunque es posible definir un esqueleto topológico no simétrico, el detector puede confundirse durante el proceso de extracción debido a características simétricas.

En este trabajo, nos centramos en piezas reales de automóviles, incluidas dos tapas separadoras de aceite del cárter hechas de hierro fundido y plástico y un tubo de aire. Los objetos seleccionados tienen un nivel de dificultad creciente. El primer objeto, la cubierta del separador de aceite del cárter de hierro fundido, exhibe un alto grado de simetría con múltiples puntos de agarre y puede ser agarrado por una parte cilíndrica, reduciendo así el impacto de los errores de orientación del robot alrededor del eje del pasador. El segundo objeto, la cubierta plástica del separador de aceite del cárter, también muestra un alto grado de simetría con varios puntos de agarre, pero debe agarrarse con una orientación específic Finalmente, el tubo de aire tiene una forma compleja, carece de simetría y sólo tiene dos puntos de agarre disponibles, lo que representa la tarea más desafiante para el robot.

Machine Translated by Google

Decidimos modelar sus esqueletos considerando algunos puntos clave, algunos de los cuales corresponden a los posibles puntos de agarre para levantar ese objeto con el robot manipulador (ver la parte superior derecha de la Figura 1). Para detectar el esqueleto topológico (TS) de los objetos a capturar, consideramos Lightweight OpenPose [19], cuya arquitectura consta de tres componentes principales: un extractor de características, un estimador de TS y una red Part Affinity Fields (PAF).

En comparación con el OpenPose original [20], elegimos el OpenPose ligero porque la alta demanda computacional del método anterior lo hace menos aplicable en aplicaciones en tiempo real en dispositivos con poca potencia de procesamiento. OpenPose emplea una arquitectura CNN de dos ramas y múltiples etapas. La primera rama predice mapas de confianza de partes (PCM) para partes del cuerpo, y la segunda rama predice campos de afinidad de partes (PAF) para modelar las conexiones entre partes del cuerpo. La arquitectura implica varias etapas de convolución para refinar estas predicciones de forma iterativa, lo que da como resultado una alta precisión a costa de una mayor carga computacional. Light OpenPose, por otro lado, modifica la arquitectura original para reducir la complejidad y mejorar la eficiencia. El enfoque reduce el número de capas y etapas convolucionales y utiliza convoluciones separables en profundidad en lugar de convoluciones estándar para reducir el número de parámetros y operaciones. Además, la red troncal utiliza MobileNet o ShuffleNet en lugar del VGG19 o ResNet más pesado utilizado en el OpenPose original y optimiza el cálculo de los campos de afinidad parcial para lograr un equilibrio entre precisión y eficiencia.

Extracción de características. El OpenPose ligero original utiliza una red MobileNetV1 que está optimizada para alcanzar la extracción de funciones en tiempo real. MobileNet es una familia de arquitecturas de redes neuronales diseñadas para una implementación eficiente en dispositivos móviles e integrados con recursos computacionales limitados. La característica clave de MobileNet es el uso de convoluciones separables en profundidad, que pueden reducir significativamente la cantidad de parámetros y cálculos necesarios manteniendo una alta precisión.

Si bien MobileNetV1 es una red neuronal muy eficaz, tiene algunas limitaciones e inconvenientes que deben tenerse en cuenta. Por ejemplo, tiene una precisión limitada porque está diseñado para equilibrar el tamaño y la precisión del modelo. Es posible que no alcance el mismo nivel de precisión que las redes neuronales más grandes y complejas, especialmente en objetos desafiantes donde los puntos clave (uniones) no son evidentes. La operación de convolución separable en profundidad utilizada en MobileNetV1 puede ser menos expresiva que las operaciones convolucionales tradicionales y es posible que no pueda capturar todas las características importantes de una imagen.

Por las razones anteriores, en este trabajo, proponemos reemplazar MobileNetV1 con MobileNetV3 [21] para el paso de extracción de características. MobileNetV3 ha sido diseñado para abordar las limitaciones de MobileNetV1 manteniendo la eficiencia. La arquitectura de la red MobileNetV3 utilizada en este trabajo se muestra en la Figura 3.

MobileNet V3 tiene dos variantes principales: (1) MobileNet V3-Large diseñado para aplicaciones de mayor precisión, con más capas y canales, y (2) MobileNet V3-Small optimizado para entornos con recursos limitados, compensando cierta precisión por una computación reducida. - demanda nacional. Nuestra elección recayó en este último. MobileNet V3 presenta varios componentes nuevos, como bloques residuales invertidos para mantener un alto grado de eficiencia, módulos de compresión y excitación (SE) para mejorar el poder de representación del modelo mediante la recalibración de las respuestas de funciones por canal y la activación H-Swish. Función.

La función Hard-Swish es una función de activación no lineal que está diseñada para ser más eficiente que las funciones de activación tradicionales como ReLU. La función de silbido fuerte se define como

$$\text{swish}(x) = x\,6 \qquad \frac{\text{ReLU6}(x+3)\ \text{h-}}{\qquad}\ , \tag{1}$$

donde ReLU6(x) = min(max(x, 0), 6) es una función ReLU recortada que genera valores entre 0 y 6, aún proporcionando un comportamiento no lineal al tiempo que aumenta la velocidad computacional con respecto a la función ReLU estándar .

Otra característica importante de MobileNetV3 es el uso de un módulo de compresión y excitación (SE) . El módulo SE es una forma sencilla y eficaz de mejorar el poder representacional

Machine Translated by Google

de la red (es decir, la capacidad de aprender y representar patrones y características complejos en la datos de entrada). Funciona aprendiendo factores de escala por canal que se utilizan para seleccionar potenciar los elementos informativos en la red. El módulo SE se agrega a cada cuello de botella.

bloque en la arquitectura MobileNetV3, contribuyendo a aumentar la precisión con respecto a MobileNetV1.

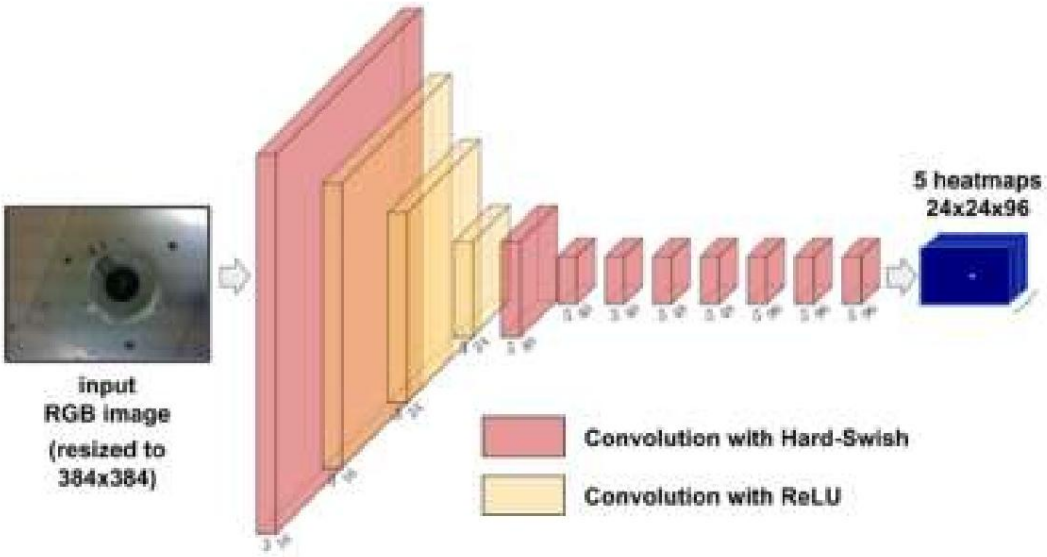


Figura 3. Arquitectura MobileNetV3.

MobileNetV3 también introduce una nueva técnica llamada cuello de botella invertido móvil convolución (MBConv), que es una forma modificada de la convolución separable en profundidad utilizado en MobileNetV1. El bloque MBConv consta de tres tipos de convoluciones: una 1 × 1 convolución para expandir el número de canales, una convolución en profundidad para realizar operaciones espaciales filtrado y una convolución 1 × 1 para reducir el número de canales al tamaño original.

El bloque MBConv también incluye una conexión de acceso directo que permite que fluya el gradiente. directamente desde la entrada a la salida. El bloque MBConv ayuda a aumentar la expresividad. del modelo con respecto a MobileNetV1.

Finalmente, MobileNetV3 incluye un bloque de flujo medio que se utiliza para mantener un alto nivel de precisión y minimizando el número de cálculos necesarios. También utiliza un Operación de convolución dinámica que se adapta a los datos de entrada. Los detalles de los parámetros. utilizados para cada bloque se describen en la Tabla 2. La imagen de entrada cambia de tamaño a 384 × 384, y el resultado es un conjunto de mapas de características de 24 × 24 × 96, uno para cada punto clave y otro para el fondo.

Tabla 2. La arquitectura de red MobileNetV3 utilizada en este artículo. HS = silbido fuerte, RE = ReLU, s = zancada.

Entrada	Operador	Tamaño de Exp.	#afuera	SE	Países Bajos	s
3842 × 3	conv2d, 3 × 3	1922 × 16	-	dieciséis	-	SA	2
bneck, 3 × 3	962 × 16	bneck, 3 ×	dieciséis	16	X	RE	2
3 482 × 24	bneck, 3 × 3	482 × 24	72	24	-	RE	2
bneck, 5 × 5	242 × 40	bneck, 5 ×	88	24	-	RE	1
5 242 × 40	cuello, 5 × 5	242 × 40	96	40	X	SA	2
cuello, 5 × 5	242 × 48	cuello, 5 ×	240	40	X	SA	1
5 242 × 48	cuello, 5 × 5	242 × 96	240	40	X	SA	1
cuello, 5 × 5	242 × 96	cuello, 5 ×	120	48	X	SA	1
5			144	48	X	SA	1
			288	96	X	SA	1
			576	96	X	SA	1
			576	96	X	SA	1

Machine Translated by Google

Estimación de TS. Los mapas de características de MobileNetV3 son la entrada para generar un conjunto de puntos clave candidatos para cada parte del objeto en la imagen. De hecho, los mapas de características capturan la información espacial en la imagen de entrada y proporcionan una representación rica de la imagen que puede usarse para detectar puntos clave. MobileNetV3 agrega un cabezal personalizado para predecir ubicaciones de puntos clave, que consta de una serie de capas convolucionales que generan mapas de calor, refinando las características extraídas por la red troncal y generando mapas de calor para cada punto clave. La Figura 4 muestra un ejemplo del resultado del estimador TS para la tapa del separador de aceite del cárter de hierro fundido, que consta de cinco mapas de calor, uno para cada punto clave c Cada mapa de calor tiene la misma resolución espacial que los mapas de características y está normalizado para tener valores entre 0 y 1. Cada píxel del mapa de calor indica la probabilidad de que la parte del cuerpo correspondiente esté presente en esa ubicación de la imagen.

Red PAF. Toma los mapas de características generados por el extractor de características como entrada y genera un conjunto de mapas de características PAF, uno para cada par de puntos clave detectados. Los mapas de características PAF codifican la dirección y la fuerza de las conexiones entre puntos clave utilizando una representación de dos canales, donde cada canal codifica un aspecto diferente de la conexión. Específicamente, un canal codifica el vector unitario que representa la dirección de la conexión, mientras que el otro canal codifica la puntuación de confianza que representa la fuerza de la conexión.

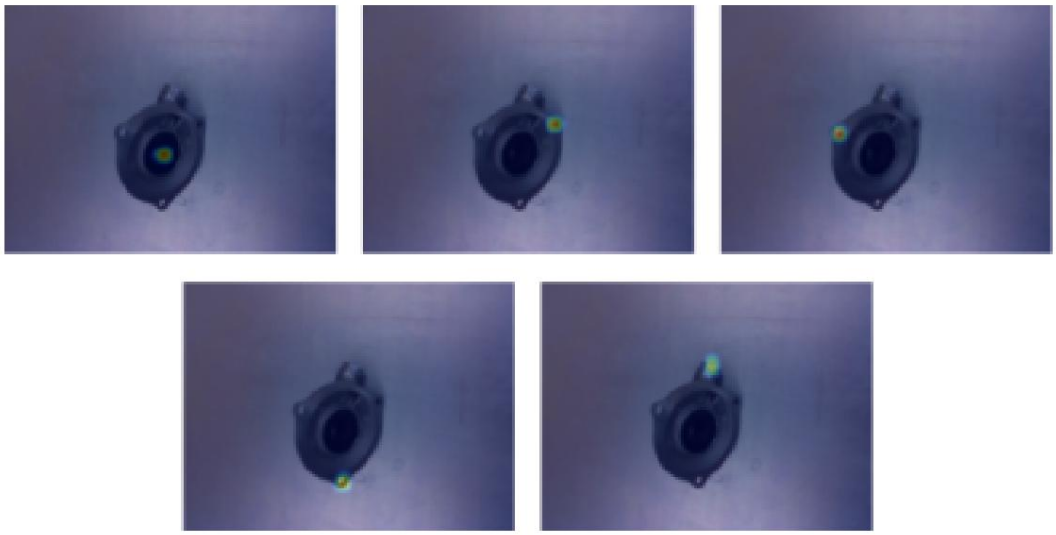


Figura 4. Ejemplos de mapas de calor para la cubierta del separador de aceite del cárter de hierro fundido. Hay cinco mapas de calor correspondientes a los puntos clave considerados.

Cálculo final de TS. Una vez generados el PAF y los mapas de calor, se utilizan juntos para agrupar los puntos clave individuales en el TS final. El TS final se obtiene identificando primero las conexiones candidatas utilizando los PAF y luego puntuando las conexiones en función de la probabilidad de que formen una conexión válida. Luego, las conexiones se utilizan para construir el TS final conectando los puntos clave individuales en un TS de objeto completo.

Una vez calculados los puntos clave, utilizamos la información de profundidad para construir el TS 3D final dado el conjunto de puntos clave de Lightweight OpenPose. La Figura 5 muestra algunos ejemplos de TS finales para los tres objetos considerados, donde es posible notar la solidez del enfoque de extracción de TS propuesto con respecto a diferentes vistas del objeto, a cambios fotocrómicos y oclusiones parciales. El enfoque también funciona con múltiples instancias del objeto.

Machine Translated by Google

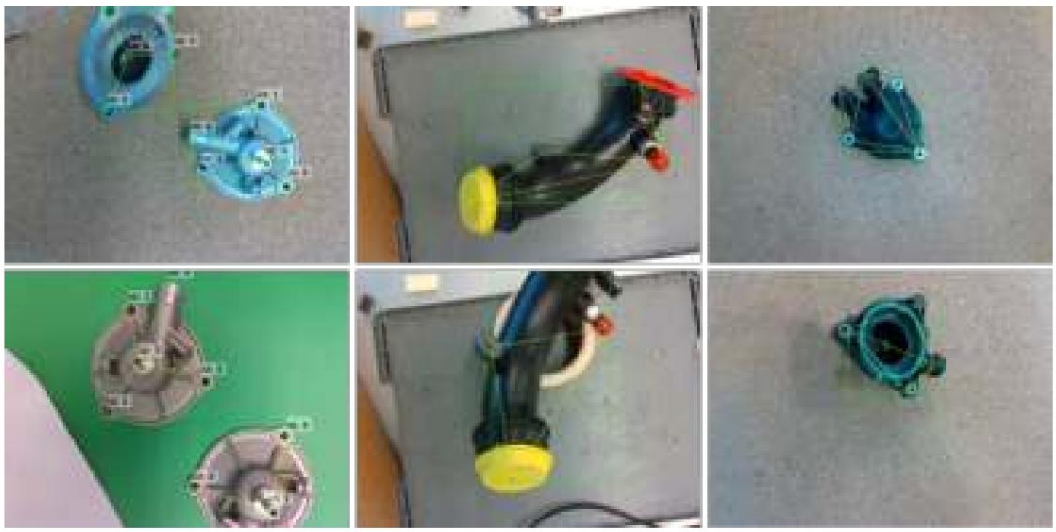


Figura 5. Ejemplos de extracción de TS en diferentes objetos: la tapa del separador de aceite del cárter de hierro fundido a la izquierda, el tubo de aire en el medio y la tapa del separador de aceite del cárter de plástico a la derecha. Nuestro enfoque es sólido ante diferentes vistas del mismo objeto, cambios fotocromáticos y oclusiones parciales.

3.3. Selección de postura de agarre

Después de seleccionar los puntos clave Nk para la extracción TS, estos puntos clave también se identifican dentro del modelo CAD del objeto a través del software de modelado 3D. Esto da como resultado la generación de una representación tridimensional nominal del TS, TSN, en el sistema de coordenadas CAD, Ff . Además, las poses en Ff de todos los posibles marcos de referencia de agarre de Ng (ver Figura 6), expresadas mediante la matriz de transformación homogénea (4 × 4) [22], f T

gj , j = 1, . . . , Ng, se puede localizar en el modelo. En aras de la claridad, supongamos que cada punto de captación coincide con un punto clave.

Figura 6. Los marcos de agarre para los objetos considerados: cubierta del separador de aceite del cárter de hierro fundido (fila superior), cubierta del separador de aceite del cárter de plástico (fila central) y tubo de aire (fila inferior).

Machine Translated by Google

Entonces, dadas todas las combinaciones posibles de tres puntos clave

$$St = ti\ ,\ yo = 1, \ldots, norte = \begin{matrix} Nk \\ 3 \end{matrix} : ti = (Pj\ ,\ Pl\ ,\ Pm),\ j, l, m \quad \{1, \ldots, Nk\},\ j \quad = l \quad = metro \quad ,$$

para cada triple ti , se identifica un plano mediante un sistema de coordenadas adjunto, cuya pose f se denota por la matriz de transformación homogénea T ti . Para cada sistema de referencia de agarre, la postura relativa con respecto al iésimo plano se puede determinar como

$$t \quad = T\ gj\ ti\ ^{f\ ti} \quad ^{-1}\ f\ T_{gj}\ . \tag{2}$$

Por lo tanto, para cada punto de agarre, se puede calcular una lista de matrices de transformación $^{ti}_{Nt}$, T_{gj} , que representan las poses del marco de agarre en el marco plano. Este conjunto de operaciones, resumido en el Algoritmo 1, se realiza una sola vez.

Algoritmo 1: algoritmo de preprocesamiento

Entrada : TSN, Ng, NT , tg^{f} (j = 1, . . . , Ng)

Salida :T^{ti}_{gj} (i = 1, . . . , Nt ; j = 1, . . . , Ng) 1 para cada triple ti de puntos clave en TSN do f 2 Calcule T ti 3 final para 4 para i = 1, . . . , Nt hacer para j = 1, . . . , Ng do

−1 ff ti T = TT gj

ti gj

5

6

7 fin para

8 final para

9 retorno T^{ti}_{gj}

En tiempo de ejecución, se ejecutan los siguientes pasos:

1. Se adopta un detector YOLO [23] para distinguir entre los objetos. Se eligió YOLO porque es más rápido que los sistemas basados en clasificadores pero con una precisión similar y realiza predicciones con una evaluación de red única al considerar la detección de objetos como un problema de regresión única, y esto conduce a un rendimiento de alta precisión. Además, YOLO puede detectar y clasificar múltiples objetos simultáneamente dentro de una imagen.
2. Se extrae el 3D TS actual, TSC .
3. El punto de agarre más cercano a la cámara, p 4a. Si al menos $^{C}_{CC,}$ es seleccionado como el mejor.

3 puntos clave son visibles, un conjunto de tres puntos clave, tk , el plano correspondiente en el Se utiliza para calcular marco de la cámara, T tk matriz de transformación, T, el procedimiento $^{C}_{tk}$, y seleccionar los homogéneos. continúa con el paso 5.4b . Si solo$_{gcc}$, que identifica la postura de agarre en el marco del avión. Entonces, son visibles 2 o menos puntos clave, el robot comienza

a moverse en círculo alrededor del centro del cuadro delimitador del objeto para adquirir una nueva imagen desde un punto de vista diferente. Luego, el procedimiento vuelve al paso 1.

5. La postura de agarre en el marco de la cámara se calcula como

$$^{C}_{tgcc} \quad tk = TT^{C}_{tk}\ _{gcc}\ .$$

Este procedimiento se resume en el Algoritmo 2.

Definamos la matriz de transformación homogénea T^{mi}_{c} , es decir, la matriz homogénea constante que realiza la transformación entre el fotograma de la cámara y el fotograma del efector final , obtenida mediante el método de calibración descrito en la Sección 3.1.

Machine Translated by Google

Algoritmo 2: Algoritmo de tiempo de ejecución

Entrada: para cada objeto gj $^{objT\ ti}_{c}$

Salida :T $_{gcc}$

1 Obtener imagen de la cámara 2

Detectar el objeto actual de la imagen 3 TSC ←

extraer TS ti 4 T = T ←

obtener la lista de transformaciones relativas al gj actual i=1,...,Nt ; j=1,...,Ng objeto ← extraer el punto de agarre más cercano a la cámara

5 p $^{c}_{cc}$

6 si visible_keypoints ≥ 3 entonces tk

7 ← extrae un triple de puntos clave visibles en TSC

8 Calcular T tk a partir ^{c}

9 Extraer T gcc ^{tk} de T

10 más

11 mueven el robot a un punto de vista diferente

12 IR A 1

13 terminar si

14 T $^{c}_{gcc}$ tk ← T $^{T}_{tk\ gcc}$

15 retorno T gcc ^{c}

Para capturar la postura de agarre en el marco inercial, T ^{c} se transforma de la siguiente manera gcc

$$Tgcc = TeT\ ^{mi}_{c}\ ^{c}_{tgcc}\ , \tag{3}$$

donde Te es la matriz homogénea que representa la pose del efector final en el marco inercial.

Observación 1. Vale la pena señalar que si el punto de agarre no coincide con un punto clave, el procedimiento anterior sigue siendo aplicable, pero se debe aplicar una transformación constante adicional para vincular el punto de agarre a uno de los puntos clave que pertenecen al plano.

3.4. Agarre del robot

Para realizar el agarre, se debe ordenar al efector final que alinee su marco de referencia con el marco de referencia de agarre. La trayectoria se planifica asignando una secuencia de tres puntos: el primero es la postura de visión del robot, el intermedio es el punto de aproximación , es decir, un punto situado a lo largo del eje z del marco de referencia de agarre a una distancia de 10 cm hasta el origen, y el último es la posición de agarre estimada, pˆ la posición deseada del efector final, pe,d (t), se define como $_{\leftarrow}$. Más en detalle,

$$pe,d\ (t) = \begin{matrix} (pa - p0)\ \dfrac{s1(t)}{para\ 0 \le t \le ta}\ p0 + \|pa - p0\| \\ + \dfrac{s2(t)}{\|pˆ - pa\|}(pˆ\ pa\ _{\leftarrow} - pa)\ para\ ta < t \le tf \end{matrix}\ . \tag{4}$$

donde p0 es la posición de vista y pa es la posición del punto de aproximación, s1(t) (s2(t)) es la longitud del arco desde p0 hasta pa (desde pa hasta pˆ puntos de trayectoria, tanto para s1(t) como para s2(t), la ley del tiempo puede diseñarse como un polinomio quíntico. $_{\leftarrow}$). Para asegurar aceleraciones y velocidades continuas en el

Respecto a los instantes de tiempo, tf es la duración del movimiento, y ta es el instante de tiempo intermedio en el punto de aproximación que se elige para tener un movimiento rápido hasta el punto de aproximación y un movimiento lento en las proximidades del objeto.

Machine Translated by Google

Con respecto a la orientación del efector final, se planea alcanzar la misma orientación de la postura de agarre estimada, Rg, en el punto de aproximación y mantener dicha orientación constante durante la última parte del camino.

La trayectoria planificada en términos de posición y orientación es la entrada del algoritmo cinemático inverso de bucle cerrado [22] destinado a calcular los valores de referencia de las posiciones y velocidades de las articulaciones. Denotemos con pe (t) y Re(t) la posición y orientación del efector final , respectivamente, y con Re,d (t) la orientación deseada del efector final. Las referencias de velocidad de la articulación del robot , ˙qr (t), se calculan como

$$\dot{q}_r(t) = J^{\dagger}(q(t))(v_{e,d}(t) + Ke(t)), \tag{5}$$

donde $J^{\dagger}(q(t))$ denota la pseudoinversa derecha de la matriz jacobiana del robot, $K \in \mathbb{R}^{6\times 6}$ es una ganancia matricial definida positiva, $v_{e,d} = \begin{bmatrix} \dot{p}_{e,d} & \omega_{e,d} \end{bmatrix}^T$ es el efector final lineal deseado y velocidad angular, y e es el error de seguimiento definido como

$$e = \begin{bmatrix} p_{e,d} - p_e \\ \eta_e e_{,d} - \eta_{e,d} e - S(e_{,d}) e \end{bmatrix}, \tag{6}$$

donde $Q_e = \{\eta_e, \epsilon_e\}$ y $Q_{e,d} = \{\eta_{e,d}, \epsilon_{e,d}\}$ son el cuaternión unitario extraído de Re y Re,d , respectivamente, y S(·) es el operador matricial simétrico sesgado que realiza el producto cruzado [22].

En la Figura 7 se muestra un diagrama de flujo que destaca todo el proceso .

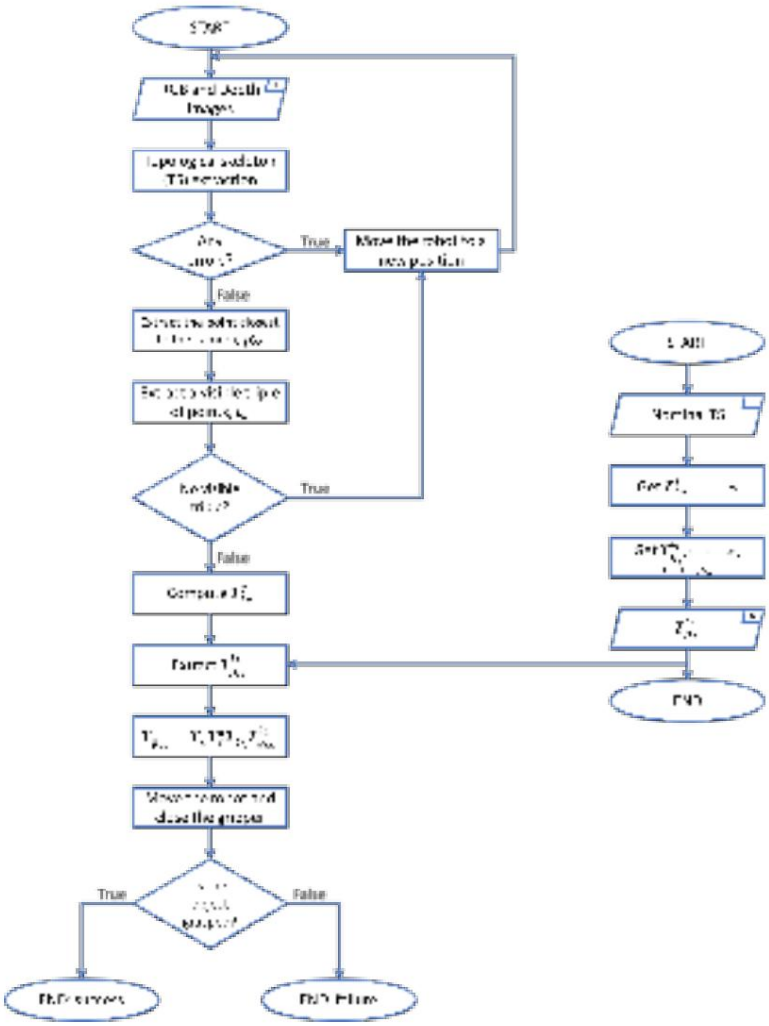


Figura 7. Representación en diagrama de flujo de todo el proceso.

Machine Translated by Google

4. Resultados experimentales

La configuración experimental consta de una cámara Intel RealSense D435 montada en un Robot manipulador Franka Emika Panda, caracterizado por 7 articulaciones giratorias. El robot Se puede controlar mediante Franka Control Interface (FCI) y libfranka C++. Biblioteca de código abierto, que controla directamente el robot con una estación de trabajo externa a través de una conexión ethernet. En este trabajo, el metapaquete franka_ros , que integra libfranka en ROS, se ha utilizado. La estación de trabajo ejecuta Ubuntu 18.04 LTS y en tiempo real kernel en una CPU Intel Xeon de 3,7 GHz con 32 GB de RAM. Hemos realizado experimentos con los tres objetos considerados que se muestran en la Figura 6, y los resultados cuantitativos son reportado a continuación.

4.1. Resultados de la extracción de TS

Utilizando Coco Annotator [24], se han anotado 5992 imágenes. Los datos etiquetados tienen se ha dividido en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba compuestos por 4618, 229 y 1145 imágenes, respectivamente. La Tabla 3 muestra la cantidad de imágenes en los conjuntos de entrenamiento, validación y prueba. para cada objeto considerado.

Tabla 3. Número de imágenes de muestra utilizadas en los conjuntos de entrenamiento, validación y prueba para los objetos considerados.

Objeto	Capacitación	Validación	Prueba
Tapa del separador de aceite del cárter de hierro fundido	1440	60	300
Tubo de aire	1406	46	228
Tapa de plástico del separador de aceite del cárter	1772	123	617

La métrica que utilizamos para evaluar la detección de TS es la similitud de puntos clave de objetos. (OKS) [25], definido como sigue:

$$OK = \frac{\sum_{i\ [0,N-1]} \exp\left(\frac{-d_i^2}{2s^2k_i^2}\right) \delta(v_i > 0)}{\sum_{i\ [0,N-1]} \delta(v_i > 0)} \quad (7)$$

dónde:

- s es la escala del objeto;
- di es la distancia del punto clave i previsto desde la verdad fundamental;
- ki es una constante por punto clave que controla la caída;
- vi es la bandera de visibilidad.

OKS se calcula para cada muestra que representa un objeto. La bandera de visibilidad toma en cuenta si un punto es visible o no: si el punto clave está etiquetado, δ(vi > 0) es 1, en caso contrario es 0 sin considerar puntos clave ocluidos.

En nuestro escenario, utilizamos OKS para calcular el Verdadero Positivo (TP), el Falso Negativo (FN), Detecciones de falsos positivos (FP) y verdaderos negativos (TN). Si una detección tiene OKS > umbral, se considera un TP; en caso contrario, como FP. En particular, consideramos dos umbrales, es decir, 0,5 y 0,75, y calculó las siguientes métricas: precisión, recuperación, puntuación F1, y Precisión Promedio (AP). La Tabla 4 muestra los resultados de nuestro algoritmo para un conjunto de pruebas de 1145 imágenes.

Tabla 4. Resultados del detector TS en diferentes umbrales para un conjunto de prueba de 1145 imágenes.

Límite	Precisión	Recordar	Puntuación F1	AP
0,5	0,92	0,90	0,91	0,82
0,75	0,86	0,89	0,87	0,72

Para calcular el rendimiento en tiempo de ejecución de nuestro extractor TS, lo probamos en un subconjunto de 60 imágenes utilizando una NVIDIA RTX A5500, obteniendo un tiempo medio de ejecución de 0,012 s y

Machine Translated by Google

una desviación estándar de 0,0018 s. En un subconjunto de 40 imágenes, utilizando una NVIDIA QUADRO T2000, el tiempo de ejecución promedio es de 0,019 s y la desviación estándar es de 0,0025 s.

4.2. Resultados del detector de

objetos Para entrenar el detector de objetos, anotamos 750 imágenes de tamaño 640 × 480 utilizando la herramienta de anotación LabelImg [26]. Dividimos el conjunto de datos en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba compuestos por 450, 150 y 150 imágenes, respectivamente. Después de la etapa de entrenamiento, la precisión promedio en el conjunto de prueba es del 97,32% y la tasa de éxito es del 96,70%. La inferencia sobre las imágenes se ha ejecutado en una NVIDIA QUADRO T2000. En un subconjunto de 40 imágenes, el tiempo medio de ejecución es de 0,323 s, mientras que la desviación estándar es de 0,0615 s.

4.3. Resultados de agarre del robot

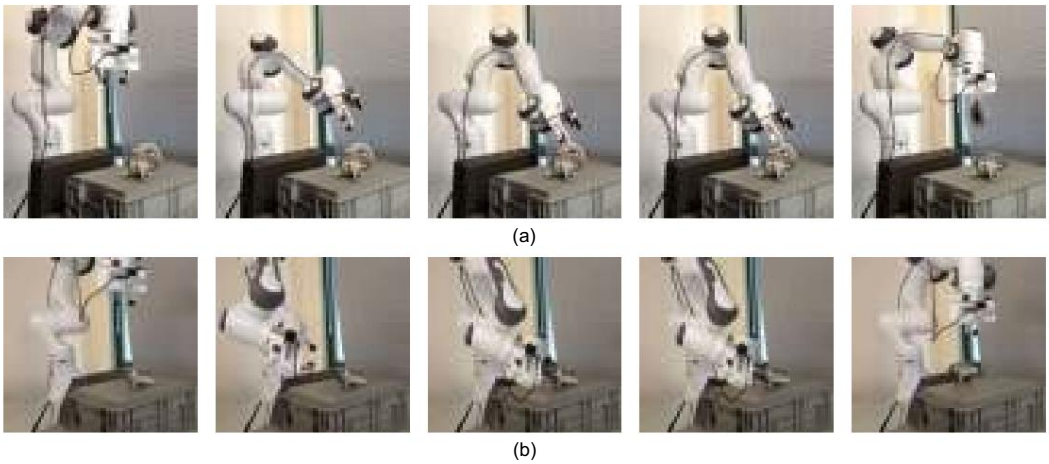
Definamos la estimación de los errores de orientación y posición de agarre como

$$e_p = p_g - \hat{p}_g, \quad (8)$$

$$e_\varphi = \varphi_g - \hat{\varphi}_g, \quad (9)$$

donde p_g es la posición real de agarre mientras que $\hat{p}_g$ es la estimación proporcionada por el visual algoritmo. En cuanto a la orientación, e_φ ($\hat{\varphi}_g$) son los ángulos de Euler extraídos del real (estimada) postura de agarre. La adopción de ángulos de Euler en lugar de cuaterniones como en (6) proporciona una interpretación física más clara de los errores de orientación. El superíndice e indica que las variables se expresan en el marco del efector final (ver Figura 2).

Para obtener resultados estadísticamente significativos, se han realizado 54 pruebas de agarre (20 para la tapa del separador de aceite del cárter de hierro fundido, 19 para el tubo de aire y 15 para la tapa del separador de aceite del cárter de plástico) colocando los objetos en diferentes configuraciones, diferentes condiciones de luz. , y con diferentes fondos para permitir que el robot explore todas las posturas de agarre posibles. Una prueba de agarre se considera exitosa si la persona que sujeta el objeto con agarre estable durante 10 s. En la Figura 8 se muestra un conjunto de instantáneas del procedimiento de agarre , donde la fila superior se refiere a una prueba exitosa y la fila inferior se refiere a una falla.



(a)

(b)

Figura 8. Instantáneas de dos casos de agarre. (a) Captación exitosa. (b) Fracaso.

Sólo 7 experimentos (2 para la cubierta del separador de aceite del cárter de hierro fundido, 3 para el tubo de aire y 2 para la cubierta del separador de aceite del cárter de plástico) experimentaron fallas. Así, se ha obtenido una tasa de éxito del 87,04%. Las tablas 5 a 7 muestran los errores medios de posición y orientación y la desviación estándar correspondiente para las pruebas exitosas.

Machine Translated by Google

Tabla 5. Errores medios para la tapa del separador de aceite del cárter de hierro fundido.

Pruebas exitosas	$_{\text{píxeles}}^{\text{mi}}$ [mm] mi	$_{\text{py}}^{\text{mi}}$ [mm] mi	$^{\text{mi}}_{\text{mi}}{}_{\text{x}}$ [grados]	$^{\text{mi}}_{\text{mi}}{}_{\text{y}}$ [grados]
1	0.734	9.471	3.128	3.515
2	6.867	0.717	3.284	3.091
3	1.081	5.857	6.092	12.433
4	13.032	10.752	3.132	6.256
5	1.796	0,775	6.801	0,77
6	3.832	0,759	3.913	3.546
7	3.629	1.531	2.981	3.416
8	1.324	6.747	0,674	0,92
9	3.073	7.437	0,62	35.308
10	1.293	1.021	0,952	1.605
11	3.916	1.631	0,391	6.217
12	4.62	2.697	3.044	4.508
13	2.368	4.09	9.12	3.953
14	0.463	6.314	2.456	10.075
15	1.816	2,214	2.217	5.806
16	2,958	4,751	1.842	7.763
17	2,86	8,736	1.354	4.138
18	3,018	0,747	13.855	2.16
Significar	3,26	4.236	3.659	6.415
Desviación Estándar	2,820	3.278	3.329	7.607

Tabla 6. Errores medios para la tubería de aire.

Pruebas exitosas	$^{\text{mi}}_{\text{mi}}{}_{\text{píxeles}}$ [mm]	$^{\text{mi}}_{\text{mi}}{}_{\text{py}}$ [mm]	$^{\text{mi}}_{\text{mi}}{}_{\text{x}}$ [grados]	$^{\text{mi}}_{\text{mi}}{}_{\text{y}}$ [grados]
1	0,043	0,989	2.439	8.109
2	9,586	17,223	4.597	0.555
3	1,098	2,612	16.723	13.204
4	3,777	6,188	19.545	10.702
5	7,213	0,227	3.663	1.042
6	3,882	1,516	1.684	0.315
7	2,897	2,176	11.183	1.733
8	0.144	1.932	10.255	7.891
9	2.41	1.412	12.057	7.392
10	5.042	0,797	12.674	20.755
11	2.989	2.809	11.516	26.216
12	14.5	4.903	0.988	2.294
13	11.149	1.207	5.192	0,53
14	3.736	5.841	9.211	25.563
15	0.818	8.494	12.022	20.307
$_{\text{discreto}}$	0,636	14.538	15.122	7.086
Significar	4.37	4.554	9.304	9.606
Desviación Estándar	4.085	4.843	5.447	8.801

Para todos los objetos, los errores de posición a lo largo del eje z del marco efector final tienen No se han informado ya que son insignificantes debido a la geometría del objeto. Por la misma razón, Los errores de orientación alrededor del eje z del marco efector final pueden ser insignificantes para el tapa del separador de aceite del cárter de hierro fundido y el tubo de aire.

En algunas pruebas, se experimentaron grandes errores, principalmente a lo largo del eje y del marco del efector final, pero el objeto se agarró con éxito ya que la pinza está caracterizada. por dedos paralelos, y los errores a lo largo de la dirección de cierre son más tolerados.

Las fallas del sistema se pueden dividir en dos categorías principales:

1. Errores relacionados con puntos clave faltantes (ver Figura 9a,e) o inexactos (ver Figura 9b,d,f) detección o predicción, y estimación de profundidad incorrecta.
2. Presentar errores de estimación que puedan provocar el deslizamiento del objeto.

Machine Translated by Google

Tabla 7. Errores medios para la tapa plástica del separador de aceite del cárter.

Pruebas exitosas	$e_{pixeles}$ [mm]	e_{py} [mm]	e_{x} [grados]	e_{y} [grados]	e_{z} [grados]
1	13.453	1.036	7.726	4.594	10.505
2	1.795	8.396	11.419	16.797	1.977
3	1.387	5.306	2.214	3.451	11.761
4	7.493	5.909	3.41	5.945	7.285
5	0,799	6.753	3.439	12.744	2.62
6	2.997	1.521	2.03	4.885	9.134
7	5.897	9.452	10.56	1.247	4.62
8	0.973	1.319	7.221	0.007	4.146
9	2.246	5.577	2.104	3.025	2.231
10	1.268	13.631	3.325	4.165	26.108
11	4.547	13.786	2.265	1.418	7.61
12	0.575	1.472	8.638	2.531	10.629
13	3.606	2.318	1.721	6.289	23.799
Significar	3.618	5.883	5.082	5.161	9.417
Desviación Estándar	3.487	4.281	3.381	4.527	7.367

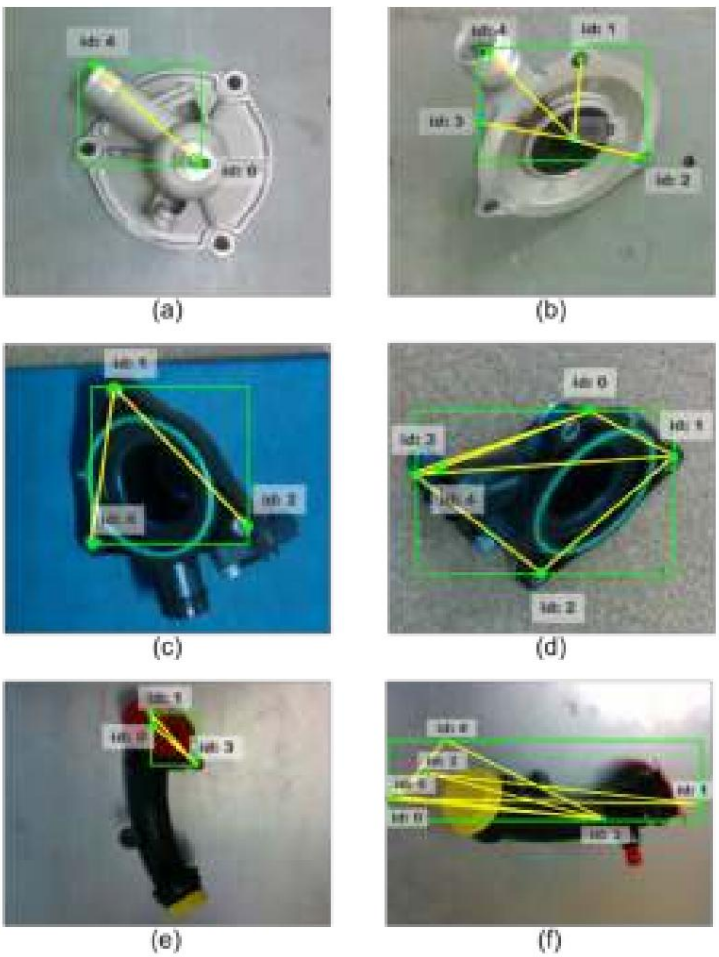


Figura 9. Ejemplos de detección de puntos clave faltantes (a,e) e inexactos (b,d,f) en TS. Ejemplo de Detección de puntos clave faltantes que pueden conducir a un agarre exitoso del objeto (c).

En caso de que falte una detección de punto clave, por ejemplo debido a la relación objeto-cámara posición, el fallo se puede gestionar moviendo el punto de vista de la cámara y adquiriendo una nueva predicción (ver Sección 3.3). En los demás casos, se completa el procedimiento de agarre. con un fracaso. Dado que el robot puede detectar el fallo de agarre, se repite todo el proceso.

Machine Translated by Google

Vale la pena señalar que, de acuerdo con el procedimiento descrito en el Algoritmo 2, agarrar un objeto es factible incluso con solo tres puntos clave visibles (ver Figura 9c) detectados correctamente, siempre que uno de ellos sea un punto de agarre situado en un lugar que se puede captar con el efector final disponible.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto un método robusto para el agarre de piezas de geometría compleja en un escenario industrial . En tal entorno, los desafíos de agarre se deben a la presencia de incertidumbres en la posición del objeto a agarrar y a la percepción del ruido debido a su material. En particular, nos centramos en piezas de automóviles del mundo real con geometrías complejas y superficies reflectantes que provocan ruido en el mapa de profundidad. La solución propuesta se basa en una red de extracción de TS que puede crear una representación gráfica del objeto en tiempo real. Se utiliza un paso de razonamiento para decidir si la vista actual del objeto es lo suficientemente buena para agarrarlo realmente o si el manipulador necesita moverse para agarrar mejor el objeto. Se han realizado experimentos cuantitativos con un robot de 7 grados de libertad y tres piezas de automóvil de formas complejas diferentes, lo que demuestra que el enfoque propuesto es rápido y sólido. La alta precisión y la capacidad en tiempo real de este enfoque propuesto lo convierten en una solución adecuada para aplicaciones industriales donde se requiere un rendimiento rápido y preciso .

Debido a la complejidad de los objetos considerados, difícilmente se puede realizar una comparación cuantitativa completa del rendimiento con otros enfoques presentes en la literatura. Sin embargo, el conjunto de datos de prueba está disponible públicamente para hacer posibles comparaciones futuras.

En direcciones futuras, pretendemos estudiar la integración de los datos de profundidad dentro del proceso de extracción de TS para obtener directamente las posiciones 3D de los puntos clave. Además, la fase de detección de objetos también podría integrarse en el procedimiento de extracción de TS.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, AP, MS, DDB y FP; Metodología, AP, MS, DDB y FP; Software, AP, MS y DDB; Investigación, AP y MS; Validación, AP y MS; Análisis formal, AP, MS y DDB; Escritura: borrador original, AP y MS; Redacción: revisión y edición, DDB y FP; Supervisión, DDB y FP; Administración de proyectos, DDB y FP; Adquisición de financiación, FP Todos los autores contribuyeron por igual a este trabajo. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue apoyada por el Ministerio de Universidad e Investigación de Italia bajo la subvención PRIN 2022 PNRR MELODY (Manipulación colaborativa de múltiples robots que apoya las tareas de desmontaje) n. P2022XALNS.

Declaración de disponibilidad de datos: el código fuente del enfoque del detector TS está disponible públicamente en https://github.com/apennisi/CoGP-TS. El código fuente basado en ROS de nuestro enfoque está disponible públicamente en https://github.com/sileom/graspingWithSkeleton.git. Varios videos de los experimentos están disponibles en https://tinyurl.com/bdhyf493. Las imágenes del conjunto de prueba están disponibles en https://tinyurl. com/bdxs8n7z. Todos los modelos utilizados en la estrategia descrita están disponibles públicamente y se pueden descargar desde https://tinyurl.com/3a4nnc88 (Se accedió a todos los enlaces el 23 de julio de 2024).

Agradecimientos: Los autores desean agradecer a Alessandro Lorenzo, Simona D'Amato y Antonio Giardiello por su ayuda con el proceso de anotación de imágenes.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Abreviaturas

En este manuscrito se utilizan las siguientes abreviaturas:

cnn	Red neuronal convolucional
grado de libertad	Grado de libertad
FCI	Interfaz de control Franka
FCN	Red totalmente convolucional
FN	Falso negativo

Machine Translated by Google

FP	Falso positivo
Red neuronal convolucional de agarre generativo GG-CNN	
MBConv Mobile convolución de cuello de botella invertida	
OK	Similitud de puntos clave de objetos
FAP	Campos de afinidad de piezas
rosa	Sistema operativo robótico
Tennesse	Verdadero Negativo
TP	Verdadero positivo
TS	Esqueleto topológico

Referencias

1. Sileo, M.; Bloisi, DD; Pierri, F. Detección y captación de objetos en tiempo real mediante la resta de fondo en un escenario industrial. En Actas del 6.° Foro Internacional sobre Investigación y Tecnología para la Sociedad y la Industria (RTSI) del IEEE de 2021, virtual, 6 al 9 de septiembre de 2021; págs. 283–288.
2. Sileo, M.; Bloisi, DD; Pierri, F. Captación de objetos industriales sólidos mediante registro 3D. Máquinas 2023, 11, 396. [CrossRef]
3. Costanzo, M.; De María, G.; Letra, G.; Natale, C. ¿Pueden los robots llenar el estante de un supermercado?: Planificación del movimiento y control de agarre. Robot IEEE. Automático. revista 2021, 28, 61–73. [Referencia cruzada]
4. Asif, U.; Tang, J.; Harrer, S. GraspNet: una red neuronal convolucional eficiente para la detección de agarre en tiempo real para dispositivos de baja potencia. En Actas de la IJCAI, Estocolmo, Suecia, 13 a 19 de julio de 2018; págs. 4875–4882.
5. Zhang, H.; Bronceado, J.; Zhao, C.; Liang, Z.; Liu, L.; Zhong, H.; Fan, S. Un método rápido de detección y agarre para manipuladores móviles. Basado en R-CNN mejorado y más rápido. Robot de Indiana. En t. J. Robot. Res. Aplica. 2020, 47, 167-175. [Referencia cruzada]
6. Mahler, J.; Liang, J.; Niyaz, S.; Laskey, M.; Doán, R.; Liu, X.; Ojea, JA; Goldberg, K. Dex-net 2.0: Aprendizaje profundo para planificar captaciones sólidas con nubes de puntos sintéticas y métricas de captación analíticas. En Proceedings of the Robotics: Science and Systems (RSS), Cambridge, MA, EE. UU., 12 a 16 de julio de 2017.
7. Pinto, L.; Gupta, A. Autosupervisión de gran tamaño: aprender a captar con 50.000 intentos y 700 horas de robot. En Actas de la conferencia internacional IEEE de 2016 sobre robótica y automatización (ICRA), Estocolmo, Suecia, 16 a 21 de mayo de 2016; págs. 3406–3413.
8. Schmidt, P.; Vahrenkamp, N.; Wächter, M.; Asfour, T. Captura de objetos desconocidos utilizando redes neuronales convolucionales profundas basadas en imágenes de profundidad. En Actas de la conferencia internacional IEEE de 2018 sobre robótica y automatización (ICRA), Brisbane, Australia, 21 a 25 de mayo de 2018; págs. 6831–6838.
9. Morrison, D.; Corke, P.; Leitner, J. Cerrando el círculo del agarre robótico: un enfoque de síntesis de agarre generativo en tiempo real. En Proceedings of the Robotics: Science and Systems (RSS), Pittsburgh, PA, EE. UU., 26 a 30 de junio de 2018.
10. Morrison, D.; Corke, P.; Leitner, J. Aprendizaje de agarre robótico reactivo, robusto y en tiempo real. En t. J. Robot. Res. 2020, 39, 027836491985906. [Referencia cruzada]
11. Yu, F.; Koltun, V. Agregación de contexto multiescala mediante convoluciones dilatadas. arXiv 2015, arXiv:1511.07122.
12. Duna, C.; Marchand, E.; Collowet, C.; Leroux, C. Estimación activa de la forma aproximada de objetos desconocidos. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE/RSJ de 2008 sobre Robots y Sistemas Inteligentes, Niza, Francia, 22 a 26 de septiembre de 2008; págs. 3622–3627.
13. Kraft, D.; Pugeault, N.; Ba¸seski, E.; POPOVIC, M.; Kragi´c, D.; Kalkan, S.; Wörgötter, F.; Krüger, N. Nacimiento del objeto: detección de la objetividad y extracción de la forma del objeto a través de complejos objeto-acción. En t. J. Robot humanoide. 2008, 5, 247–265. [Referencia cruzada]
14. Detry, R.; Ek, CH; Madry, M.; Piater, J.; Kragic, D. Generalización de captaciones de objetos parcialmente similares. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE sobre Robótica y Automatización de 2012, St Paul, MI, EE. UU., 14 a 18 de mayo de 2012; págs. 3791–3797.
15. Bloisi, DD; Pennisi, A.; Iocchi, L. Modelado de antecedentes en el ámbito marítimo. Mach. Vis. Aplica. 2014, 25, 1257–1269. [Referencia cruzada]
16. Marchand, É.; Spindler, F.; Chaumette, F. ViSP para servovisión visual: una plataforma de software genérica con una amplia clase de habilidades de control de robots. Robot IEEE. Automático. revista 2005, 12, 40–52. [Referencia cruzada]
17. Kannala, J.; Brandt, SS Un modelo de cámara genérico y un método de calibración para lentes convencionales, gran angular y ojo de pez. IEEE Trans. Patrón Anal. Mach. Intel. 2006, 28, 1335–1340. [Referencia cruzada] [PubMed]
18. Tsai, RY; Lenz, RK Una nueva técnica para la calibración robótica mano/ojo en 3D totalmente autónoma y eficiente. Traducción IEEE. Robot. Automático. 1989, 5, 345–358. [Referencia cruzada]
19. Osokin, D. Estimación de pose de varias personas 2D en tiempo real en CPU: OpenPose ligero. arXiv 2018, arXiv:1811.12004.
20. Cao, Z.; Hidalgo, G.; Simón, T.; Wei, SE; Sheikh, Y. OpenPose: Estimación de poses 2D de varias personas en tiempo real mediante afinidad de partes Campos. Traducción IEEE. Patrón Anal. Mach. Intel. 2021, 43, 172–186. [Referencia cruzada] [PubMed]
21. Howard, A.; Sandler, M.; Chu, G.; Chen, L.; Chen, B.; Bronceado, M.; Wang, W.; Zhu, Y.; Pang, R.; Vasudevan, V.; et al. Buscando MobileNetV3. arXiv 2019, arXiv:1905.02244.
22. Siciliano, B.; Sciavicco, L.; Villani, L.; Oriolo, G. Robótica: modelado, planificación y control; Springer: Londres, Reino Unido, 2009.
23. Redmon, J.; Divvala, S.; Girshick, R.; Farhadi, A. Solo miras una vez: detección de objetos unificada en tiempo real. En Actas de la Conferencia IEEE sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Las Vegas, NV, EE. UU., 27 a 30 de junio de 2016; págs. 779–788.
24. Brooks, J. COCO Anotador. 2019. Disponible en línea: https://github.com/jsbroks/coco-annotator/ (consultado el 23 de julio de 2024).

Machine Translated by Google

25. Ronchi, señor; Perona, P. Evaluación comparativa y diagnóstico de errores en la estimación de pose de instancias múltiples. arXiv 2017, arXiv:1707.05388.
26. Laboratorios Heartex; Lin, T. EtiquetaImg. 2015. Disponible en línea: https://github.com/heartexlabs/labelImg (consultado el 23 de julio de 2024).

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Control de rechazo activo de perturbaciones mejorado para permanente Motor síncrono magnético

Huang Zhiwei [1], Yuanhao Cheng 1,2,*, Si Chen 1,2, Xuhui Zhang [3], Jiawei Xiang 1,2 y Sun'an Wang [4]

1 Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad de Wenzhou, Wenzhou 325060, China; 22461440036@stu.wzu.edu.cn (ZH); 20200316@wzu.edu.cn (SC); jwxiang@wzu.edu.cn (JX)
2 Instituto Pingyang y Fabricación Inteligente, Universidad de Wenzhou, Wenzhou 325035, China
3 Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Monitoring, Universidad de Ciencia y Tecnología de Xi'an, Xi'an 710064, China; zhangxh@xust.edu.cn
4 Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Xi'an Jiaotong, Xi'an 710049, China; sawang@xjtu.edu.cn
* Correspondencia: yhcheng@wzu.edu.cn

Resumen: Para mejorar el rendimiento del control de un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) ante perturbaciones externas, se propone un algoritmo mejorado de control de rechazo de perturbaciones activas (IADRC). Dado que la función no lineal en el algoritmo ADRC convencional no es lo suficientemente suave en los puntos de interrupción, lo que afecta directamente el rendimiento del control, se propone una función no lineal innovadora para mejorar efectivamente la convergencia y la estabilidad. Sobre esta base, se construye el IADRC propuesto y los resultados de simulación comparativos con ADRC y otros IADRC muestran que se obtienen una velocidad de respuesta más rápida, mayor precisión y mayor robustez.

Palabras clave: ADRC mejorado; función no lineal; PMSM; control de velocidad

1. Introducción

Debido a las ventajas de alta densidad de potencia, estructura simple, fácil mantenimiento y cómoda regulación de velocidad, los motores síncronos de imanes permanentes (PMSM) se utilizan ampliamente en vehículos de nueva energía, máquinas herramienta de control numérico computarizado (CNC) y otros equipos de alta gama [1 ,2]. La tecnología de control de diferencial integral proporcional (PID), que se utiliza ampliamente en diversas industrias, gobierna el sistema de regulación de velocidad PMSM tradicional. Aunque el controlador PID tiene las ventajas de una estructura simple y una fácil implementación [3,4], es necesario establecer un modelo matemático preciso del objeto controlado para lograr un control preciso. Sin embargo, al modelar PMSM, la estructura del motor a menudo se simplifica. Esta simplificación ha demostrado ser inadecuada cuando el PMSM opera a bajas velocidades, lo que resulta en una degradación notable del rendimiento del control, como se destaca en la Ref. [5]. Además, el PID no puede suprimir bien el ruido y las interferencias , por lo que los académicos han propuesto una variedad de sistemas PID mejorados [6,7]. Al optimizar los parámetros de ajuste, el rendimiento del control se puede mejorar significativamente, pero aún es necesario mejorar la capacidad antiinterferencia, la velocidad de respuesta y la precisión .

La teoría de control moderna proporciona una nueva solución para mejorar el rendimiento de los sistemas de control. Simultáneamente con el avance en la tecnología de control PMSM, se han propuesto varios métodos de control efectivos. Según la Ref. [8], el controlador PID no lineal mejora el rendimiento del control mediante la transformación adaptativa de la señal de error y el ajuste dinámico de los parámetros PID, lo que permite al controlador atenuar eficientemente el ruido en la señal de entrada y abordar un equilibrio entre la velocidad de respuesta y el sobreimpulso inherente al PID convencional. controladores. Además, también se adopta PID difuso para mejorar la robustez del sistema [9]. Además, el control por modo deslizante (SMC) sin duda se ha convertido en un avance crítico en la ingeniería de control de motores en los últimos años [10,11]. Puede mejorar la eficacia del control de los sistemas PMSM al tiempo que muestra una rápida convergencia.

check for updates

Cita: Huang, Z.; Cheng, Y.; Chen, S.; Zhang, X.; Xiang, J.; Wang, S. Control de rechazo activo de perturbaciones mejorado para motores síncronos de imanes permanentes. Electrónica 2024, 13 , 3023. https://doi.org/10.3390/electronics13153023

Editor académico: Fabio Corti

Recibido: 25 de junio de 2024
Revisado: 25 de julio de 2024
Aceptado: 30 de julio de 2024
Publicado: 31 de julio de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Machine Translated by Google

y fuerte resistencia a las interferencias. Sin embargo, debido a las características de vibración de la estructura variable del modo deslizante, cómo suprimir eficazmente esta vibración se ha convertido en un tema importante. El control robusto también es una clase de métodos dirigidos a sistemas inciertos, y se han estudiado leyes de control robusto basadas en paradigmas H∞ y síntesis μ, que logran una buena supresión de perturbaciones y robustez ante variaciones de parámetros [12]. Aunque estos algoritmos mejoran efectivamente el efecto de control del sistema PMSM, todavía tienen dificultades para lograr un rendimiento de control superior al abordar incertidumbres en los modelos y lidiar con interferencias externas.

El control activo de rechazo de perturbaciones (ADRC) es una estrategia de control no lineal propuesta por Jingqing Han, que puede abordar eficazmente las incertidumbres y las perturbaciones externas [13]. La utilidad de este enfoque se refleja en su capacidad antiinterferente superior , gran adaptabilidad al cambio y la incertidumbre de los parámetros del sistema, alta precisión de control, velocidad de respuesta rápida, estructura simple y fácil implementación [14], y ha atraído una amplia atención en muchos campos técnicos [15-17]. ADRC consta principalmente de tres componentes: diferenciador de seguimiento (TD), observador de estado extendido (ESO) y ley de control de retroalimentación de errores de estado no lineal (NLSEF). El TD puede suavizar la señal de entrada, reducir la influencia del ruido y proporcionar información diferencial de la señal para ayudar al controlador a responder mejor a los cambios en el sistema. El ESO es el componente central del ADRC, que se utiliza para estimar las variables de estado y las perturbaciones totales del sistema. Tiene la capacidad de observar y mitigar incertidumbres y perturbaciones externas en tiempo real, mejorando así la robustez y la resistencia del sistema a las interferencias. Además, el NLSEF genera comandos de control basados en el error de estado observado, así como en información de perturbación para obtener un control preciso del objeto controlado. La estrategia de control de retroalimentación no lineal proporcionada por NLSEF puede mejorar drásticamente la respuesta dinámica del sistema. ADRC hereda la esencia del PID tradicional y puede controlar eficazmente sistemas con no linealidad e incertidumbre sin depender de modelos precisos [18,19]. Por ejemplo, basándose en ADRC y el control de modo deslizante, Fang et al. [20] propusieron un nuevo método de diseño integrado de bucles de velocidad y posición y realizaron el control de velocidad y posición de PMSM. Si bien se logra un exceso mínimo del sistema, la complejidad de la configuración de parámetros sigue siendo un desafío. Al abordar esto, Li et al. [21] introdujeron un ADRC de modo deslizante, reemplazando el ESO con un observador de perturbaciones no lineal para agilizar los ajustes de parámetros. Basándose en su investigación, Ge et al. [22] emplearon un algoritmo de optimización de enjambre de partículas para mejorar el ADRC para el control de actitud de las naves espaciales. En lugar de depender de una selección empírica, los parámetros ahora se determinan mediante optimización matemática . Árbitro. [23] propusieron un ADRC difuso de orden fraccionario, que mitiga las limitaciones de los métodos de control convencionales (como la baja precisión y la respuesta lenta), y se utiliza para gestionar el control de numerosos movimientos articulares del manipulador. Ramlavi y Chidan [24] estudiaron el enfoque de control de seguimiento del control de rechazo de perturbaciones activas lineales para mejorar el rendimiento de seguimiento y la robustez del controlador y resolvieron la incertidumbre del modelo y las perturbaciones ambientales de un robot de una sola rueda. Basándose en la investigación de Partovibakhsh y Liu [25], Guo y Zhao [26] mejoraron las capacidades de seguimiento de los robots móviles a través del mecanismo de compensación del ADRC. Lv [27] propone un método de control difuso de rechazo de perturbaciones automáticas (Fuzzy-ADRC) para un inversor trifásico de cuatro brazos para suprimir las pulsaciones de par del motor en condiciones de funcionamiento complejas. Wang [28], en respuesta al pobre desempeño del control causado por parámetros fijos en ADRC para un PMSM sin rumbo, propone un método de ajuste dinámico de parámetros para ADRC basado en un algoritmo genético y una red neuronal de retropropagación. Fang [29] propuso un método ADRC basado en un ESO mejorado para diseñar

Aunque la tecnología ADRC mejora efectivamente el efecto de control de sistemas no lineales e inciertos, todavía existen limitaciones, como la insuficiencia de metodologías efectivas para el establecimiento de parámetros, la falta de capacidad de estimación para perturbaciones que varían rápidamente en el tiempo y la función fal adoptada por los ADRC tradicionales no. siendo lo suficientemente suave en los puntos de conmutación entre la sección no lineal y la sección lineal [30,31]. Considerando los desafíos que enfrentan actualmente los sistemas de control PMSM con controladores ADRC, este artículo tiene c

Machine Translated by Google

Haga la siguiente contribución: se propone una función polinómica no lineal combinada con una función coseno para mejorar la función fal , lo que efectivamente mejora la suavidad de la función no lineal y mejora la robustez de ADRC. Los hallazgos investigados indican que, en comparación con el ADRC convencional y otros ADRC mejorados (IADRC), el IADRC propuesto en este documento amplifica significativamente la velocidad de respuesta, la precisión y la robustez del sistema .

La estructura organizativa de este documento se describe a continuación. La sección 2 presenta el modelo matemático del PMSM. La Sección 3 presenta la estrategia de mejora del ADRC y construye un controlador IADRC. En la Sección 4, se presenta un diseño para el sistema de control de velocidad PMSM que emplea el IADRC propuesto. En la Sección 5, se llevan a cabo el experimento de simulación y el análisis, y se verifica el buen desempeño de control del IADRC propuesto para sistemas PMSM.

2. Modelado matemático de PMSM

La estructura del rotor y la distribución de imanes permanentes del PMSM [32] se muestran en la Figura 1. Según sus características estructurales, los PMSM se pueden dividir en dos tipos: montados en superficie y empotrados. El PMSM de montaje en superficie también se denomina PMSM de polo no saliente. Debido a que su permeabilidad es muy cercana a la permeabilidad del vacío, el cambio entre la reluctancia y la inductancia es muy pequeño, lo que hace que el rotor tenga buenas características de polo no saliente. Esto también hace que el campo magnético del imán permanente tenga una distribución aproximadamente sinusoidal y el motor tenga un mejor rendimiento. Para el PMSM incorporado, la reluctancia del eje directo es mucho mayor que la del eje de cuadratura, por lo que la inductancia del eje directo es mucho menor que la del eje de cuadratura y el rotor tiene características de polo saliente, por lo que es También llamado polo saliente PMSM. El PMSM incorporado realiza un control sin sensores a través del efecto de polo saliente y aumenta la densidad de potencia a través del par de resistencia electromagnética.
Sin embargo, la estructura del rotor es compleja, el coeficiente de fuga de flujo magnético es grande y el coste de fabricación es alto.

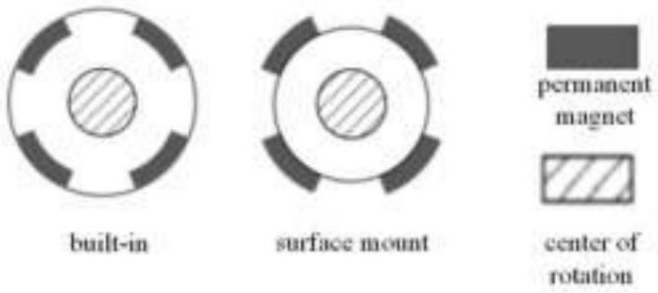


Figura 1. Diagrama esquemático de las estructuras del rotor PMSM.

Debido a las diferentes estructuras de los PMSM, sus modos de funcionamiento y la formación de sus pares electromagnéticos también serán diferentes. Por lo tanto, para lograr un mejor efecto de control, es necesario formular una variedad de esquemas de control diferentes de acuerdo con las estructuras internas de los PMSM. Teniendo en cuenta que el PMSM montado en superficie tiene un bajo costo y la misma inductancia del eje dq, es más sencillo establecer la ecuación de par electromagnético. Por lo tanto, en este estudio se selecciona el PMSM montado en superficie.

Para analizar el modelo matemático del PMSM trifásico, se deben cumplir los siguientes supuestos están hechos para la conveniencia del análisis:

(1) Ignorar la reluctancia de los núcleos del estator y del rotor, sin considerar las pérdidas por corrientes parásitas o histéresis.

(2) El material del imán permanente no es conductor y su permeabilidad es equivalente al del aire.

(3) El rotor no tiene devanados amortiguadores.

Machine Translated by Google

(4) El campo magnético de excitación del imán permanente y el campo magnético de reacción del inducido del devanado trifásico se distribuyen de forma sinusoidal a través del entrehierro.

(5) La forma de onda de la fuerza electromotriz inducida en el devanado de fase sigue una forma sinusoidal patrón.

Suponiendo que se cumplan las condiciones antes mencionadas, según la inducción electromagnética y la ley de voltaje de Kirchhoff, la ecuación de voltaje de un PMSM trifásico en el sistema de coordenadas naturales se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} &= dt\ d\psi b \frac{d\psi a}{} + Rsia\ ua \\ ub &= \frac{}{dt} + Rsis \\ uc &= dt \frac{d\psi c}{} + Rsic \end{aligned} \quad (1)$$

La ecuación de voltaje del estator del PMSM en un sistema de coordenadas giratorio de dos fases puede ser obtenido por la transformada de Clarke y la transformada de Park [33]:

$$\begin{aligned} d\psi q \quad & \frac{d\psi d}{} + Rsid - \omega e\psi q\ ud = dt \\ & \frac{}{} + Rsiq + \omega e\psi d\ uq = dt \end{aligned} \quad (2)$$

La ecuación de la cadena del magnetismo del estator es:

$$\begin{aligned} &\psi d = Ldid + \psi f\ \psi q = \\ &Lqiq \end{aligned} \quad (3)$$

Al llevar la ecuación (3) a (2) se obtiene:

$$\begin{aligned} d\psi q \quad & \frac{d\psi d}{} + Rsid - \omega eLqiq\ ud = dt \\ & \frac{}{} + Rsiq + \omega e(Ldid + \psi f)\ uq = dt \end{aligned} \quad (4)$$

donde ua, ub, uc son las tensiones trifásicas del devanado del estator, con V como unidad; Rs es la resistencia del estator, con Ω como unidad; ia, ib, ic son la corriente trifásica del devanado del estator, con A como unidad; ψa, ψb, ψc son el flujo del devanado del estator, con Wb como unidad; ψf es el enlace de flujo del imán permanente, con Wb como unidad; Ld, Lq son los componentes de inductancia de la inductancia del estator en el eje dq, respectivamente, con H como unidad; ωe representa la velocidad angular eléctrica del motor, con rad/s como unidad.

Mediante el análisis de los componentes del par de resistencia y el par dinámico, se deriva la ecuación de movimiento mecánico del motor:

$$j \frac{d\omega m}{} = Te - B\omega m - T\ dt \quad (5)$$

donde J es el momento de inercia, T es el par de carga y B es el coeficiente de fricción viscosa.
Mediante la transformación de Clarke y la transformación de Park, la ecuación del par electromagnético se obtiene a continuación:

$$Te = \frac{3}{2} pn\ \psi f\ iq + (Ld - Lq)idiq \quad (6)$$

donde Te es el par electromagnético; 3/2 es el coeficiente cuando se adopta el principio de transformación de igual amplitud; Pn se refiere al número total de pares de polos del motor.

La ecuación de movimiento mecánico transformada es:

$$j\frac{d\omega m}{dt} = \frac{3}{2} pn\ \psi f\ iq + (Ld - Lq)idiq - B\omega m - T \quad (7)$$

3. Diseño de controlador ADRC mejorado

El ADRC tradicional trata la incertidumbre, las perturbaciones internas del sistema y las perturbaciones externas colectivamente como la perturbación general del sistema. Y puede lograr resultados reale

Machine Translated by Google

estimación y compensación precisas en el tiempo de esta perturbación utilizando ESO y NLSEF. Este enfoque no se basa en un modelo exacto de la planta y mejora significativamente las capacidades antiinterferencias. Sin embargo, la función fal del ADRC tradicional no es lo suficientemente suave en los puntos de conmutación entre la sección no lineal y la sección lineal, lo que hace que el efecto de control no sea ideal. Por lo tanto, en este artículo se propone un controlador ADRC mejorado respaldado por una función fal mejorada .

3.1. Diseño de función Fal mejorado

La función fal es una función no lineal que desempeña un papel vital en ADRC. No solo permite al ADRC estimar y compensar mejor las perturbaciones del sistema, mejorando así el rendimiento antidisturbios del sistema, sino que también permite mitigar la amplificación cuando el error es grande y aumentar cuando el error es pequeño. Es beneficioso mejorar la velocidad de reacción del sistema ante errores grandes y la precisión del control ante errores pequeños, al tiempo que se mejora la robustez y adaptabilidad del sistema.

En el ADRC tradicional, fal(e, α, δ), como función no lineal crucial, puede estimar eficazmente las perturbaciones internas y externas del sistema, generando así la señal de salida del ADRC. La forma de la función fal se muestra en la ecuación (8):

$$\text{fal}(e, \alpha, \beta) = \begin{cases} |mi|^{\alpha} \text{signo}(e), & |e| \geq \\ \frac{mi}{\delta 1 - \alpha} & \delta , |e| < \delta \end{cases} \quad (8)$$

Tomando δ = 0.001, cuando α toma valores diferentes, la curva de la función fal se muestra en la Figura 2.

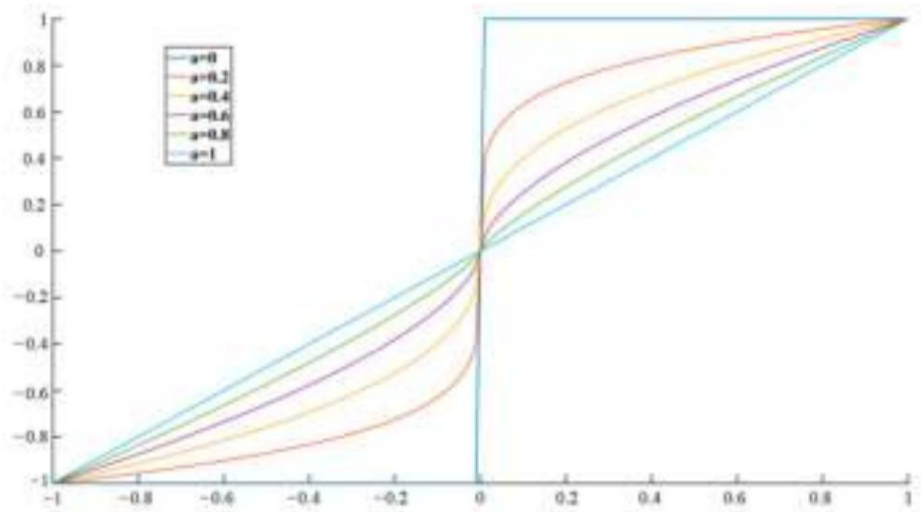


Figura 2. Curvas de la función fal(e, α, δ) bajo diferentes valores de α .

Desde la perspectiva de la convergencia, el atractor terminal $|e|^{\alpha}\text{sign}(e)$ es convergente en tiempo finito, especialmente adecuado para el control cerca de la etapa de origen (|e| < 1), que tiene un efecto de amplificación sobre el error, pero no adecuado para el control lejos de la etapa de origen, y el La convergencia será más lenta que el control lineal clásico. El término lineal es exponencialmente convergente, lo que es adecuado para el control lejos del origen (|e| > 1). Sin embargo, en la función fal , el uso del término atractor terminal y el término lineal se invierte, lo que hace que la función fal en su conjunto converja en un tiempo no finito, sin importar cuán pequeño sea el error inicial e(0), por lo que el El término lineal se puede mejorar para mejorar la capacidad de convergencia.

De la ecuación (8), es evidente que los valores de la derivada en los puntos de ruptura difieren después de aplicar la derivada de la función fal . Y también se puede ver en la Figura 2 que las curvas de función fal(e, α, δ) son continuas pero no suaves cuando e = |δ|, y hay un cambio repentino, lo que conducirá a un rendimiento de control deficiente del sistema. .

Machine Translated by Google

Con base en los problemas anteriores, en este artículo se propone una función polinómica no lineal lfal(e, α, δ) que combina funciones lineales y trigonométricas. Las razones para adoptar una combinación de funciones trigonométricas y polinomios son las siguientes:

(1) Las funciones trigonométricas y los polinomios tienen formas matemáticas explícitas, lo que hace son fáciles de manejar analítica y teóricamente.

(2) Las funciones trigonométricas y polinomios correctamente diseñados pueden reducir el exceso del sistema y mejorar la velocidad de respuesta y la estabilidad del sistema.

(3) Aunque la función trigonométrica agregada hace que lfal sea más complejo que la función fal original , la eficiencia del cálculo se puede mejorar mediante la tabla de búsqueda y los métodos de interpolación, y se puede lograr un mejor efecto de control bajo la premisa de garantizar el tiempo real. rendimiento y menores requisitos de hardware.

La expresión de la función se muestra a continuación:

$$\text{Si } fal(e,\alpha,\beta) = \begin{cases} \dfrac{|mi|^{\alpha}\ \text{signo}(e)}{k1}, & |mi| \geq \delta \\ \dfrac{\delta^{\alpha-3}\, mi}{k1}\cos(e-\delta) - \dfrac{\delta^{\alpha-2}\, mi}{k2}\cos(e-\delta) + k3\delta + \alpha\delta\alpha-1\ e, & |e| < \delta \end{cases} \quad (9)$$

La idea de diseño de la función es la siguiente: considerando que el principal problema de la función fal original es que los segmentos no son lo suficientemente suaves, la función lineal original se cambia a una función polinómica combinada con una función trigonométrica y una función lineal cuando |e | ≤ δ en este artículo. Luego, de acuerdo con la condición de que la función fal sea continua en los segmentos y los valores de la función derivada sean iguales, se obtiene la relación entre los tres coeficientes constantes de k1, k2 y k3 .

Con base en las ideas anteriores, se puede saber que cuando e = |δ|, los valores de la función en ambos lados de la función de lfal son iguales, y después de tomar la derivada de la función de lfal , los valores de la derivada en ambos lados también son iguales. .

A la luz de los conceptos antes mencionados, se establece la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} &l\,fal-(e,\alpha,\beta) = l\,fal+(e,\alpha,\beta) \\ &l\,fal'-(e,\alpha,\beta) = l\,fal'+(e,\alpha,\beta) \end{aligned} \quad (10)$$

La expresión derivada de la función lfal , después del cálculo, es la siguiente:

$$\text{Si } fal'(e,\alpha,\beta) = \begin{cases} \alpha\delta(\alpha-1), & |mi| > \delta \\ \delta\alpha - 3_{mi}(k1-1) - \delta^{\alpha-2}\, mi\,(k2-1) + \alpha\delta(\alpha-1), & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (11)$$

Combinando las ecuaciones (10) y (11), podemos derivar la ecuación (12).

$$\frac{\delta\alpha - 3_{mi}k1\cos(e-\delta)\,k1}{\delta\alpha - 3_{mi}(k1-1) - \delta^{\alpha-2}\, mi} - \frac{\delta^{\alpha-2}\, mi}{\alpha\delta(\alpha-1) = \alpha\delta(\alpha-1)}k2\cos(e-\delta) + k3\delta + \alpha\delta\alpha-1\ e = |e|\ k2\,(k2-1) + {}^{\alpha}\text{firmar}(e) \quad (12)$$

Cuando |e| = δ, la ecuación (3) se simplifica a la siguiente forma:

$$\frac{\delta\, k1+\alpha-3}{k1} - \frac{\delta\, k2+\alpha-2}{k1+\alpha-3 - \delta\, k2+\alpha-2 + \alpha\delta\alpha-1 = \alpha\delta\alpha-1} + k3\delta + \alpha\delta = \delta\, k2\,\delta^{\alpha} \quad (13)$$

Luego, se deriva la relación para k1, k2 y k3 , k2 = k1 − 1, k3 = k1 (k1−1) , que se introduce en la función lfal para obtener la nueva función no lineal:

$$\text{Si } fal(e,\alpha,\delta) = \begin{cases} \dfrac{|mi|^{\alpha}\ \text{firmar}(e)}{k1}, & |mi| > \delta \\ \dfrac{\delta\alpha - 3_{mi}k1\ \text{porque}(e-\delta)}{k1} - \dfrac{\delta^{\alpha-2}}{\alpha\delta(k1-1)}k1-1\cos(e-\delta)\,\delta\, k1+\alpha-3 + \alpha\delta(k1-1), & |e| \leq \delta + (1-\alpha)\delta\,\alpha + k1-1\ k1 \end{cases} \quad (14)$$

Las curvas de función fal antes y después de la mejora están dibujadas por MATLAB 2020a de MathWorks y se muestran en la Figura 3.

Machine Translated by Google

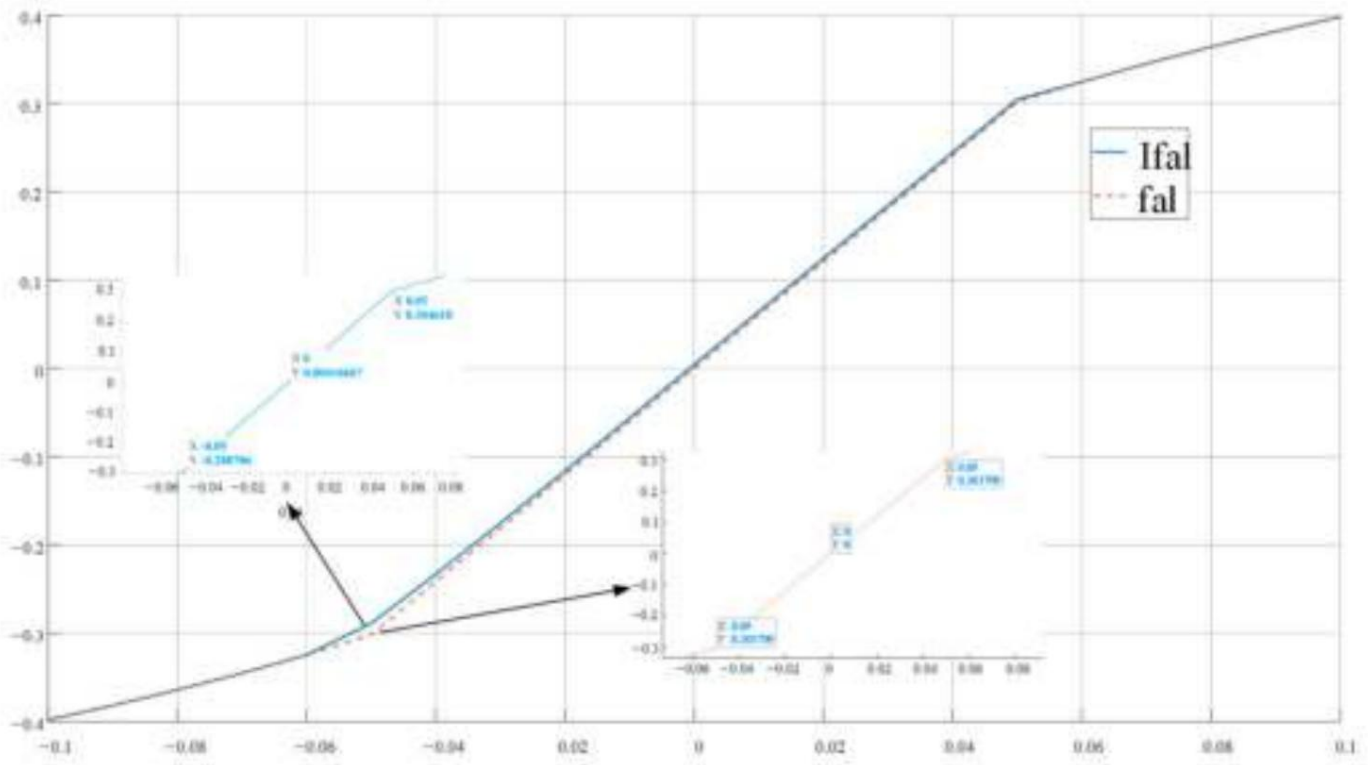


Figura 3. Curvas de la función fal(e, α, δ) antes y después de la mejora.

Se puede ver en el gráfico que la curva de la función lfal (e, α, δ) es más suave que la de la función fal . La función de lfal es continua y derivable en los puntos que |e| = δ. En el rango de (−0,06, 0,06), la salida de la función lfal es mayor que la de la función fal , es decir, la función lfal converge más rápido y más suavemente.

3.2. Diseño ESO mejorado (IESO)

Además, el IESO sirve como núcleo del IADRC. No sólo proporciona la estimación del estado del sistema PMSM, sino que también clasifica todo tipo de perturbaciones tanto internas como externas, además de las incertidumbres que comprenden la totalidad de las perturbaciones del sistema PMSM, y estima y compensa la perturbación total en tiempo real. Al igual que ESO, IESO se basa únicamente en los datos de entrada y salida del sistema y no requiere un modelo matemático preciso de perturbaciones. Este enfoque mejora efectivamente el rendimiento y la solidez del sistema de control. La formulación del IESO es la siguiente:

$$\begin{aligned} e2 &= z21 - n = \\ \dot{z}_{21} &= bu(t) + z22 - k31 \, lfal(e2, \alpha 2, \delta 2) = -k32 \, lfal(e2, \alpha 2, \delta 2) \end{aligned} \quad (15)$$

3.3. Diseño NLSEF mejorado (INLSEF)

El NLSEF logra el control efectivo de la no linealidad, la incertidumbre y las perturbaciones externas en ADRC y mejora el rendimiento y la robustez del control del sistema. La función fal es un elemento no lineal clave en NLSEF para procesar señales de error. Puede manipular de forma adaptativa la amplificación en función de la magnitud del error, disminuyendo la ganancia en casos de error sustancial y elevando la ganancia cuando el error es mínimo, mejorando así la precisión y robustez del mecanismo de control. La expresión del INLSEF es la siguiente:

$$\begin{aligned} e1 &= z11 - z21 \\ tu(t) &= -\frac{k2 \, lfal(e1, \alpha 1, \delta 1)}{b} \end{aligned} \quad (\text{dieciséis})$$

Machine Translated by Google

donde z21 representa una observación de la respuesta dinámica del controlador, mientras que z21 denota una observación de la perturbación, b es el factor de compensación y k2 es la ganancia del regulador.

3.4. Diseño del sistema de control de velocidad PMSM basado en la propuesta del IADRC

La Figura 4 muestra el diagrama esquemático del sistema de control de velocidad PMSM propuesto por el IADRC . El controlador controla indirectamente la velocidad y el par del PMSM controlando la salida del inversor. El sistema adopta un control de circuito cerrado doble, en el que el circuito de corriente opera bajo PI, mientras que el circuito de velocidad está controlado por la propuesta del IADRC.

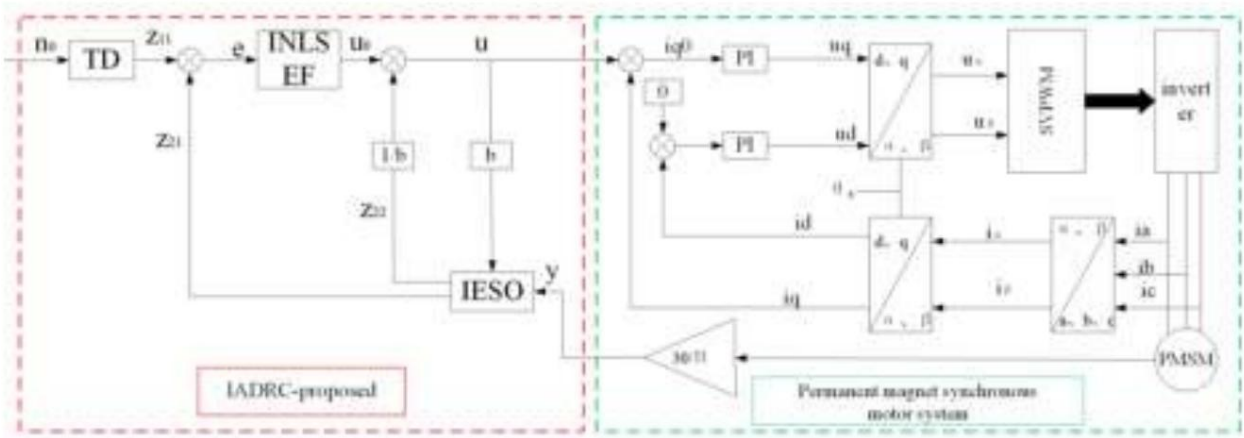


Figura 4. Diagrama que describe el sistema de control de velocidad propuesto por el IADRC de PMSM.

4. Simulación y Evaluación Experimental

Para verificar el efecto del algoritmo propuesto por IADRC en el control de velocidad PMSM, el ADRC tradicional, SMC, PID difuso y el IADRC en Ref. [34] se adoptan como algoritmos de comparación. Los modelos del sistema de regulación de velocidad PMSM basados en estos cinco algoritmos de control se construyen en MATLAB/Simulink y posteriormente se llevan a cabo experimentos de comparación de simulación . Las especificaciones para el PMSM en los modelos de simulac descrito en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones para PMSM.

Especificaciones	Valor
Resistencia de fase del estator R (Ohmios)	2.785
Inductancia del eje directo del estator LD (H)	8,5 × 10-3 8,5
Inductancia del eje transversal del estator LQ (H)	× 10-3
Enlace de flujo de imán permanente ψf (Wb)	0,175
Inercia J (kg·m2/rad)	1 × 10−3
Pares de polos, P	4
Coeficiente de fricción B	1 × 10−4

La metodología incorporada en este manuscrito se describe a continuación: la velocidad esperada del PMSM es 1500 r/min. Para verificar la solidez del algoritmo propuesto por IADRC , primero se agrega un par de carga. Cuando la velocidad real alcanza la velocidad esperada y es estable, el par de carga de 2 N·m se aplica repentinamente al eje de salida del PMSM en 0,1 s para comparar la curva de respuesta sin carga y la capacidad antiinterferente del PMSM bajo la acción. de los cinco algoritmos de control anteriores. El tiempo experimental total es de 0,15 s.

La configuración de los parámetros en el algoritmo propuesto por IADRC es la siguiente. Según las descripciones específicas de los tres componentes del ADRC en la Sección 3, los dos parámetros α, δ en TD y NLSEF se establecen con base en la experiencia, α1 = 0,4, δ1 = 0,09, α2 = 0,4, δ2 = 0,09. Los dos parámetros en el ESO se determinan mediante simulación y sintonización continua: α3 = 0,25, δ3 = 0,04. Coeficiente de velocidad k1 en el TD, ganancia del regulador k2 y factor de compensación b del NLSEF, derivados del modelo matemático y parámetros del PMSM

Machine Translated by Google

sistema, se toman como k1 = 5355, k2 = 5000, b = 1030,66, respectivamente. De manera similar, la calibración las ganancias de la salida en el ESO se toman como k31 = 8500, k32 = 500,000. Los parámetros clave en el controlador se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Los valores de los parámetros clave del controlador.

Componente	Especificaciones	Valor
DT	Factor de seguimiento α1	0,4
	Factor de filtrado δ1	0,09
	Factor de velocidad k1	5355
NLSEF	Factor de seguimiento α2	0,4
	Factor de filtrado δ2	0,09
	Ganancia del regulador k2	5000
	Factor de compensación b	1030.66
ESO	Factor de seguimiento α3	0,25
	Factor de filtrado δ3	0,04
	Las ganancias de calibración de la salida k31	8500
	Las ganancias de calibración de la salida k32	500.000

De acuerdo con la configuración de los parámetros anteriores, los tres algoritmos se aplican al Control de velocidad del PMSM. Los resultados del experimento se muestran a continuación:

Se puede ver en las Figuras 5 y 6 que en la etapa inicial de puesta en marcha del PMSM, el IADRC propuesto en este artículo tiene el mejor efecto entre los tres algoritmos. No sólo no tiene sobrepasa pero también alcanza y se estabiliza a la velocidad esperada en 0.027 s. El maximo El valor de fluctuación del error es 31,28 r/min, que es aproximadamente el 2,09% de la velocidad esperada. El CIID en Ref. [34] necesita 0,045 s para alcanzar y estabilizarse a la velocidad esperada, y el El exceso es de 61,64 r/min, que es aproximadamente el 4,11% de la velocidad esperada. Y el tiempo para el ADRC tradicional para alcanzar y estabilizarse a la velocidad esperada es de 0,085 s, y su sobreimpulso También es la más grande, que es de 119,04 r/min, aproximadamente el 7,89% de la velocidad esperada. El SMC requiere 0,075 s para alcanzar y estabilizarse a la velocidad esperada, con un sobrepaso máximo de 423,71 r/min, que es aproximadamente el 28,25% de la velocidad esperada. El PID difuso toma 0,043 s para alcanzar y estabilizar la velocidad esperada, con una fluctuación de error máxima de 30,27 r/min, que es aproximadamente el 2,02% de la velocidad esperada.

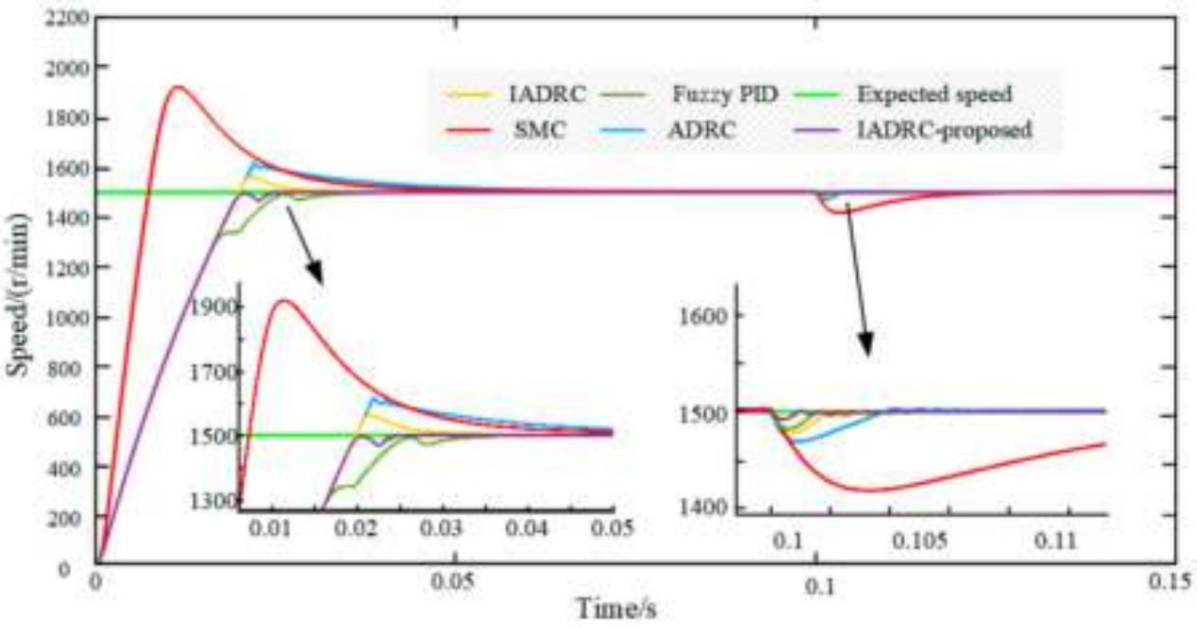


Figura 5. Curvas de respuesta de velocidad de 5 algoritmos sin ruido gaussiano.

Machine Translated by Google

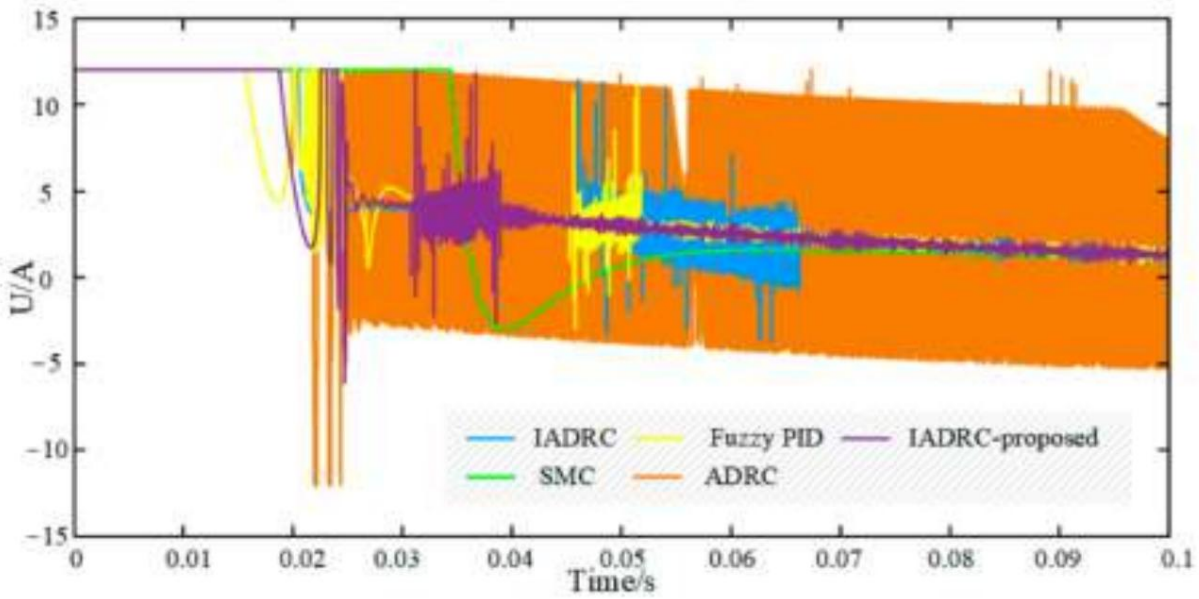


Figura 6. Las entradas de control de la planta de 5 algoritmos sin ruido gaussiano.

Cuando la velocidad del PMSM se estabiliza a la velocidad esperada, el par de carga escalonada se aplica a 0,1 s. El algoritmo IADRC propuesto en este artículo básicamente no se ve afectado y la curva de velocidad solo fluctúa ligeramente. El error de velocidad máximo es 7,39 r/min, que es aproximadamente el 0,49 % de la velocidad esperada, y luego rápidamente (0,004 s) vuelve al valor esperado. La curva de velocidad del algoritmo IADRC en Ref. [34] produjo un error de velocidad máxima de 20,73 r/min, que es aproximadamente el 1,38% de la velocidad esperada, y volvió al valor esperado después de 0,006 s. Y la curva de velocidad del algoritmo ADRC tradicional produce un error de velocidad máximo de 29,85 r/min, que es aproximadamente el 1,99% de la velocidad esperada, y vuelve al valor esperado después de 0,034 s. La curva de velocidad del algoritmo SMC produce un error de velocidad máximo de 81,98 r/min, que es aproximadamente el 5,47% de la velocidad esperada, y vuelve al valor esperado después de 0,028 s. La curva de velocidad del algoritmo PID difuso produce un error de velocidad máximo de 18,11 r/min, que es aproximadamente el 1,21% de la velocidad esperada, y vuelve al valor esperado después de 0

Varios factores inciertos afectan el sistema PMSM en el trabajo práctico, como el ruido ambiental y los cambios de resistencia causados por el funcionamiento continuo del motor o cambios en la temperatura ambiente. Para verificar la solidez del algoritmo propuesto por el IADRC ante diferentes variaciones e incertidumbres de los parámetros, se agregan al sistema experimentos de simulación de interferencia de ruido y cambio de resistencia del motor.

Para verificar la robustez del algoritmo propuesto por el IADRC, este artículo también incluye experimentos comparativos de la entrada de control de la planta U bajo ruido gaussiano, comparándolo con otros algoritmos. El ruido gaussiano se agrega al principio y la señal se configura para que tenga una media de 1 y una varianza de 200. Otros parámetros del motor se muestran en las Tablas 1 y 2. Los resultados de la simulación se muestran en las Figuras 7 y 8.

Al comparar las figuras 5 a 8, es obvio que las curvas de respuesta de velocidad y la salida U del sistema no cambian significativamente antes y después de agregar el ruido gaussiano para los cinco algoritmos. Además, las curvas de respuesta de velocidad y la salida del sistema U controlada por el algoritmo propuesto por IADRC tienen el tiempo de oscilación más corto y la amplitud de oscilación más pequeña, lo que verifica la estabilidad del algoritmo propuesto por IADRC.

Para validar aún más el impacto de los cambios en la resistencia del motor en la propuesta del IADRC, las resistencias del motor se establecen en 2,5875, 2,875 y 3,1625, respectivamente. Otros parámetros son consistentes con la Tabla 1. Los resultados experimentales se muestran en la Figura 9.

Machine Translated by Google

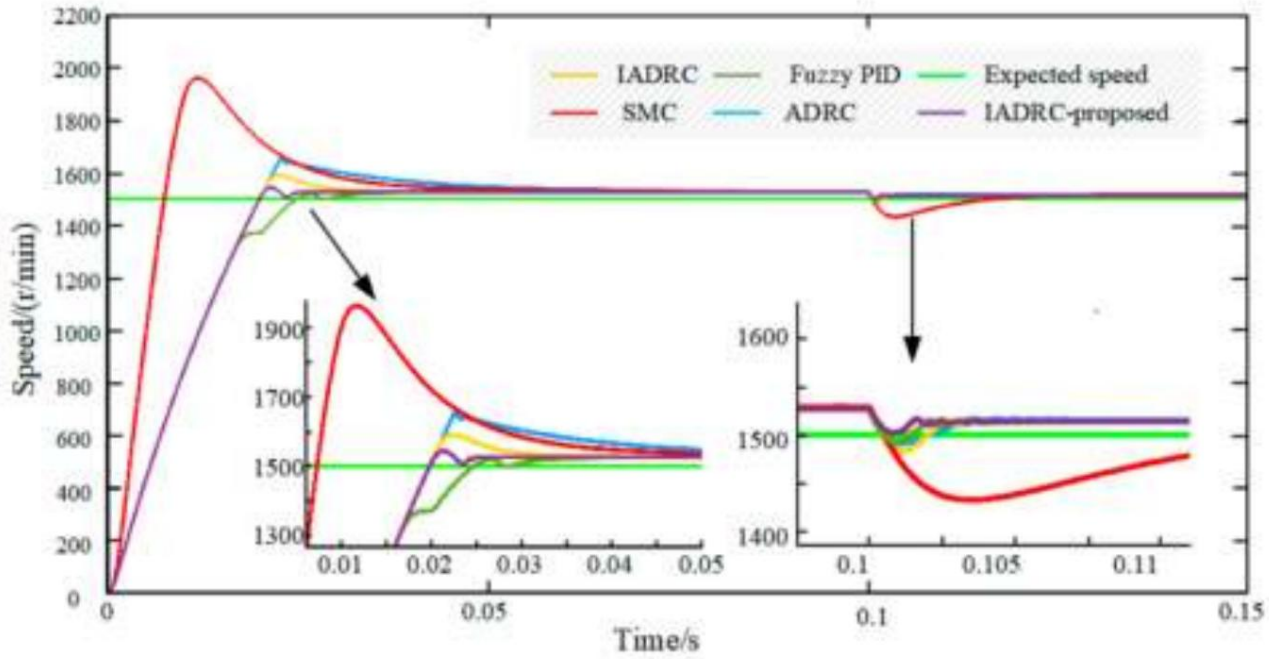


Figura 7. Curvas de respuesta de velocidad de 5 algoritmos bajo ruido gaussiano.

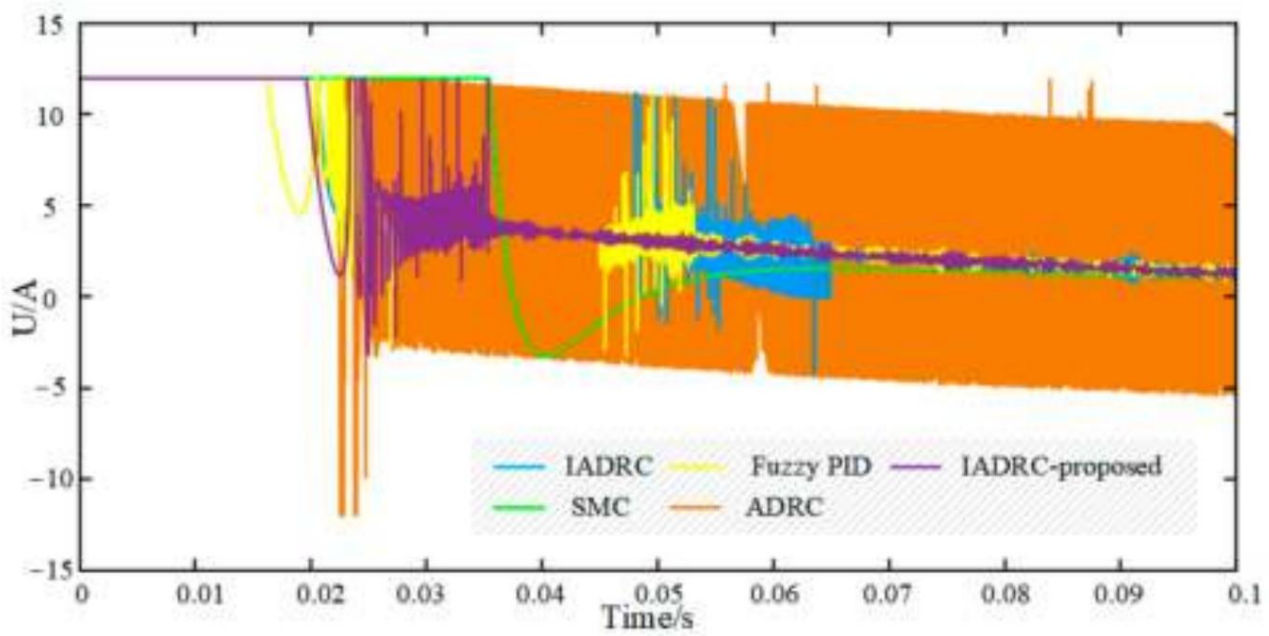


Figura 8. Las entradas de control de la planta de 5 algoritmos bajo ruido gaussiano.

De la Figura 9, es obvio que aunque el exceso y el tiempo para alcanzar la estabilidad cambian, el cambio es leve. Indica que después de cambios en las condiciones externas, el efecto de control sigue siendo muy bueno, lo que confirma la solidez del algoritmo propuesto por el IADRC .

En resumen, está efectivamente demostrado que nuestro IADRC presentado exhibe una capacidad de respuesta mejorada, mayor precisión de control, mayor robustez y capacidad antiinterferente. El rendimiento específico es el siguiente: nuestro algoritmo patentado IADRC es un 40,00% mejor que el IADRC en la Ref. [34], 68,24% mejor que el ADRC tradicional, 64,00% mejor que SMC y 37,21% mejor que el PID difuso en términos de rapidez. En términos de precisión, es un 49,25% mejor que el IADRC en la Ref. [34], 73,72% mejor que el ADRC tradicional, 92,62% mejor que SMC y 3,35% peor que el PID difuso. Además, cuando el par de carga escalonada es

Machine Translated by Google

Aplicado en el estado de operación estable, el algoritmo IADRC propuesto en este artículo es un 33,33% mejor que el IADRC en la Ref. [34], 88,24% mejor que el ADRC tradicional, 85,71% mejor que SMC y 94,29% mejor que el PID difuso en términos de rapidez. En términos de precisión, es un 64,35% mejor que el IADRC en la Ref. [34], 75,24% mejor que el ADRC tradicional, 90,99% mejor que SMC y 59,19% mejor que PID difuso. Además, las pruebas experimentales que agregan ruido gaussiano y cambian la resistencia del motor atestiguan que el algoritmo IADRC propuesto tiene buena robustez.

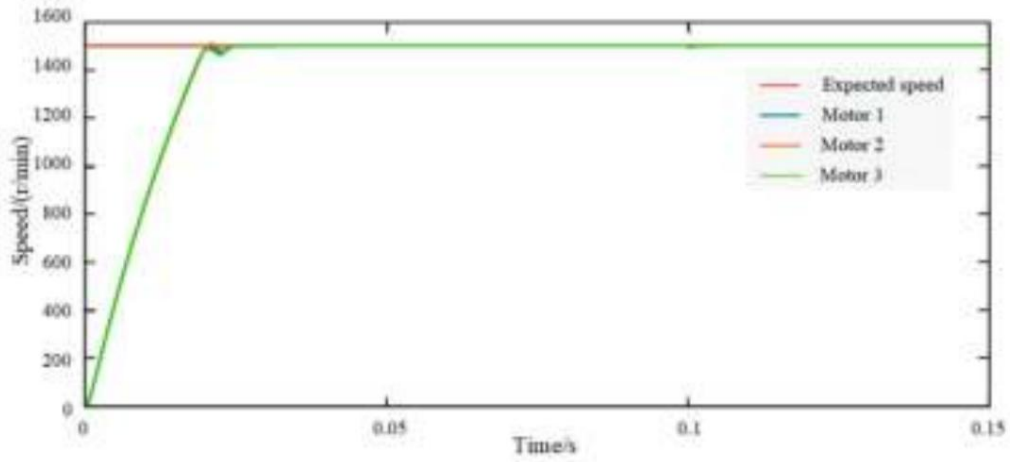


Figura 9. Curvas de velocidad del motor con diferentes resistencias.

5. Conclusiones

En este artículo se aclara una estrategia IADRC refinada basada en funciones fal , y se obtiene un mejor rendimiento de control para el PMSM en comparación con el ADRC tradicional, IADRC en Ref. [34], SMC y PID difuso. Los resultados de la simulación indican que, en comparación con el ADRC, el IADRC en la Ref. [34], SMC y PID difuso, el IADRC propuesto en este artículo tiene una velocidad de respuesta más rápida. El tiempo para alcanzar y estabilizarse a la velocidad esperada es un 68,24% más corto que el del ADRC, un 40,00% más corto que el del IADRC en la Ref. [34], 64,00% más corto que el de SMC y 37,21% más corto que el de PID difuso. Además, el IADRC propuesto en este documento no se excede y la reducción máxima de error asciende al 73,72% en comparación con el ADRC, 49,25% en comparación con el IADRC en la Ref. [34], 92,62% en comparación con SMC y −3,35% en comparación con PID difuso. En el caso de una perturbación repentina cuando la velocidad del PMSM se estabiliza a la velocidad esperada, el tiempo para alcanzar y estabilizar la velocidad esperada es 88,24% más corto que el del ADRC, 33,33% más corto que el del IADRC en la Ref. [34], 85,71% más corto que el de SMC y 94,29% más corto que el de PID difuso. Además, el error máximo del IADRC propuesto en este documento es 75,24% menor que el del ADRC, 64,35% menor que el del IADRC en la Ref. [34], 90,99% menor que el de SMC y 59,19% menor que el de PID difuso. Aparte de eso, la buena robustez también se verifica agregando ruido gaussiano y cambiando la resistencia del motor.

Nuestro trabajo futuro se centrará en aplicar el algoritmo propuesto por el IADRC al control físico de PMSM y continuar mejorando el algoritmo de acuerdo con la situación de control real.

Contribuciones de los autores: Escritura: preparación del borrador original, ZH; redacción: revisión y edición, YC; recursos, SC; supervisión, XZ, JX y SW Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China con el número de subvención 52205316 y la Fundación Provincial de Ciencias Naturales de Zhejiang de China con el número de subvención LTGN24E050002. Y el APC fue financiado por el Importante Proyecto de Innovación Científica y Tecnológica de Wenzhou de China con el número de subvención ZN2022002.

Machine Translated by Google

Declaración de disponibilidad de datos: las contribuciones originales presentadas en el estudio se incluyen en el artículo; más consultas pueden dirigirse al autor correspondiente.

Agradecimientos: Los autores agradecen a los editores y revisores anónimos por sus valiosos comentarios y sugerencias.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Boloniani, S.; Tubiana, L.; Zigliotto, M. Ajuste extendido del filtro Kalman en unidades PMSM sin sensores. Traducción IEEE. Aplica. Ind. 2003, 39, 1741-1747. [Referencia cruzada]
2. Wallmark, O.; Harnefors, L.; Carlson, O. Algoritmos de control para una unidad PMSM tolerante a fallas. Traducción IEEE. Indiana electrón. 2007, 54, 1973–1980. [Referencia cruzada]
3. Gashti, A.; Akbarimajd, A. Diseño de un controlador PI anti-windup para LFC de un sistema de energía no lineal combinado con DSTS de una planta de energía nuclear y un enlace HVDC. eléctrico. Ing. 2020, 102, 793–809. [Referencia cruzada]
4. Errouissi, R.; Al-Durra, A.; Muyeen, SM Validación experimental de un novedoso controlador de velocidad PI para variadores de velocidad de motores de CA con rendimiento transitorio mejorado. Traducción IEEE. Sistema de control Tecnología. 2018, 26, 1414–1421. [Referencia cruzada]
5. Zaky, M.; Khater, M.; Yasin, H.; Shokralla, S. Estimaciones de velocidad muy baja y velocidad cero de accionamientos de motores de inducción sin sensores. eléctrico. Sistema de energía. Res. 2010, 80, 143-151. [Referencia cruzada]
6. Shi, R. Mejora del algoritmo de control predictivo basado en PID de orden fraccional difuso. J. Intel. Sistema. 2023, 32, 876. [Referencia cruzada]
7. Bronceado, W.; Han, W.; Xu, J. PID en el espacio de estados: un eslabón perdido entre el control clásico y moderno. Acceso IEEE 2022, 10, 116540–116553. [Referencia cruzada]
8. Atalik, G.; Senturk, S. Gráficos de control difuso intuicionista basados en el método de clasificación difusa intuicionista para TIFN. Computación suave. 2022, 26, 11403–11407. [Referencia cruzada]
9. Tu, WW; Dong, JX Control robusto de modo deslizante para una clase de sistemas no lineales a través de un esquema de modo deslizante de doble capa. J. Frankl. Inst. Ing. Aplica. Matemáticas. 2023, 360, 10227–10250. [Referencia cruzada]
10. Zhang, GC; Li, XF; Xia, YQ; ÉL, S. Control de modo deslizante adaptativo para el modelo Fornasini-Marchesini no lineal 2D sujeto a cuantificación y caída de paquetes. En t. J. Sistema. Ciencia. 2021, 52, 3001–3012. [Referencia cruzada]
11. Zhao, J.; Zhao, T.; Liu, N. Control de rechazo activo de perturbaciones de orden fraccionario con autoajuste difuso para plataforma estabilizada con precisión. Entropía 2022, 24, 1681. [CrossRef] [PubMed]
12. Xiang, CD; Petersen, IR; Dong, DY Control H∞ coherente y robusto de sistemas cuánticos lineales inciertos con efectos directos e indirectos. acoplamientos. J. Frankl. Inst. Ing. Aplica. Matemáticas. 2023, 360, 13845–13869. [Referencia cruzada]
13. Han, J. Del PID al control activo de rechazo de perturbaciones. Trans. Indiana electrón. 2009, 56, 900–906. [Referencia cruzada]
14. Liu, JJ; Chen, H.; Wang, L.; Yu, MY Control activo de rechazo de perturbaciones para un modelo de profundidad mejorado de AUV. Aplica. Mec. Madre. 2014, 687, 157–162. [Referencia cruzada]
15. Meng, Y.; Liu, B.; Wang, L. Control de velocidad de PMSM basado en un controlador ADRC optimizado. Matemáticas. Problema. Ing. 2019, 2019, 18. [Referencia cruzada]
16. Xiong, S.; Xie, H.; Canción, K.; Zhang, G. Un método de seguimiento de la velocidad para la conducción autónoma mediante ADRC con observador de estado extendido. Aplica. Ciencia. 2019, 9, 3339. [Referencia cruzada]
17. Wan, J.; Liu, H.; Yuan, J.; Shen, Y.; Zhang, H.; Wang, H.; Zheng, Y. Control de movimiento de vehículos submarinos autónomos basado en Rechazo activo de perturbaciones en cálculo fraccionario. J. Mar. Ciencias. Ing. 2021, 9, 1306. [Referencia cruzada]
18. Yang, Z.; Qian, C.; Sol, X.; Wang, K. Estrategia ADRC lineal mejorada para el control sin sensores de IPMSM considerando la Factores de acoplamiento. Traducción IEEE. Transp. Electrificado. 2023, 9, 4437–4446. [Referencia cruzada]
19. Zuo, YF; Zhang, J.; Liu, C.; Zhang, T. Diseño integrado para servosistemas de motores síncronos de imanes permanentes basados en activos control de rechazo de perturbaciones. Trans. Electrotecnología de China. Soc. 2016, 31, 51–58. [Referencia cruzada]
20. Colmillo, S.; Meng, J.; Meng, Y.; Wang, Y.; Huang, D. Control de corriente de rechazo activo de perturbaciones en tiempo discreto del motor PM en Baja velocidad usando el modo de deslizamiento resonante. Traducción IEEE. Transp. Electrificado. 2023, 9, 4783–4794. [Referencia cruzada]
21. Li, Z.; Zhang, Z.; Wang, J.; Wang, S.; Chen, X.; Sun, H. Sistema de control ADRC de PMLSM basado en un novedoso observador de modo deslizante terminal no singular . Energías 2022, 15, 3720. [CrossRef]
22. Ge, X.; Sun, K. Control óptimo de una nave espacial con paneles solares desplegables utilizando un algoritmo de optimización de enjambre de partículas. Ciencia. Tecnología China. Ciencia. 2011, 54, 1107–1112. [Referencia cruzada]
23. Lamraoui, HC; Qidan, Z. Control de seguimiento de velocidad de un robot móvil tipo monociclo basado en LADRC. En Actas de la Tercera Conferencia Internacional IEEE sobre Ciencia de Control e Ingeniería de Sistemas (ICCSSE) de 2017, Beijing, China, 17 a 19 de agosto de 2017; págs. 200-204. [Referencia cruzada]
24. Partovibakhsh, M.; Liu, G. Estimación del índice de deslizamiento y control de robots móviles con ruedas en diferentes terrenos. En actas de la Conferencia internacional IEEE de 2015 sobre tecnología cibernética en automatización, control y sistemas inteligentes (CYBER), Shenyang, China, 8 a 12 de junio de 2015; págs. 566–571. [Referencia cruzada]
25. Ding, L.; Gao, H.-B.; Deng, Z.-Q.; Li, Z.; Xia, KR; Duan, G.-R. Control de seguimiento de trayectoria de robots de exploración planetaria con ruedas moverse sobre terreno accidentado y deformable. Ciencia. Mundo J. 2014, 2014, 793526. [CrossRef] [PubMed]
26. Feng, H.; Guo, B.-Z. Control activo del rechazo de perturbaciones: resultados antiguos y nuevos. Año. Rev. Control 2017, 44, 238–248. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

27. Lv, C.; Wang, B.; Chen, J.; Zhang, R.; Dong, H.; Wan, S. Investigación sobre un método de supresión de ondulación de par de control de rechazo de perturbaciones activas difusas para un motor síncrono de imán permanente. Electrónica 2024, 13, 1280. [CrossRef]
28. Wang, X.; Zhu, H. Control activo de rechazo de perturbaciones de un motor síncrono de imán permanente sin cojinetes basado en un algoritmo genético y un método de ajuste dinámico de parámetros de red neuronal. Electrónica 2023, 12, 1455. [CrossRef]
29. Colmillo, Q.; Zhou, Y.; Mamá, S.; Zhang, C.; Wang, Y.; Huangfu, H. Tecnología de servocontrol de actuadores electromecánicos basada en Control activo de rechazo de perturbaciones. Electrónica 2023, 12, 1934. [CrossRef]
30. Sol, C.; Liu, M.; Liu, C.; Feng, X.; Wu, H. Un método de control de vehículos aéreos no tripulados cuadrotor industrial basado en activo lineal adaptativo difuso Control de rechazo de perturbaciones. Electrónica 2021, 10, 376. [CrossRef]
31. Štumberger, B.; Štumberger, G.; Hadžiselimoví´c, M.; Hamler, A.; Gori˘can, V.; Jesenik, M.; Trlep, M. Comparación de la capacidad de par de motores síncronos de imanes permanentes trifásicos con diferentes disposiciones de imanes permanentes. J. Magn. Magn. Madre. 2007, 316, e261–e264. [Referencia cruzada]
32. Zhang, XG; Colmillo, SJ; Zhang, H. Control predictivo de modelo robusto y fuerte basado en compensación de errores de corriente predictiva para Sistemas de accionamiento PMSM. Traducción IEEE. Indiana electrón. 2024, 1–10. [Referencia cruzada]
33. Vítor, ALO; Scalassara, PR; Goedtel, A.; Endo, W. Patrones basados en las transformadas de Clarke y Park de coeficientes Wavelet para Clasificación de averías de máquinas eléctricas. J. Control automático. eléctrico. Sistema. 2023, 34, 230–245. [Referencia cruzada]
34. Xu, P. Investigación sobre el sistema de control de velocidad PMSM de vehículos de motor mineros basado en autoinmunidad difusa. Tesis de maestría, Anhui Universidad de Tecnología, Anhui, China, 2022.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Investigación y mitigación del equilibrio entre desempeño y equidad mediante el muestreo de categorías protegidas

Gideon Popoola y John Sheppard *

Escuela de Computación Gianforte, Universidad Estatal de Montana, Bozeman, MT 59717,
EE. UU.; gideon.popoola@student.montana.edu
* Correspondencia: john.sheppard@montana.edu

Resumen: Los algoritmos de aprendizaje automático se han vuelto comunes en la toma de decisiones cotidiana y los sistemas de asistencia a las decisiones son omnipresentes en nuestra vida cotidiana. Por lo tanto, en los últimos años ha aumentado la investigación sobre la prevención y mitigación del posible sesgo e injusticia de las predicciones realizadas por estos algoritmos . La mayoría de las investigaciones sobre equidad y mitigación de sesgos en el aprendizaje automático a menudo tratan cada variable protegida por separado, pero en realidad, es posible que una persona pertenezca a múltiples categorías protegidas. Por lo tanto, en este trabajo se examinó la combinación de un conjunto de variables protegidas y la generación de nuevas columnas que separan estas variables protegidas en muchas subcate Estas nuevas subcategorías tienden a estar extremadamente desequilibradas, por lo que la mitigación del sesgo se abordó como un problema de clasificación desequilibrada. Específicamente, se desarrollaron e investigaron cuatro nuevos métodos de muestreo personalizados para muestrear estas nuevas subcategorías. Estos nuevos métodos de muestreo se conocen como sobremuestreo de categoría protegida, muestreo proporcional de categoría protegida, técnica de sobremuestreo de minoría sintética de categoría protegida (PC-SMOTE) y muestreo sintético adaptativo de categoría protegida (PC-ADASYN). Estos métodos de muestreo modifican el método de muestreo existente al centrar su muestreo en las nuevas subcategorías en lugar de en la etiqueta de clase. Luego se evaluó el impacto de estas estrategias de muestreo con base en el desempeño clásico y la equidad en los entornos de clasificación.
El rendimiento de la clasificación se midió usando precisión y F1 basado en el entrenamiento de árboles de decisión univariados, y la equidad se midió usando diferencias impares ecualizadas y paridad estadística. Para evaluar el impacto de la equidad versus el desempeño, estas medidas se evaluaron en comparación con la profundidad del árbol de decisiones. Los resultados muestran que los métodos propuestos pudieron determinar puntos óptimos, mediante los cuales la equidad aumentó sin disminuir el desempeño, mitigando así cualquier posible compensación entre desempeño y equidad.

Palabras clave: equidad; categorías protegidas; aprendizaje automático; muestreo

check for updates

Cita: Popoola, G.; Sheppard, J.
Investigar y mitigar el
Compensación entre desempeño y equidad a través de
Muestreo de categoría protegida.
Electrónica 2024, 13 , 3024. https://doi.org/
10.3390/electronics13153024

Editores académicos: Niusha Shafiabady y
Jianlong Zhou

Recibido: 11 de junio de 2024
Revisado: 23 de julio de 2024
Aceptado: 24 de julio de 2024
Publicado: 31 de julio de 2024

Copyright: © 2024 por los autores.
Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.
Este artículo es un artículo de acceso abierto.
distribuido bajo los términos y
condiciones de los Creative Commons
Licencia de atribución (CC BY)
(https:// creativecommons.org/licenses/by/
4.0/).

1. Introducción

A medida que los algoritmos de aprendizaje automático (ML) dominan cada vez más los sistemas de toma y asistencia de decisiones, su implementación generalizada en varios sectores plantea cuestiones apremiantes sobre la equidad y transparencia de sus predicciones [1]. El potencial de estos algoritmos para perpetuar o exacerbar los prejuicios sociales existentes ha impulsado un importante conjunto de investigaciones para investigar y mitigar la injusticia algorítmica. Esto es fundamental porque las decisiones influenciadas por estos algoritmos impactan profundamente a los individuos, afectando los resultados en ámbitos que van desde las finanzas y el empleo hasta la justicia penal y la atención médica [2].

La fuente de injusticia y sesgo en el LD es multifacética [3]. En particular, es posible que la injusticia surja directamente de los propios algoritmos de ML debido a una posible desalineación del sesgo inductivo subyacente de los algoritmos con respecto al concepto objetivo y la distribución de datos. Esto se conoce como sesgo algorítmico. Una preocupación alternativa radica en el posible sesgo residente en los datos utilizados para entrenar los modelos donde, como resultado directo del supuesto típico de "independiente e idénticamente distribuido" (IID) empleado en la mayoría de M

Machine Translated by Google

Con estos métodos, el resultado del aprendizaje es propagar el sesgo en las predicciones de manera que coincidan con el sesgo de los datos subyacentes. Esta última situación es la que constituye el foco de nuestro trabajo aquí.

1.1. Sesgo e injusticia en el aprendizaje automático

El sesgo es el trato perjudicial, injusto o desigual de un individuo o grupo basado en características específicas, a menudo denominadas características sensibles o protegidas [4]. Ejemplos de estas características protegidas incluyen la edad, la raza, la discapacidad, el sexo y el género [5]. El sesgo en el LD se puede dividir a grandes rasgos en trato desigual (injusticia directa) y trato de impacto (injusticia indirecta) [6]. La injusticia directa ocurre cuando las características protegidas se utilizan explícitamente al tomar decisiones. La injusticia indirecta se ha vuelto cada vez más común hoy en día. Este tipo de injusticia no utiliza atributos protegidos explícitamente; en cambio, ocurre cuando la dependencia de variables asociadas con estos atributos da como resultado resultados significativamente diferentes para los grupos protegidos. Estas otras variables se conocen como funciones proxy. Ejemplos de sesgo en el mundo real incluyen la práctica histórica estadounidense de “línea roja”, donde se negaban hipotecas a residentes de códigos postales predominantemente habitados por minorías, el sesgo de género en el proceso de contratación de Amazon, el sesgo racial del dispensador de jabón de Google, etc. [7].

Aunque estas herramientas de asistencia para la toma de decisiones ayudan a automatizar el proceso de toma de decisiones, pueden dar lugar a un trato injusto de individuos o grupos, tanto directa como indirectamente [8]. La injusticia puede ocurrir en varias áreas del modelado, como en el conjunto de datos de entrenamiento. Esto puede suceder cuando el conjunto de datos de entrenamiento no proporciona una representación justa de las categorías protegidas, por lo que la “verdad fundamental” se vuelve difícil de determinar. Por ejemplo, consideremos un conjunto de datos de una empresa en la que un grupo específico ha enfrentado históricamente discriminación. Específicamente, supongamos que las empleadas de esta empresa no han sido promovidas como sus homólogos masculinos, quienes, por el contrario, han experimentado un avance profesional, a pesar de que ambos grupos se desempeñan al mismo nivel. En esta situación, el verdadero valor de las contribuciones de las empleadas (la verdad básica) no es visible. Como resultado, es probable que un algoritmo de aprendizaje automático entrenado con estos datos detecte e incorpore este sesgo, perpetuando así los prejuicios existentes. Esto podría llevar a que el algoritmo tome decisiones discriminatorias, como recomendar candidatos masculinos para contratación o ascenso con más frecuencia que candidatas igual o más calificadas.

Otra área donde puede ocurrir injusticia es en el propio algoritmo de ML [9]. Los algoritmos de ML aún pueden producir decisiones discriminatorias, incluso cuando se entrenan en un conjunto de datos imparcial donde la “verdad fundamental” se representa con precisión. Esta situación surge cuando los errores del sistema afectan de manera desproporcionada a los individuos de un grupo o minoría específica. Por ejemplo, considere un algoritmo de detección de cáncer de mama que muestra tasas de falsos negativos significativamente más altas para personas negras en comparación con personas blancas, lo que significa que no logra identificar el cáncer de mama con más frecuencia en pacientes negras que en pacientes blancas. Si este algoritmo se utiliza para informar las recomendaciones de tratamiento, desaconsejaría erróneamente el tratamiento para un mayor número de personas negras que blancas, lo que generaría disparidades raciales en los resultados de la atención médica. Esto subraya la necesidad crítica de garantizar que los algoritmos funcionen de manera equitativa en todos los grupos en términos de sus datos de entrenamiento y cómo sus errores afectan a las diferentes poblaciones. Los resultados de la literatura anterior han reportado varios casos de algoritmos que resultan en un trato injusto, por ejemplo, líneas rojas y perfiles raciales [10], discriminación hipotecaria [11], empleo y selección de personal [12].

Si bien se han dirigido esfuerzos considerables a abordar el sesgo en las predicciones de ML [13,14], gran parte de la investigación existente se ha centrado en mitigar el sesgo para atributos protegidos únicos de forma aislada [15]. Por ejemplo, en un conjunto de datos con dos atributos protegidos, raza y sexo, la mayoría de los enfoques existentes pueden aprender un modelo justo que incluya raza o un modelo justo que incluya sexo, pero no un modelo justo que incluya raza y sexo [7]. Sin embargo, las identidades del mundo real no son singulares; son complejos y multifacéticos, y los individuos a menudo pertenecen a múltiples grupos protegidos simultáneamente [16]. Por ejemplo, un individuo puede ser discriminado por varios atributos protegidos, como edad, raza y sexo simultáneamente. Esta interseccionalidad puede conducir a formas compuestas de sesgo y

Machine Translated by Google

discriminación, que no se abordan adecuadamente mediante intervenciones de equidad de una sola variable. Por lo tanto, es fundamental desarrollar metodologías que aborden de manera integral la naturaleza multidimensional de las identidades personales. Este proyecto busca cerrar esta brecha considerando combinaciones de categorías protegidas, sintetizando así estas categorías protegidas en grupos integrales de múltiples categorías, y apunta a abordar las complejidades estratificadas del sesgo de manera más efectiva utilizando métodos novedosos de muestreo de categorías protegidas, reconociendo y abordando así la naturaleza multifacética. de identidades personales y posibles sesgos.

El trabajo presentado en este artículo está motivado por el problema de utilizar algoritmos de ML para la toma de decisiones en áreas socialmente sensibles como la evaluación de préstamos, la contratación o la evaluación de hipotecas, trabajando con esta situación donde un individuo puede pertenecer a varias categorías protegidas . Dado un conjunto de datos de entrenamiento etiquetado que contiene dos o más características protegidas, el método propuesto combina estos atributos protegidos y luego los divide en nuevas multicategorías. Es probable que estas nuevas categorías estén extremadamente desequilibradas y es necesario equilibrarlas para mejorar la equidad de la predicción de nuestros algoritmos de ML. Los métodos de muestreo populares , como el sobremuestreo [17], la técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas (SMOTE) [18], el muestreo sintético adaptativo (ADASYN) [19], etc., muestrean datos entre etiquetas de clases, lo que no se alinea con el objetivo de nuestra investigación de muestreo en las nuevas multicategorías. Por lo tanto, se propone una nueva clase de modificaciones de estos métodos de muestreo que pueden muestrear a través de la nueva categoría en lugar de etiquetas de clase. Esta nueva clase de muestreo modificado se denomina muestreo de categoría protegida. Los métodos de muestreo de categorías protegidas propuestos resultantes se utilizan para muestrear y equilibrar las nuevas categorías antes de realizar la clasificación. La novedad de esta obra es doble. En primer lugar, el enfoque propuesto combina las categorías protegidas para formar nuevas multicategorías que imitan la identidad del ser humano en el mundo real. El segundo es la modificación de los métodos de muestreo existentes para ajustarlos al muestreo de estas nuevas categorías a fin de garantizar que todas las nuevas categorías tengan el mismo número de insta

Sólo con fines de demostración, se eligió un árbol de decisión univariado como algoritmo de clasificación. La intención es demostrar los efectos de los diferentes métodos de muestreo en el desempeño, esperando que se muestren tendencias similares independientemente del método de aprendizaje subyacente. El método de muestreo propuesto se comparó con la línea de base (datos no muestreados) utilizando precisión y F1 como métricas de desempeño de clasificación, así como diferencias de probabilidades igualadas y paridad estadística como métricas de equidad. Además, se realizaron varios análisis para mostrar cómo la profundidad máxima en el árbol de decisión afecta tanto a la precisión como a la equidad.

1.2. Pregunta de

investigación Partiendo de la observación empírica de que a veces existe una compensación entre la equidad y el rendimiento del ML [20], esta investigación intenta responder varias preguntas, como por ejemplo, cómo se podría mitigar esta compensación. En particular, buscamos responder si el método de muestreo de categorías protegidas para abordar la equidad puede mitigar esta compensación. Además, ¿podemos desarrollar un marco metodológico que mitigue eficazmente los sesgos entre estas variables protegidas combinadas sin comprometer la precisión predictiva de los modelos de ML? Finalmente, planeamos responder a la pregunta de cómo la profundidad de un árbol de decisión afecta tanto a las métricas de precisión como a las de equidad, explorando así la relación entre el nivel de ajuste (de subajuste a través de sobreajuste) y la equidad.

1.3. Hipótesis

Nuestra hipótesis es que, al emplear técnicas sofisticadas de muestreo de categorías protegidas diseñadas para estos grupos multicategorías recientemente formulados, podemos aumentar significativamente la equidad del modelo en términos de diferencias de probabilidades igualadas sin disminuir el rendimiento de la clasificación en términos de precisión y F1. Además, exploramos el delicado equilibrio entre equidad y precisión, planteando la hipótesis de que es posible identificar puntos estratégicos donde se puede maximizar la equidad sin impactos perjudiciales en el desempeño.

Esta investigación cuestiona las afirmaciones existentes sobre la existencia de compensaciones en materia de equidad y LD.

Machine Translated by Google

predicción. Prepara el escenario para futuras exploraciones sobre la naturaleza multidimensional de la identidad y la discriminación en los sistemas de decisión automatizados.

1.4. Contribuciones

El amplio problema de la equidad en el aprendizaje automático es importante porque la prevalencia de los sistemas de IA y ML en la actualidad está teniendo un impacto importante en las vidas y los medios de subsistencia de las personas. Si bien la atención al lavado de dinero justo ha aumentado sustancialmente, sigue siendo necesario contar con métodos para promover el lavado de dinero justo sin afectar negativamente el rendimiento del lavado de dinero. Con base en una revisión en profundidad de la literatura y la necesidad mencionada anteriormente de este tipo de trabajo, los métodos reportados aquí hacen las siguientes

contribuciones:

1. La suposición comúnmente aceptada de que existe un compromiso inherente entre equidad y desempeño (es decir, precisión) en el aprendizaje automático se enfrenta al desafío con evidencia proporcionada para respaldar este desafío. En particular, los resultados de este artículo indican que dicha compensación puede mitigarse, lo que sugiere que lo más probable es que cualquier compensación esté ligada a cómo se gestionan los datos.
2. Se presentan cuatro métodos novedosos de preprocesamiento para el muestreo de datos basados en la aplicación de una estrategia de muestreo multicategoría utilizando datos capturados en categorías protegidas. Los métodos parten del supuesto y la hipótesis correspondiente de que equilibrar los datos en función de estas propiedades multicategoría puede aumentar la equidad sin afectar negativamente el rendimiento del modelo de aprendizaje automático.
3. Los resultados experimentales se presentan utilizando tres conjuntos de datos estudiados exhaustivamente dentro de la comunidad justa de ML. Los experimentos incluyen comparaciones con métodos tradicionales de entrenamiento sin remuestreo para demostrar los efectos relativos de los métodos propuestos. Los resultados demuestran que dos de los métodos propuestos, la técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas de categoría protegida (PC-SMOTE) y el muestreo sintético adaptativo de categoría protegida (PC-ADASYN), son particularmente eficaces para mejorar tanto la equidad como el rendimiento.
4. Se presenta un análisis detallado que relaciona los efectos potenciales del desajuste y el sobreajuste en la equidad examinando diferentes niveles en un modelo de árbol de decisión, con y sin el uso de los métodos de muestreo propuestos. Los resultados demuestran la capacidad de los métodos propuestos para identificar un nivel ideal del árbol donde se maximizan tanto la equidad como la precisión.

Como resultado de las contribuciones anteriores, este trabajo representa un importante paso adelante para abordar las preocupaciones sobre la equidad en el aprendizaje automático. Una conclusión clave de los métodos y resultados presentados aquí es que se puede abordar la equidad sin comprometer el rendimiento del modelo.

1.5. Organización

Este documento está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2, se presenta una explicación detallada de la equidad y una discusión de varias métricas técnicas de equidad. Luego, en la Sección 3, se describe la literatura previa relacionada con las estrategias de mitigación de sesgos. En la Sección 4, describimos nuestras técnicas de muestreo propuestas, el conjunto de datos y el enfoque para el ajuste de hiperparámetros. En la Sección 5, presentamos los resultados de varios experimentos junto con pruebas de hipótesis estadísticas como medio para validar estos resultados. En la Sección 6, se analizan los resultados experimentales y se analiza cómo se desempeña cada algoritmo en cada conjunto de datos y cada métrica. También se presentan más resultados sobre el impacto de la profundidad del árbol en la equidad y la precisión . En la Sección 7, se presentan las limitaciones de este trabajo y las direcciones correspondientes para trabajos futuros , y la Sección 8 presenta una serie de conclusiones.

2. Antecedentes

Este estudio considera la equidad al predecir un resultado y Y a partir de un conjunto de características, tures x X Rd y algunos atributos protegidos adicionales s S Rp género y sexo. Por，como raza, ejemplo, en la predicción de préstamos, x representa el historial financiero de un solicitante, s es su raza y género autoinformados e y es si su préstamo está aprobado.

Machine Translated by Google

o negado. Un modelo de predicción se considera justo si sus errores se distribuyen uniformemente entre grupos protegidos, como diferentes razas o géneros. Las predicciones de clase a partir de los datos de entrenamiento D se denotan como Yˆ D := h(x, s) para algunos h : X × S → Y de una clase H. Se supone que los atributos protegidos s S en nuestro estudio son binarios con un valor n que denota el grupo sin privilegios. Por ejemplo, S podría ser raza yn "no blanco"; por lo tanto, la naturaleza binaria de S es {w, n} donde w representa a los solicitantes blancos, que son el grupo privilegiado, y n representa a los solicitantes no blancos, que son el grupo no privilegiado. La definición se puede generalizar aún más a casos no binarios.

X , La discriminación en conjuntos de datos etiquetados se puede definir como un conjunto de datos D, un conjunto de características y un conjunto de atributos protegidos S con valor de dominio {w, n}. La discriminación en D con respecto al grupo S = n denotado como diss=n(D) se define como

$$\text{diss=n(D)} = \left|\frac{|\{x \quad D : x(s) = w, h(x) = +\}|}{\{x \quad D : x(s) = w\}|} - \frac{|\{x \quad D : x(s) = n, h(x) = +\}| \; |\{x}{D : x(s) = n\}|}\right.$$

La definición anterior se puede traducir a la diferencia en la probabilidad de que un solicitante esté en la clase positiva para cada dominio de atributos protegidos {w, n}. Nuestro estudio amplía la definición anterior al considerar el conjunto de datos D, que contiene dos o más atributos protegidos.

Se utilizan dos métricas de equidad populares. La primera es la diferencia impar igualada (EOD), que mide qué tan discriminativa o justa es nuestra predicción. EOD establece que un clasificador binario yˆ es justo si su tasa de falsos negativos (FNR) y su tasa de verdaderos positivos (TPR) son iguales en todo el dominio de S [21]. FPR y TPR con respecto al atributo protegido s S con valor n se pueden definir como

$$TPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 1, S = n)$$

$$FPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = n)$$

Luego, EOD se define matemáticamente como la diferencia entre TPR y FPR entre diferentes grupos en un atributo protegido. Eso es,

$$EOD = TPRn(\hat{y}) - FPRn(\hat{y}).$$

Un clasificador justo tiene una EOD de 0, mientras que un clasificador injusto tiene una EOD de 1. Aunque lograr un clasificador completamente justo en la práctica es casi imposible, esta investigación está orientada a mejorar la EOD sin disminuir la precisión. Luego, para EOD,

$$FPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = n) = TPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 1, S = n)$$

y

$$FPRw(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = w) = TPRw(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = w)$$

Para extender la definición de EOD anterior a nuestra multicategoría, el EOD se calcula para cada columna, luego el macropromedio del EOD se presenta como el EOD final. La segunda métrica utilizada para medir la equidad en la predicción de ML es la paridad estadística (SP). SP define la equidad como una probabilidad igual de ser clasificado como positivo [22]. Esto puede interpretarse como que cada grupo de un atributo protegido tiene la misma probabilidad de ser clasificado con un resultado positivo.

$$P(\hat{y} = 1|S = w) = P(\hat{y} = 1|S = n)$$

3. Revisión de la literatura

Inicialmente se podría suponer que los algoritmos de aprendizaje automático, cada vez más utilizados para la toma de decisiones en aplicaciones críticas como reincidencia, calificación crediticia, decisiones de préstamos, etc., son justos y están libres de sesgos inherentes. Sin embargo, en realidad, pueden heredar cualquier sesgo o discriminación presente en los datos con los que están capacitados, como señaló Burt [23]. Además, simplemente eliminar las variables protegidas del conjunto de datos es insuficiente para abordar la discriminación indirecta y

Machine Translated by Google

de hecho, podría ocultarlo. Este reconocimiento ha aumentado la necesidad de herramientas más avanzadas, lo que hace que descubrir y prevenir la discriminación sea un área importante de investigación, como lo destacan [24-27].

El sesgo en el aprendizaje automático es un tema de rápido crecimiento en la comunidad de investigación del aprendizaje automático. El sesgo en un modelo de LD puede conducir a un trato injusto de las personas que pertenecen a ciertos grupos protegidos. Últimamente, los líderes industriales han comenzado a poner cada vez más énfasis en el sesgo en los modelos y software de ML. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) [28], Microsoft [29] y la Unión Europea [30] han publicado recientemente principios para guiar una conducta justa en IA. Estas organizaciones han declarado que los modelos de ML deben ser justos en aplicaciones del mundo real . Las estrategias de mitigación de sesgos implican modificar uno o más de los siguientes para garantizar que las predicciones realizadas por el algoritmo ML estén menos sesgadas: (a) los datos de entrenamiento, (b) el algoritmo ML y (c) las predicciones resultantes. Estos se clasifican, respectivamente, en enfoques de preprocesamiento [31], procesamiento interno [32] y posprocesamiento [21].

En primer lugar, los datos de entrenamiento se pueden preprocesar para reducir la injusticia o el sesgo antes de entrenar el modelo. Kamiran y Calders [6] sugieren muestrear o reponderar los datos para neutralizar la discriminación. Este enfoque puede ajustar la representación o importancia de ciertos puntos de datos para favorecer (o reducir el favor) a una clase sobre otra. Otro método implica cambiar los registros de datos individuales directamente para reducir la discriminación, como lo explora [33]. Por ejemplo, este enfoque implica alterar los valores en un conjunto de datos para disminuir los sesgos identificables contra ciertos grupos. Además, el concepto de cercanía t, introducido por Sondeck et al. [34], se aplica al control de la discriminación en el trabajo de [35]. El uso de t-closeness garantiza que la distribución de atributos sensibles en cualquier grupo determinado sea cercana a la distribución del atributo en todo el conjunto de datos, preservando así la privacidad y evitando la discriminación basada en atributos sensibles. Un hilo común entre estos enfoques es equilibrar el control de la discriminación con la utilidad de los datos procesados, es decir, minimizar el sesgo sin comprometer significativamente la precisión, representatividad y utilidad general de los datos para el modelado o análisis predictivo. Este equilibrio es esencial para garantizar que los esfuerzos por promover la equidad no reduzcan inadvertidamente la calidad o aplicabilidad de los datos.

En general, el método de preprocesamiento se puede dividir en tres categorías: (1) modificación de datos, (2) eliminación de datos y (3) remuestreo de datos. Los métodos de la primera categoría tienen como objetivo modificar los valores de los puntos de datos de entrenamiento (incluidos los valores de atributos protegidos, los valores de clase y los valores de características) para reducir el sesgo en el conjunto de datos. Un ejemplo de este método es el masaje de datos propuesto por [15]. Su enfoque clasifica los datos de entrenamiento y se invierten los datos cercanos al límite de decisión tanto en los grupos privilegiados como en los no privilegiados. Alternativamente, Fahse et al propusieron un método de preprocesamiento optimizado que aprende una transformación probabilística que edita las clases y características con distorsión individual y equidad grupal . [23]. En [36], los valores de los atributos originales se reemplazan con valores elegidos independientemente de la etiqueta de clase para entrenar un modelo que logra aproximadamente probabilidades igualadas. De manera similar, Peng et al. [37] reemplazan los valores de los atributos protegidos con valores predichos en función de otros atributos, similar a la imputación de datos.

Los métodos de la segunda categoría tienen como objetivo entrenar un modelo justo eliminando ciertas características del conjunto de entrenamiento. Un ejemplo de este método es la supresión de datos propuesta por Dhar et al. [38]. En su artículo, los atributos y características protegidos que están altamente correlacionados con los atributos protegidos, también conocidos como atributos proxy, se eliminan del conjunto de datos para entrenar un modelo justo.

Los métodos de la tercera categoría tienen como objetivo entrenar un modelo justo, ya sea ajustando las ponderaciones de la muestra o sobremuestreando el conjunto de datos. Por ejemplo, Krasanakis et al. [39] propusieron un método de reponderación que adapta iterativamente los pesos de las muestras de entrenamiento con un modelo fundamentado teóricamente para mitigar el equilibrio entre sesgo y precisión. En [40], Chakraborty et al. propuso FairSMOTE como un método para sobremuestrear puntos de entrenamiento de grupos minoritarios con puntos de datos artificiales basados en la Técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas (SMOTE) [18], para lograr distribuciones de clases equilibradas. Además, Yan et al. [41] propusieron sobremuestrear los datos de entrenamiento de los grupos minoritarios con puntos de datos artificiales para lograr una distribución equilibrada de clase

Machine Translated by Google

ciones. A diferencia de FairSMOTE, los autores se centraron en escenarios en los que se desconocen los atributos protegidos y aplicaron un método de agrupación para identificar diferentes grupos demográficos.

El procesamiento interno implica métodos que modifican la forma en que se entrena un modelo de ML como medio para reducir el sesgo. En [42], se propuso un enfoque contradictorio para eliminar el sesgo. Este enfoque aprende un clasificador para aumentar la precisión y la equidad en la predicción al incluir una variable para el grupo interesado al aprender simultáneamente un predictor y un adversario. Esto conduce a la generación de un clasificador imparcial porque las predicciones no contienen ninguna información de discriminación grupal que el adversario pueda utilizar. Alternativamente, en [43] se propuso un algoritmo que toma una métrica de equidad como parte de la función de pérdida y devuelve un modelo entrenado para esa métrica de equidad . Kamishima et al. [22] propusieron un método de regularización, que incluía un término de penalización en la función de pérdida de un clasificador para producir una predicción insesgada. Zafar et al. [44] desarrollaron un nuevo método de ponderación mediante el cual ajustan el peso de la muestra para cada dato de entrenamiento para lograr un objetivo de equidad específico, como probabilidades igualadas en los datos de validación. Recientemente, la mitigación de sesgos se ha abordado como un problema de optimización restringida agregando una restricción de equidad y optimizando la pérdida para que sea consistente con esa restricción [45,46]. Además, algunos trabajos modifican las redes neuronales mediante el uso de abandono para eliminar neuronas que pertenecen a atributos prot

Los métodos de posprocesamiento mitigan el sesgo después de ajustar un modelo de ML e incluyen enfoques como calibración, optimización de restricciones y umbrales de transformación [6]. Dichos métodos proponen un algoritmo que proporciona resultados favorables a los grupos desfavorecidos y resultados desfavorables a los grupos favorables dentro de un intervalo de confianza determinado alrededor del límite de decisión con la mayor incertidumbre. Por ejemplo, un enfoque modifica los umbrales máximos del clasificador para producir un objetivo específico de igualdad de oportunidades o de probabilidades igualadas. Otro enfoque más implica mutar aleatoriamente las clases de ciertas predicciones en clases diferentes [48].

Varios estudios nuevos [49,50] combinaron preprocesamiento, procesamiento interno o posprocesamiento para formar un método conjunto. Por ejemplo, Bhaskaruni et al. [50] combinan el sobremuestreo de la clase protegida por desequilibrio con un límite de decisión que cambia un método de posprocesamiento para abordar el problema de la injusticia.

Los investigadores han profundizado en varios conceptos de discriminación y equidad dentro de la toma de decisiones algorítmica. El impacto dispar (anteriormente denominado equidad indirecta), por ejemplo, se mide a través de la paridad estadística y la equidad grupal, como lo analizan Bhaskaruni et al. [50]. Por otro lado, el concepto de justicia individual, también introducido por Bhaskaruni et al., enfatiza que individuos similares deben ser tratados de manera similar, independientemente de su afiliación grupal. Este enfoque se centra en la equidad a nivel individual , asegurando que las decisiones se tomen basándose en atributos relevantes en lugar de estereotipos o prejuicios grupales .

En clasificadores y otros modelos predictivos, lograr tasas de error iguales entre diferentes grupos es un objetivo clave, como destacan Zhang y Neill [16]. De manera similar, asegurar la calibración o la ausencia de sesgo predictivo en las predicciones, como discuten Hardt et al. [21], es crucial. Sin embargo, Dwork et al. exploran la tensión entre estas nociones (calibración y tasas de error iguales) . [51] y Pleiss et al. [52], lo que indica que satisfacer ambos simultáneamente puede ser un desafío. Karimi-Haghighi y Castillo [53] presentan trabajos relacionados que exploran las complejidades inherentes a lograr la equidad algorítmica. Friedler et al. [54] examina más a fondo las ventajas y desventajas de cumplir con varias definiciones de equidad algorítmica, especialmente desde una perspectiva de seguridad pública. Dado que nuestro trabajo se centra en el preprocesamiento en lugar del modelado, consideraciones como las tasas de error equilibradas y el sesgo predictivo se vuelven menos directamente aplicables.

Según nuestra revisión de varios métodos de preprocesamiento, parece que no se ha realizado ningún trabajo que intente modelar la equidad para dos o más atributos protegidos simultáneamente. Además, el método de muestreo utilizado en trabajos anteriores se centró únicamente en el muestreo basado en etiquetas de clase en lugar de en las categorías protegidas. Por lo tanto, en este artículo se enfatiza el preprocesamiento, ya que representa el aspecto más adaptable del proceso de ciencia de datos [55]. El preprocesamiento se distingue porque no depende de la elección del algoritmo de modelado y puede realizarse sin proble

Machine Translated by Google

incorporados con mecanismos de divulgación y publicación de datos. Esta independencia y flexibilidad hacen que el preprocesamiento sea fundamental para garantizar la calidad y la equidad de los datos antes de que se produzca cualquier modelado analítico o predictivo. Finalmente, nos centramos en nuevos métodos de muestreo personalizados que muestrean la categoría protegida en el entrenamiento de datos para construir un modelo justo.

4. Metodología El

objetivo de nuestro trabajo es explorar métodos de muestreo para mejorar la equidad en ML sin que el rendimiento de predicción correspondiente se vea afectado, mitigando así el equilibrio entre equidad y desempeño . Como resultado, se proponen cuatro métodos de muestreo novedosos enfocados a lograr este objetivo. Estos métodos de muestreo abordan el problema de desequilibrio de clases que plantea la nueva multicategoría generada debido a la combinación de las categorías protegidas. Se necesitan métodos de muestreo personalizados porque los métodos existentes muestrean datos basándose en clases minoritarias y mayoritarias, pero para mitigar la equidad, las nuevas multicategorías se muestrean para que sean iguales. Esto, a su vez, exige modificar los métodos de muestreo existentes para muestrear datos basados en estas nuevas categorías. Esto conduce a cuatro nuevos métodos de muestreo: sobremuestreo de categoría protegida, muestreo proporcional de categoría protegida, SMOTE de categoría protegida (PC- SMOTE) y ADASYN de categoría protegida (PC-ADASYN).

4.1. Sobremuestreo de categorías

protegidas En el sobremuestreo de categorías protegidas, el primer paso es combinar las categorías protegidas en el conjunto de datos y codificar la combinación para producir nuestra nueva multicategoría. Por ejemplo, en el conjunto de datos de Ingresos de Adultos, la edad (joven y adulto), la raza (blanca y otros) y el sexo (masculino y femenino) se combinan para generar ocho nuevas categorías, que se convierten en ADULTOWHITEMALE, ADULTOTHERSMALE, YOUNGWHITEMALE, YOUNGOTHERSMAIL, ADULTWHITEFEMALE, MUJER ADULTA, MUJER BLANCA JOVEN y MUJER OTRA JOVEN, respectivamente. Estas nuevas categorías tienen diferentes tamaños de muestra, y el objetivo de nuestro sobremuestreo de categoría protegida es equilibrar esta nueva categoría de modo que el tamaño de muestra de cada una de las nuevas categorías coincida con el tamaño de la categoría con el tamaño de muestra más alto. Para evitar la fuga de datos, el conjunto de datos se separa en tren y prueba, aplicando sobremuestreo solo en los datos de entrenamiento y luego probando en un conjunto de prueba sin muestrear.

El pseudocódigo del Algoritmo 1 muestra en detalle nuestro método de sobremuestreo de categoría protegida. En el algoritmo, se utilizó la categoría más grande como línea de base porque es la categoría con el tamaño de muestra más alto. El proceso de muestreo da como resultado nuevos datos de entrenamiento con un tamaño de muestra equilibrado en toda la nueva categoría. El algoritmo funciona muestreando el resto de las categorías protegidas para que coincidan con el tamaño de muestra de la línea de base. Este muestreo se realiza repitiendo las categorías varias veces junto con sus etiquetas de clase.

4.2. Muestreo proporcional de categoría protegida

El método de muestreo proporcional de categoría protegida es una generalización del sobremuestreo de categoría protegida porque el proceso comienza estableciendo un tamaño de muestra objetivo (que es un hiperparámetro que se debe ajustar, en lugar de solo el tamaño de la multicategoría más grande), denominado targetSamples. Esto corresponde al número deseado de instancias necesarias para cada categoría. Este objetivo garantiza la uniformidad en todas las categorías, mitigando el riesgo de sesgo del modelo hacia categorías más frecuentes. El resultado típico de aplicar este método es que algunas categorías que tienen más muestras que las muestras objetivo se submuestrearán mientras que otras se sobremuestrearán para producir una proporción igual de ellas en el conjunto de datos de entrenamiento. El pseudocódigo del Algoritmo 2 muestra el paso a paso del método de muestreo proporcional de categoría protegida.

Machine Translated by Google

Algoritmo 1 Sobremuestreo de categoría protegida

```
baselineCount ← suma de entradas en 'Largest_Category' de Xtrain
totalCount ← número de entradas en Xtrain
proporción de línea de base ← recuento de línea de base/recuento total
balanceadoData ← inicializar un conjunto de datos vacío
categorías ← lista de nombres de columnas en Xtrain que comienzan con 'combined_category_'
para cada categoría en categorías hacer
    categoríaDatos ← seleccionar entradas en Xtrain donde categoría = 1
    CategoryData ← combina CategoryData con las etiquetas correspondientes de ytrain
    CategoryCount ← número de entradas en CategoryData
    targetCount ← parte entera de totalCount × baselineProportion
    si categoríaCount < targetCount entonces
        sampledData ← muestra targetCount de categoríaData con reemplazo
        balanceedData ← agregar sampledData a balanceData
    demás
        balanceData ← agregar categoríaData a balanceData
terminar si
fin para
devolver datos equilibrados
```

Algoritmo 2 Muestreo proporcional de categoría protegida

```
muestras objetivo ← 5000
sampledBalanced ← inicializa un conjunto de datos vacío
para cada columna en new_categories.columns haga
    CategoryRows ← seleccionar filas en new_categories donde columna = 1
sampledRows ← muestra targetSamples entradas de categoríaFilas con reemplazo
    para cada columna en oneHotEncodedBalanced.columns
        filas muestreadas[col] ← 0
fin para
    filas muestreadas[columna] ← 1
    sampledBalanced ← agregar sampledRows a sampledBalanced
fin de
retorno muestreadoEquilibrado
```

4.3. SMOTE de categoría protegida

La técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas de categoría protegida (PC-SMOTE) El método de muestreo es un proceso más complejo destinado a imitar SMOTE pero modificado para muestreando nuestras nuevas categorías, en lugar de etiquetas de clases. En este enfoque, el primer paso fue modificar SMOTE para utilizar un número fijo de vecinos y seleccionar aleatoriamente un vecino para la interpolación en lugar de promediarlos todos. El pseudocódigo del algoritmo 3 muestra el procedimiento para el PC-SMOTE. Dado que la intención del método es utilizarlo para el nuevo muestreo de categorías, no aborda la generación de etiquetas de clase directamente. De ahí que una nueva Se necesita una función que pueda generar una nueva etiqueta de clase para los datos sintéticos. Para ello, un nuevo Se define una función que genera etiquetas de clase en función del número de nuevos datos sintéticos. generado y un ratio de equilibrio preseleccionado entre las dos clases. El algoritmo 4 muestra cómo nuestra nueva función genera etiquetas para nuestras muestras sintéticas. El algoritmo primero determina el número de muestras para cada clase en función del índice de equilibrio y genera la muestra necesario para cada clase. Las etiquetas de clase se barajan para evitar sesgos algorítmicos en el clases generadas.

Estos dos algoritmos se combinan para formar PC-SMOTE, como se muestra en el Algoritmo 5. En el enfoque para lograr el equilibrio multicategoría, cada categoría distinta se repite de manera que se identifique el subconjunto de datos asociados con esa categoría. El número El número de muestras sintéticas necesarias para alcanzar un tamaño máximo predefinido por categoría es entonces calculado. Si se requieren muestras adicionales, los datos se generan usando PC-SMOTE,

Machine Translated by Google

que interpola entre los puntos de datos existentes y sus vecinos más cercanos. Al mismo tiempo, Se crea una distribución equilibrada de etiquetas de clases sintéticas con una relación de equilibrio específica mediante empleando el algoritmo 4. Estas características y etiquetas sintéticas luego se incorporan al subconjunto de entrenamiento para cada categoría. El proceso se repite para todas las categorías, lo que da como resultado una conjunto de datos equilibrado. Los hiperparámetros en este Algoritmo 5 son el número de vecinos. y relación de equilibrio.

Algoritmo 3 Técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas personalizadas (SMOTE)

```
procedimiento CUSTOMSMOTE(datos, n_muestras)
    SyntheticSamples ← matriz cero de tamaño (n_samples× número de columnas en datos)
    nn ← Vecinos más cercanos(n_vecinos = 7).fit(datos)
    vecinos ← nn.kneighbors(datos, distancia_retorno = Falso)
    para i ← 1 a n_muestras hacer
        sampleIdx ← entero aleatorio de 0 a (número de filas en los datos − 1)
        nnIdx ← elección aleatoria de vecinos[sampleIdx, 1 :]
        di ff ← datos[nnIdx] − datos[muestraIdx]
        peso ← número aleatorio de distribución uniforme entre 0 y 1
        muestras sintéticas [i] ← datos [sampleIdx] + peso × di ff
fin para
    devolver muestras sintéticas
finalizar el procedimiento
```

Algoritmo 4 Generar etiquetas sintéticas equilibradas

```
procedimiento GENBALSYNTHLABELS(n_samplesNeeded, balanceRatio)
    nClass1 ← int(n_samplesNeeded × balanceRatio)
    nClass0 ← n_samplesNeeded − nClass1
    etiquetas sintéticas ← [0] × nClass0 + [1] × nClass1
    SHUFFLE(etiquetassintéticas)                    Mezcla aleatoriamente las etiquetas
    devuelve etiquetas sintéticas
finalizar el procedimiento
```

Algoritmo 5 SMOTE de categoría protegida

```
balanceDataList ← inicializar una lista vacía
para cada categoría en categorías hacer
    categoríaSubconjunto ← seleccionar filas en train_data st 'combined_category' == categoría
    Características ← eliminar 'clase', 'categoría_combinada' de categoríaSubconjunto
    nSamples ← max_size- número de filas en categoríaSubconjunto
    si nMuestras > 0 entonces
        SyntheticFeatures ← PCSmote( características, nSamples)
        SyntheticLabels ← GenBalSynthLabels(nSamples, balanceRatio)
        características sintéticas[′ clase′ ] ← etiquetas sintéticas
        características sintéticas[′ categoría_combinada′ ] ← categoría
        categoríaSubconjuntoBalanceado ← concatenar categoríaSubconjunto y características sintéticas
    demás
        categoríaSubconjuntoEquilibrado ← categoríaSubconjunto
terminar si
agregar categoríaSubconjuntoEquilibrado a lista de datos equilibrada
fin para
balanceedData ← agregar balanceDataList y restablecer el índice
```

4.4. ADASYN de categoría protegida

El método ADASYN de categoría protegida imita la minoría sintética adaptativa (ADASYN) muestreo, pero se modifica ligeramente para cumplir con nuestro objetivo de muestreo de categoría protegida. Nuestro algoritmo PC-ADASYN se muestra en el Algoritmo 6. Amplía ADASYN centrándose en la categoría

Machine Translated by Google

densidad más que desequilibrio de clases. Específicamente, esta función opera encontrando el punto más cercano vecinos de los datos y luego calcular la densidad de la categoría de cada punto de datos dentro de su vecindad inmediata. Pondera estas densidades de manera inversa para priorizar las categorías minoritarias, lo que hace que sea más probable que genere muestras sintéticas de categorías subrepresentadas. El Las muestras sintéticas se crean interpolando entre puntos de datos seleccionados y sus vecinos. similar a SMOTE pero usando un peso aleatorio para variar la interpolación, asegurando así una conjunto de datos sintéticos diversos. Este enfoque ayuda a abordar el desequilibrio a nivel de categoría y Enriquece la varianza del conjunto de datos, mejorando potencialmente la solidez y la equidad de los modelos de ML. entrenados con estos datos. Dado que este método de muestreo también genera nuevas muestras mediante interpolación, El algoritmo 4 se utiliza para generar etiquetas de clase para las nuevas muestras sintéticas.

Algoritmo 6 PC-ADASYN para equilibrio basado en categorías

```
procedimiento PCADASYNCATEGORIES(datos, etiquetas, n_samplesNeeded, n_neighbors)
    n_vecinos ← n_vecinos + 1 nn ← Incluyendo el punto de datos en sí
Vecinos más cercanos(n_vecinos).fit(datos)
    distancias, índices ← nn.vecinos(datos)
    densidades ← cero matriz de longitud (datos)
    para i ← 0 a longitud (datos) − 1 hacer
        categoría_actual ← etiquetas[i]
        índices_vecinos ← índices[i][1 :] Saltar el autoíndice
        densidades[i] ← SUMA(etiquetas[índices_vecinos] == categoría_actual)
fin para
    pesos ← 1/(densidades + 1) pesos Suma 1 para evitar la división por cero
    ← pesos/SUM(pesos) muestras sintéticas Normalizar pesos
    ← lista vacía
    sampleIndices ← elección aleatoria con reemplazo de longitud (datos) usando pesos
    para cada idx en sampleIndices, haga
        baseIdx ← idx
        vecino Idx ← RANDOMCHOICE(índices[baseIdx][1 :])
        di ff ← datos[vecino Idx] − datos[baseIdx]
        muestra sintética ← datos[baseIdx] + RANDOM() × di ff
        agregar muestra sintética a muestras sintéticas
fin para
    matriz de retorno (muestras sintéticas)
finalizar el procedimiento
```

Los algoritmos 4 y 6 se combinan para formar nuestro muestreo ADASYN de categoría protegida, como se muestra en el Algoritmo 7. Para cada categoría, los datos correspondientes a esa categoría son se aísla y se calcula el déficit de tamaño en relación con la categoría más grande. Si es adicional Si se necesitan muestras, se aplica el método PC-ADASYN, generando características sintéticas que respetar las características de distribución de la categoría. Estas características luego se complementan con etiquetas generadas sintéticamente, manteniendo un ratio de equilibrio de clases predefinido. El El proceso no solo corrige los desequilibrios de categorías sino que también enriquece el conjunto de datos, lo que potencialmente mejorar la precisión predictiva y la equidad de los modelos entrenados con estos datos.

4.5. Ajuste de conjuntos de datos e hiperparámetros

Para probar los cuatro métodos de muestreo, se necesitaba un clasificador para evaluar los efectos sobre equidad y desempeño. En última instancia, el tipo de clasificador no es directamente relevante ya que el El objetivo es mitigar el equilibrio entre equidad y desempeño, en lugar de encontrar el mejor clasificador. Por lo tanto, optamos por utilizar árboles de decisión univariados basados en CART [56] debido a su Robustez contra el ruido y los datos faltantes. La implementación específica que elegimos fue tomado de la biblioteca sklearn (versión 1.5.1) [57]. Además, los árboles de decisión nos permiten controle la fuerza del ajuste estableciendo la profundidad del árbol aprendido. Esto nos permite comparar la equidad y el rendimiento en diferentes niveles de adaptación.

Machine Translated by Google

El proceso comienza combinando categorías protegidas dentro de cada conjunto de datos, aplicando codificación one-hot para crear nuevas características multicategoría y luego realizando la codificación de etiquetas. Luego, los conjuntos de datos se dividieron utilizando una validación cruzada estratificada de 10 veces para garantizar una distribución representativa de las clases en cada pliegue. Para cada pliegue, el entrenamiento se realizó con datos muestreados utilizando los métodos descritos anteriormente, mientras que la clasificación se probó en los correspondientes conjuntos de prueba no muestreados. La coherencia en el entrenamiento del modelo se mantuvo aplicando una profundidad de árbol idéntica en todos los métodos de muestreo, y los resultados proporcionados son promedios de las ejecuciones de 10 veces con sus correspondientes intervalos de confianza.

Algoritmo 7 ADASYN de categoría protegida

```
lista de datos equilibrada ← inicializar una lista vacía
para cada categoría en categorías haga
    categoríaSubconjunto ← seleccione de new_data3 st 'combined_category' == características de
    categoría ← elimine 'clase', 'categoría_combinada' de categoríaSubconjunto
    categoríaEtiquetas ← extraiga 'categoría_combinada' de categoríaSubconjunto
    nSamplesNeeded ← tamaño_máximo menos número de filas en categoríaSubconjunto si
    nSamplesNeeded > 0 entonces
        SyntheticFeatures ← PCAdasyn( características, categoríaLabels, nSamplesNeeded)
        SyntheticLabels ← GenBalSynthLabels(nSamplesNeeded, balanceRatio)
        SyntheticFeatures[ ' clase' ] ← SyntheticLabels
        SyntheticFeatures[ ' ' ] ← categoría categoríaSubconjuntoEquilibrado
        ← concatenar categoríaSubconjunto con características sintéticas de lo contrario

    categoríaSubconjuntoEquilibrado ← categoríaSubconjunto
finalizar si
agregar categoríaSubconjuntoEquilibrado a lista de datos equilibrada
finalizar
para datos equilibrados ← concatenar lista de datos equilibrada y restablecer índice
```

Se seleccionaron tres conjuntos de datos del repositorio de la UCI [58] para nuestro análisis: el conjunto de datos de Ingresos de Adultos [59], el conjunto de datos de Crédito Alemán [60] y el conjunto de datos de Perfiles de Gestión de Delincuentes Correccionales para Sanciones Alternativas (COMPAS). El conjunto de datos Adult Income tiene como objetivo predecir si un individuo gana más de 50.000 dólares, presentando ocho atributos categóricos y cuatro numéricos, con variables protegidas correspondientes a la edad (joven o adulto), sexo (masculino o femenino) y raza (blanca u otros). El conjunto de datos sobre ingresos de adultos fue donado a UCI en 1996. El conjunto de datos de crédito alemán, utilizado para predecir la solvencia, comprende 20 atributos categóricos y dos numéricos, con variables protegidas de edad y sexo. El conjunto de datos crediticios alemán fue donado a la UCI en 1994. El conjunto de datos COMPAS [61], que evalúa las tasas de reincidencia en los Estados Unidos, incluye seis características categóricas y seis numéricas, con variables protegidas de edad, raza y sexo. El conjunto de datos se publicó en 2018. Estos conjuntos de datos se seleccionaron porque representan conjuntos de datos de última generación para medir el sesgo y la discriminación y se utilizan ampliamente en otros estudios sobre el sesgo y la equidad algorítmicos (consulte la Sección 3). Además, los conjuntos de datos tienen varios tamaños, desde pequeños hasta grandes, lo que los hace adecuados para probar nuestros métodos de muestreo.

El ajuste de hiperparámetros se realizó mediante búsqueda en cuadrícula [62] para explorar una amplia gama de parámetros, complementados con evaluaciones visuales para identificar configuraciones óptimas que equilibren la diferencia de probabilidades igualadas (EOD) y la precisión. Para el conjunto de datos de Adult Income, los hiperparámetros óptimos incluían una profundidad máxima de árbol de 3 y, para PC-SMOTE y PC-ADASYN, una configuración de vecino más cercano de 5 con una proporción equilibrada de 0,34. Estos parámetros fueron igualmente efectivos para el conjunto de datos de crédito alemán. Para el conjunto de datos COMPAS, una profundidad máxima de árbol de 2 fue óptima para todos los métodos de muestreo. PC-SMOTE y PC-ADASYN se ajustaron a la configuración del vecino más cercano de 3 y una relación equilibrada de 0,60.

Machine Translated by Google

5. Resultados

Las cuatro estrategias de muestreo se aplicaron a los tres conjuntos de datos descritos anteriormente y evaluaron su impacto utilizando un clasificador de árbol de decisión univariado simple. Los resultados en Las tablas 1 a 3 muestran diferencias notables en el desempeño del modelo en cinco estrategias de muestreo: sin muestreo, sobremuestreo, muestreo proporcional, PC-SMOTE y PC-ADASYN en nuestros tres conjuntos de datos. Cada método se evaluó en función de la precisión, macro F1, ecualizado Diferencia de probabilidades (EOD) y paridad estadística (SP). Los resultados se midieron con precisión. y macro F1 porque estas dos métricas son las métricas de clasificación más populares. También, limitar la métrica a dos hace que los resultados sean comparables para el análisis estadístico.

Para determinar la significación estadística de los resultados de cada método, utilizamos el método de Friedman. prueba, una alternativa no paramétrica al ANOVA unidireccional con medidas repetidas. Al Al encontrar resultados significativos de la prueba de Friedman, procedimos con la prueba post hoc de Nemenyi. prueba. Esta prueba se utiliza para evaluar comparaciones por pares entre los métodos para determinar qué métodos difieren estadísticamente entre sí. La prueba de Nemenyi es ventajosa en esta configuración porque tiene en cuenta múltiples comparaciones sin asumir normal distribuciones, proporcionando así una forma sólida de comprender diferencias específicas por pares.

Para el conjunto de datos sobre ingresos de adultos (Tabla 1), el método sin muestreo arrojó una precisión de 0,82, lo que establece una base de referencia alta para la comparación. Sin embargo, demostró una actitud ligeramente sesgada. predicción con una EOD de 0,36 y una disparidad mínima en las tasas de predicción (SP = 0,02). En Por el contrario, el sobremuestreo mantuvo la misma precisión pero redujo ligeramente la macro F1 a 0,65, lo que indica posibles problemas de sobreajuste y empeora la equidad (EOD = 0,66) y disparidad creciente en las tasas de predicción (SP = 0,09). Disminución del muestreo proporcional precisión a 0,79 pero mejoró la macro F1 a 0,79, lo que sugiere un mejor equilibrio entre precisión y recuperación. Sin embargo, aumentó significativamente el SP a 0,71, lo que indica una sustancial disparidad en las tasas de predicción positiva, lo que genera preocupaciones sobre la equidad del modelo. El Se diseñaron dos enfoques personalizados para SMOTE y ADASYN específicamente para mejorar sobre estas métricas. PC-SMOTE mostró un rendimiento moderado con una precisión de 0,81 y una EOD mejorada de 0,25, lo que sugiere una mayor equidad con respecto al sobremuestreo básico y el método sin muestreo. Sin embargo, aún registró una macro F1 más baja (0,63), lo que indica Problemas de tergiversación en la generación de datos sintéticos. PC-ADASYN demostró ser el enfoque más equilibrado, manteniendo una alta precisión (0,82) y un mejor manejo de la clase desequilibrios, con una mejora moderada en la equidad (EOD = 0,28) y una controlada aumento en la disparidad de la tasa de predicción (SP = 0,09). En general, la precisión inicial es estadísticamente significativamente mejor que el muestreo proporcional, aunque no es estadísticamente significativo como en comparación con los otros métodos de muestreo. Para la macro F1 el muestreo proporcional es estadísticamente significativamente mejor que otros métodos de muestreo. Para el EOD, PC-ADASYN es estadísticamente mejor que otros métodos de muestreo, mientras que el método sin muestreo SP es estadísticamente significativamente mejor que otros métodos de muestreo.

Tabla 1. Resultados de los métodos de muestreo en el conjunto de datos de Ingreso de Adultos con intervalos de confianza del 95%.

Muestreo Método	Exactitud	macrof1	EOD	SP
Sin muestreo	0,82 ± 0,00	0,66 ± 0,01	0,36 ± 0,18	0,02 ± 0,00
Sobremuestra	0,82 ± 0,02	0,65 ± 0,06	0,66 ± 0,2	0,09 ± 0,02
Prop. Muestra	0,79 ± 0,05	0,79 ± 0,06	0,46 ± 0,12	0,71 ± 0,10
PC-SMOTE	0,81 ± 0,05	0,63 ± 0,07	0,25 ± 0,21	0,07 ± 0,00
PC-ADASYN	0,82 ± 0,04	0,64 ± 0,07	0,28 ± 0,19	0,09 ± 0,02

Los resultados de los experimentos con el conjunto de datos de crédito alemán también muestran impactos variables. de cada estrategia de muestreo, particularmente en lo que respecta a la equidad y precisión, como se muestra en la Tabla 2. Sin muestreo, el modelo de referencia logró una precisión de 0,72 pero mostró resultados significativos. sesgo en su predicción, con una EOD de 0,88, lo que indica una disparidad sustancial en el error tarifas entre grupos en los atributos protegidos. Implementación de sobremuestreo mantenido precisión al tiempo que mejora la macro F1 a 0,68 y reduce notablemente el EOD a 0,37, aunque a

Machine Translated by Google

el costo de aumentar el SP a 0,35, lo que destaca una posible compensación entre diferentes equidades medidas. El muestreo proporcional redujo ligeramente la precisión a 0,68, pero logró la mejor Puntuación F1 de 0,69. También redujo la EOD a 0,32, lo que sugiere que equilibra efectivamente la predicción. calidad con equidad. PC-SMOTE muestra una mejora en la precisión con 0,73 pero una menor macro F1 de 0,55; La equidad del modelo muestra una gran mejora con respecto a la línea de base con un EOD de 0,15 y un SP moderado de 0,1. PC-ADASYN muestra una precisión similar a la línea de base en 0,72, aunque con el F1 macro más bajo de 0,48, lo que sugiere una posible compensación en precisión y recuperación. Sin embargo, el modelo exhibe la mejor predicción de equidad con un EOD de 0,13 y SP de 0,06. En general, el resultado muestra que la precisión de la ausencia de muestreo no es estadísticamente significativo para otros métodos de muestreo excepto los muestreos proporcionales mientras que para el EOD los resultados de todos los métodos de muestreo son estadísticamente significativos en comparación con el método sin muestreo.

Tabla 2. Resultados de los métodos de muestreo en el conjunto de datos de crédito alemán con intervalos de confianza del 95%.

Muestreo Método	Exactitud	macrof1	EOD	SP
Sin muestreo	0,72 ± 0,03	0,62 ± 0,06	0,88 ± 0,10	0,07 ± 0,01
Sobremuestra	0,72 ± 0,05	0,68 ± 0,04	0,37 ± 0,16	0,35 ± 0,11
Prop. Muestra	0,69 ± 0,04	0,69 ± 0,07	0,32 ± 0,26	0,29 ± 0,10
PC-SMOTE	0,73 ± 0,05	0,55 ± 0,09	0,15 ± 0,09	0,1 ± 0,02
PC-ADASYN	0,72 ± 0,03	0,48 ± 0,11	0,13 ± 0,02	0,06 ± 0,00

La Tabla 3 muestra los resultados de nuestra experiencia con el conjunto de datos COMPAS. Estos resultados revelan variaciones significativas en el rendimiento del modelo entre las diferentes estrategias de muestreo. El enfoque de referencia, sin muestreo, logró precisión y una puntuación macro F1 de 0,89 pero mostró mayores disparidades en las métricas de equidad, con una diferencia de probabilidades igualada (EOD) de 0,39 y una Paridad Estadística (SP) de 0,29. Esto subraya los posibles sesgos que Los modelos no ajustados pueden exhibirse hacia grupos protegidos. La aplicación del sobremuestreo Precisión ligeramente mejorada a 0,90, pero también mejoró notablemente la equidad, disminuyendo la EOD a 0,26. Esto sugiere efectividad para reducir las disparidades de resultados sin comprometer SP. Por el contrario, el muestreo proporcional, al tiempo que aumenta la precisión y la macro F1 a 0,90 y 0,91, respectivamente, también lograron un EOD de 0,26, mejorándolo con respecto a la línea de base, mientras que También registró un SP más alto de 0,36, lo que indica un aumento potencial en la disparidad de resultados positivos. resultados entre grupos. PC-SMOTE y PC-ADASYN, con puntuaciones idénticas en precisión, macro F1 y SP lograron mantener mejoras de equidad con un EOD de 0,30, aunque estos métodos también aumentaron el SP a 0,47. En general, los resultados muestran que tanto el La precisión y la EOD de nuestros métodos de muestreo son estadísticamente significativamente mejores que el método sin muestreo.

Tabla 3. Resultados de los métodos de muestreo en el conjunto de datos COMPAS con intervalos de confianza del 95%.

Muestreo Método	Exactitud	macrof1	EOD	SP
Sin muestreo	0,89 ± 0,04	0,89 ± 0,04	0,39 ± 0,15	0,29 ± 0,17
Sobremuestra	0,90 ± 0,03	0,90 ± 0,05	0,26 ± 0,14	0,25 ± 0,07
Prop. Muestra	0,90 ± 0,05	0,91 ± 0,04	0,26 ± 0,12	0,36 ± 0,10
PC-SMOTE	0,91 ± 0,02	0,91 ± 0,02	0,30 ± 0,11	0,47 ± 0,19
PC-ADASYN	0,91 ± 0,02	0,91 ± 0,03	0,30 ± 0,13	0,47 ± 0,21

6. Discusión

Los resultados de los experimentos en los tres conjuntos de datos corroboran esa categoría protegida. El muestreo puede mejorar notablemente la equidad del modelo, a menudo sin comprometer significativamente la precisión de la predicción. En algunos casos, también se mejoraron la precisión y la macro F1. demostrado. Centrándose en los resultados del conjunto de datos de ingresos de adultos, PC-SMOTE y PC-ADASYN

Machine Translated by Google

demostró mejoras notables en EOD y mantuvo niveles moderados de SP. La eficacia de estos métodos puede atribuirse en gran medida a sus sofisticadas técnicas de interpolación. Por ejemplo, un examen visual de los árboles de decisión generados sin muestreo y PC-ADASYN proporciona contrastes reveladores. En las Figuras 1 y 2, respectivamente, se muestran ejemplos de un único pliegue representativo . El árbol de decisión aprendido sin muestreo seleccionó su raíz con una característica estrechamente asociada con atributos protegidos, actuando así como un atributo proxy. Esto dio lugar a un pronunciado sesgo de predicción, como se refle Por el contrario, el árbol de decisión entrenado con datos generados usando PC-ADASYN comenzó con una característica que generalizaba muy bien las predicciones y mitigaba el sesgo, como lo demuestra una mejora notable en la equidad del modelo y una mayor impureza de Gini, lo que indica una división inicial más pura.

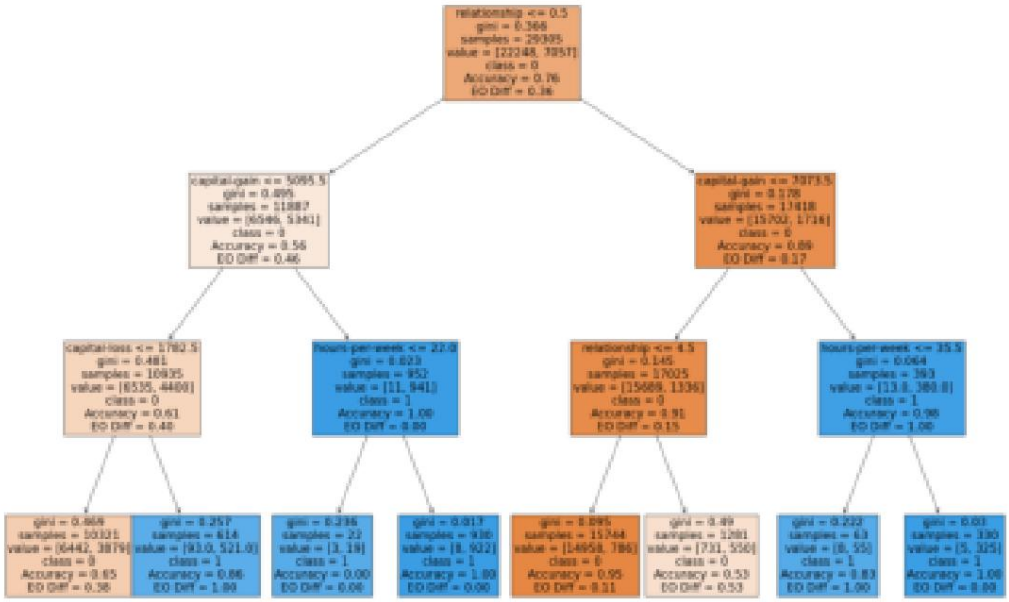


Figura 1. Ejemplo de árbol de decisión entrenado en Ingresos de Adultos sin muestreo.

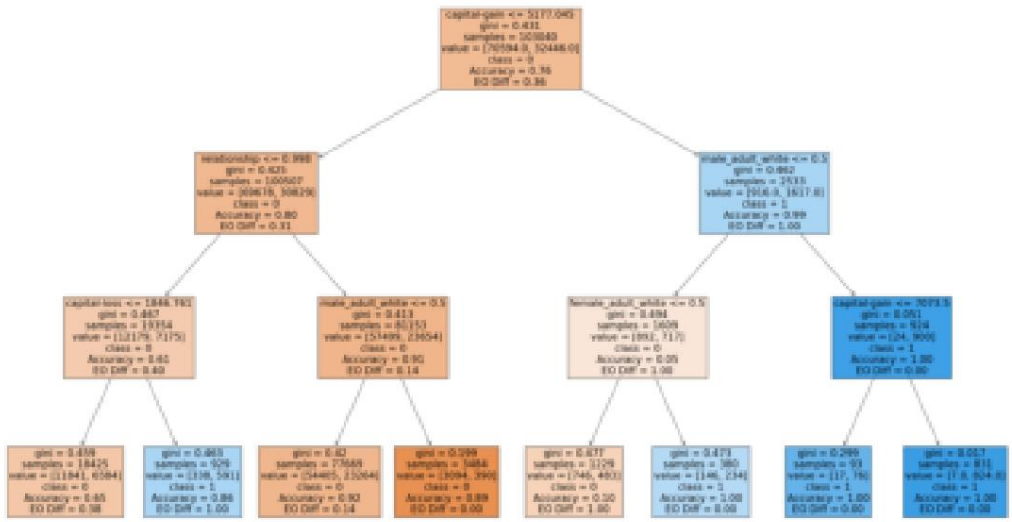


Figura 2. Árbol de decisiones de PC-ADASYN sobre ingresos de adultos.

Machine Translated by Google

6.1. Comparación de equidad versus desempeño

Al comparar el sobremuestreo y el muestreo proporcional, los enfoques de los métodos para aumentar el tamaño de la muestra mediante la duplicación de filas de datos existentes fueron sencillos y no produjeron mejoras sustanciales en la EOD. Este resultado tiene sentido ya que estos métodos tienden a replicar sesgos existentes, lo que potencialmente puede exacerbar los problemas de equidad en lugar de aliviarlos. Esto es evidente, en particular, cuando se considera el conjunto de datos sobre ingresos de adultos, donde las clases están extremadamente desequilibradas. Estas ingenuas estrategias de replicación carecen de la capacidad de interpolación de PC-SMOTE y PC-ADASYN para ajustar muestras cerca de los límites de decisión, lo cual es crucial para mitigar el sesgo en el conjunto de datos. Por el contrario, las estrategias de interpolación utilizadas por SMOTE y ADASYN amplían el conjunto de datos y mejoran su diversidad. Esto es particularmente efectivo para muestras cercanas a los límites de decisión, donde ligeros cambios en las características pueden afectar significativamente la equidad de las predicciones. Al interpolar entre muestras, SMOTE y ADASYN mueven efectivamente estas muestras límite hacia regiones más equitativas del espacio de características, confrontando y reduciendo así directamente el sesgo de manera más efectiva que los métodos que aumentan el volumen de muestra sin alterar la estructura de datos.

La función de generación de clases (Algoritmo 4) también ayuda a aumentar la distribución general de clases. Los resultados de nuestro PC-SMOTE y PC-ADASYN sobre ingresos de adultos también muestran superioridad sobre los resultados obtenidos en [41], donde se obtuvo una precisión de 0,59 y un SP de 0,17. Además, los resultados de PC-SMOTE y PC-ADASYN muestran superioridad sobre los resultados obtenidos en [40], donde un EOD de 0,89 y una precisión ligeramente mejor de 0,84.

Al examinar los resultados del conjunto de datos de Crédito Alemán, observamos una tendencia similar a la que se observó en el conjunto de datos de Ingreso de Adultos: el método sin muestreo tiene un sesgo muy alto con respecto a la EOD. El bajo SP de 0,07 indica una disparidad mínima en las tasas de predicción positiva entre los grupos, pero esto en sí mismo no es una buena manera de medir la equidad ya que el grupo favorecido tiene más muestras que el desfavorecido. Esto tiene el efecto de sesgar el cálculo del SP, ya que sólo cuenta las decisiones positivas en cada grupo, que están influenciadas por el tamaño de la muestra. Una conclusión es la importancia de emplear múltiples métricas de equidad para ver de manera integral el impacto de un modelo en todas las partes interesadas. Para el sobremuestreo, vimos una mejora en EOD con un SP similar; esto muestra que aumentar el número de muestras para cada uno de los atributos protegidos de la multicategoría mejora la equidad con respecto a la EOD. Además, el SP actualizado refleja cómo se vería tener un número más igual de muestras para cada multicategoría, a diferencia de la línea de base donde el grupo favorecido tiene cinco veces más muestras que el grupo desfavorecido. La precisión del muestreo proporcional disminuye porque el número de referencia de muestras seleccionadas después del ajuste de hiperparámetros fue insuficiente para que el modelo generalizara el conjunto de pruebas sin muestrear, lo que provocó un sobreajuste. El sobreajuste se confirmó considerando la precisión del entrenamiento. Curiosamente, el modelo no intercambia precisión por recuperación como otros modelos, y esto le da al muestreo proporcional la macro F1 más alta.

En cuanto a la equidad, encontramos un aumento en la EOD en comparación con el valor inicial y el sobremuestreo . Esto surge porque cada multicategoría está representada en los mismos recuentos de referencia. Esto puede mejorar la equidad del modelo porque el modelo ahora tiene una imagen más amplia de las categorías y hace mejores predicciones y, en última instancia, decisiones más justas. PC-SMOTE y PC-ADASYN desempeñan un papel fundamental a la hora de reducir significativamente el sesgo en las predicciones de los m
Esta coherencia confirmó la solidez de estos métodos en diferentes conjuntos de datos. En particular , ninguno de los métodos compromete la precisión, mientras que ambos mejoran la equidad, lo que ilustra su eficacia en el manejo de las compensaciones típicamente asociadas con el modelado predictivo.

Estos resultados demuestran las sólidas capacidades de interpolación inherentes a PC-SMOTE y PC-ADASYN. Estos métodos reasignan efectivamente muestras dentro del espacio de características, especialmente moviendo aquellas en regiones desfavorecidas de límites de decisión negativos a más positivos . Estos ajustes son cruciales para mitigar los resultados sesgados y promover la equidad en los procesos automatizados de toma de decisiones. La macro F1 en ambos modelos cae en comparación con la línea de base porque se requiere una mayor cantidad de muestras para que el modelo funcione mejor en la generalización, que este conjunto de datos no admite. Específicamente, el conjunto de datos tiene 700 muestras para la clase 0 y 300 muestras para la clase 1, lo que significa que el conjunto de prueba

Machine Translated by Google

solo tiene 30 muestras para la clase 1. Esta pequeña cantidad de muestras hizo que ambos modelos cambiaran la recuperación por precisión en la clase 1. En particular, vimos una recuperación baja para la clase 1 que, en última instancia, conduce a una puntuación f1 baja para la clase 1 y desde la macro F1 promedia las dos puntuaciones f1 y las trata por igual, esto afecta el rendimiento de ambos modelos en macro F1. En general, los dos modelos arrojan un modelo más justo con buena precisión en comparación con la línea de base y otros dos métodos de muestreo.

La evaluación del conjunto de datos COMPAS valida aún más la efectividad de nuestros métodos de muestreo . Los distintos patrones que surgen se alinean con los observados en los conjuntos de datos sobre ingresos de adultos y crédito alemán, lo que subraya la solidez de nuestros hallazgos. En particular, las técnicas de sobremuestreo y muestreo proporcional han demostrado mejoras sustanciales en la diferencia de probabilidades igualadas (EOD) y la precisión, mientras que el sobremuestreo también mejora notablemente en SP. Es probable que esta mejora se deba a la composición y el equilibrio únicos dentro del conjunto de datos COMPAS, a diferencia de otros conjuntos de datos en los que las clases están desequilibradas. El éxito del sobremuestreo y del muestreo proporcional en este contexto puede atribuirse a la naturaleza equilibrada del conjunto de datos, que permite la duplicación repetida de filas existentes (técnicas de muestreo empleadas por estos métodos) para mejorar el conjunto de datos sin introducir un sesgo significativo hacia ningún particular. clase. Este método aumenta efectivamente la representación de todas las clases y los atributos protegidos en una forma equilibrada, haciendo que estas técnicas sean particularmente efectivas para conjuntos de datos donde los dominios de características contribuyen igualmente a las predicciones y donde las distribuciones de clases iniciales no sufren un desequilibrio severo . Esto se puede verificar aún más desde su macro F1, ya que ninguno de los modelos intercambia precisión por recuperación. La mejora del SP en el sobremuestreo se puede atribuir al mayor número de muestras en el sobremuestreo en comparación con el muestreo proporcional. Con respecto a PC-SMOTE y PC-ADASYN, estos algoritmos muestran una mejora con respecto a la línea de base tanto en precisión como en EOD. Estas tendencias siguen las de los resultados anteriores. Una cosa notable en esto resulta en la gran caída en SP que se puede atribuir a nuestra nueva etiqueta que se generó para hacer que el conjunto de datos esté sesgado hacia la clase negativa. Estos resultados muestran la dificultad de optimizar dos o más métricas de equidad a la vez y cómo esta optimización puede afectarse entre sí.

6.2. Impacto de la profundidad del árbol en la equidad y la precisión

En este estudio, también se investigó el impacto de la profundidad del árbol de decisión en el rendimiento del modelo , examinando específicamente cómo las variaciones en la profundidad del árbol influyen en la precisión y la EOD. Comprender el efecto de la profundidad es crucial, ya que proporciona información sobre los efectos que van desde el desajuste hasta el sobreajuste y ayuda a identificar el nivel de complejidad óptimo en el que se maximizan tanto la precisión como la equidad. Inicialmente, se permitió que el árbol de decisión creciera sin restricciones hasta su máxima profundidad, que en promedio era de unas 30 ramas. Luego se examinó visualmente el árbol para deducir la profundidad máxima excluyendo las ramas que no se partían. Para analizar sistemáticamente los efectos de la profundidad de los árboles, se permitió que la profundidad máxima de los árboles variara de 1 a 30. Cada límite de profundidad se evaluó mediante una validación cruzada diez veces para garantizar la solidez y generalización de los hallazgos.

Para cada configuración de profundidad del árbol, se midieron la precisión y la EOD en el conjunto de prueba. Además, se calcularon intervalos de confianza del 95 % para las métricas en los diez pliegues. Este análisis estadístico destacó la profundidad con la que el árbol de decisión equilibraba el equilibrio entre precisión y equidad, al mismo tiempo que consideraba el equilibrio estadístico subyacente entre sesgo y varianza. Al hacerlo, fue posible identificar el “punto óptimo”, un punto delicado en el que el árbol de decisión mantiene una alta precisión predictiva sin comprometer la equidad, contrarrestando efectivamente la compensación frecuentemente citada presentada en la literatura a

Las Figuras 3 a 7 muestran los gráficos de precisión y EOD frente a la profundidad máxima para cada uno de los cinco métodos de muestreo en el conjunto de datos de Ingresos de Adultos.

Machine Translated by Google

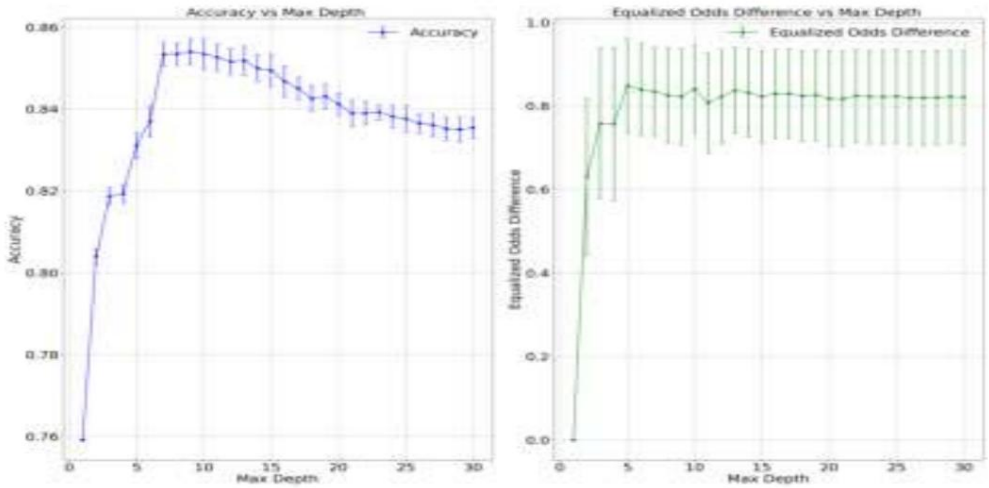


Figura 3. Gráficos de ingresos de adultos sin muestreo, que muestran precisión y EOD con intervalos de confianza del 95 % frente a la profundidad máxima del árbol que van de 1 a 30.

Según resultados como los que se muestran en las Figuras 3 y 4, hay un notable aumento inicial en la precisión a medida que aumenta la profundidad máxima tanto para el método sin muestreo como para el método con sobremuestreo. Sin embargo, ambos métodos muestran una disminución en la precisión a partir de una profundidad de 10 en adelante, lo que sugiere la aparición de un sobreajuste. En consecuencia, la EOD disminuye bruscamente al aumentar la profundidad hasta aproximadamente la profundidad 10, más allá de la cual se estabiliza. Este patrón indica que si bien los árboles más profundos inicialmente mejoran la equidad, eventualmente alcanzan un umbral más allá del cual no se observan más ganancias. Recordando que el objetivo de equidad era minimizar la EOD, una observación clave es que establecer la profundidad máxima entre tres y cinco logra un equilibrio óptimo entre lograr una alta precisión y mantener una EOD b

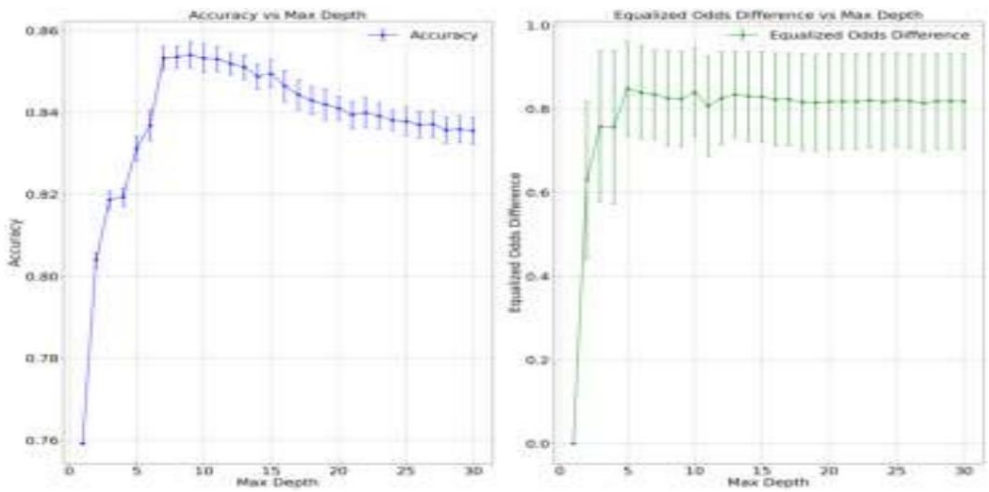


Figura 4. Gráficos de ingresos de adultos utilizando sobremuestreo, que muestran precisión y EOD con intervalos de confianza del 95 % frente a la profundidad máxima del árbol que van de 1 a 30.

Al considerar los resultados mostrados en la Figura 5, el método de muestreo proporcional aumenta continuamente la precisión con la profundidad del árbol, alcanzando un máximo a una profundidad de aproximadamente 26. Por el contrario, la EOD aumenta inicialmente antes de disminuir y estabilizarse a una profundidad de alrededor de 15. Los amplios intervalos de confianza observados en la métrica EOD sugieren una variabilidad significativa en los resultados de equidad. Este hallazgo subraya la importancia de seleccionar una profundidad que minimice la variabilidad en la equidad y al mismo tiempo maximice la precisión.

Machine Translated by Google

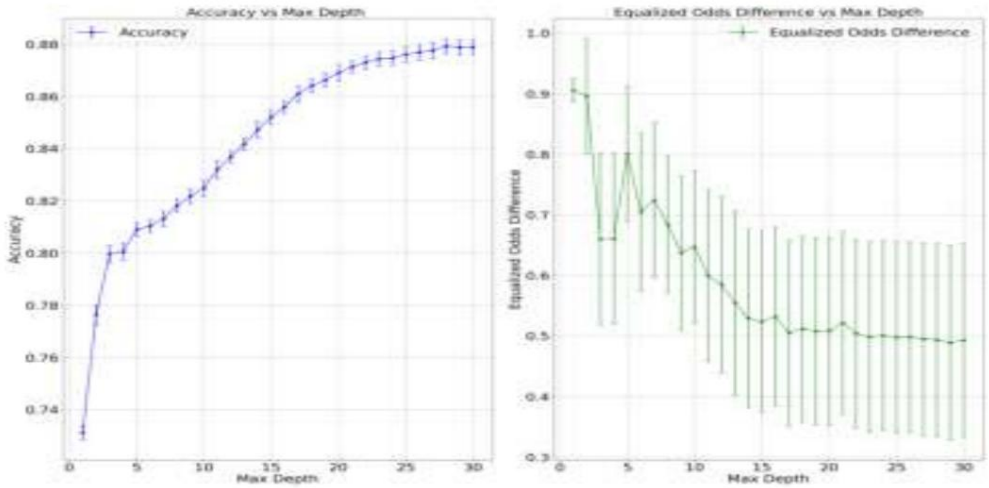


Figura 5. Gráficas de ingresos de adultos utilizando muestreo proporcional, que muestran precisión y EOD con intervalos de confianza del 95 % frente a la profundidad máxima del árbol que van de 1 a 30.

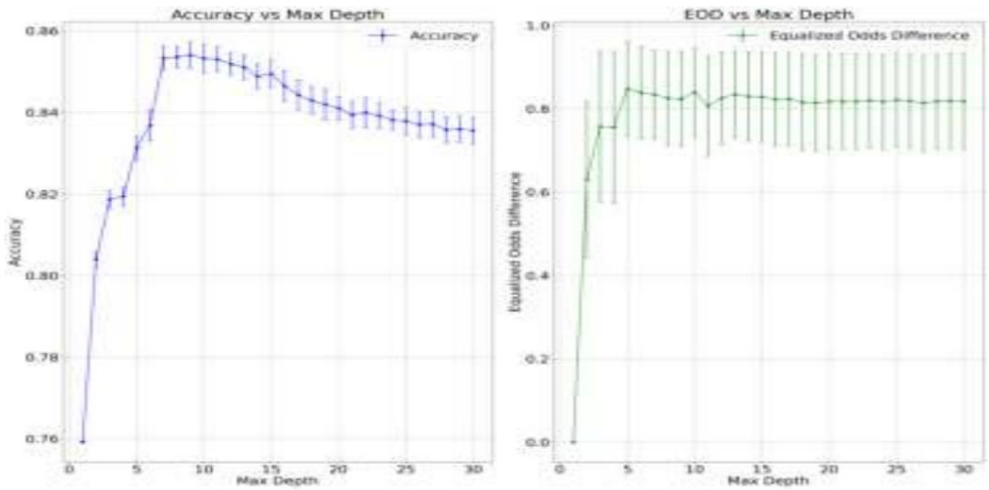


Figura 6. Gráficos de ingresos de adultos utilizando PC-SMOTE, que muestran precisión y EOD con intervalos de confianza del 95% frente a la profundidad máxima del árbol que van de 1 a 30.

Las Figuras 6 y 7, que representan los resultados utilizando PC-SMOTE y PC-ADASYN, respectivamente , muestran ligeras tendencias a la baja en la precisión, que mejoran brevemente antes de descender nuevamente, un patrón indicativo de sobreajuste a mayores profundidades. Las métricas de EOD para estos métodos muestran estabilidad inicial a profundidades más bajas, aumento en profundidades de nivel medio y disminución, lo que sugiere interacciones complejas entre la generación de muestras sintéticas y la delimitación de límites de decisión . Dadas estas observaciones, se eligió una profundidad máxima de 3 para nuestros experimentos, ya que representa un "punto óptimo" donde se optimizan tanto la precisión como la EOD.

Teniendo en cuenta estos resultados, una conclusión es cuestionar el equilibrio que a menudo se supone entre precisión y equidad demostrando que nuestro método PC-ADASYN supera consistentemente las líneas de base en los tres conjuntos de datos en términos de precisión y equidad. Este hallazgo es significativo, ya que sugiere mejorar la equidad del modelo sin sacrificar la precisión con métodos de muestreo apropiados y es posible ajustar el modelo. Sin embargo, nuestro análisis también revela escenarios en los que los ajustes a la complejidad del modelo, específicamente la profundidad máxima de los árboles de decisión, pueden mejorar la precisión a expensas de la equidad, como lo indican los aumentos en la diferencia de probabilidades igualadas (EOD). Sin embargo, se espera que el acoplamiento de métodos de muestreo con métodos de procesamiento, como la regularización basada en la equidad, pueda compensar estos efectos. Estas decisiones resaltan el poder discrecional de los investigadores para equilibrar las métricas de rendimiento del modelo en función de los objetivos y limitaciones esp La cantidad de muestra y la complejidad del tiempo son como cualquier otro método de muestreo. como el

Machine Translated by Google

La cantidad de muestra aumenta, la complejidad del tiempo aumenta pero, en general, los métodos de muestreo tienen la misma complejidad de tiempo que sus algoritmos subyacentes porque tienen la misma funcionalidad.

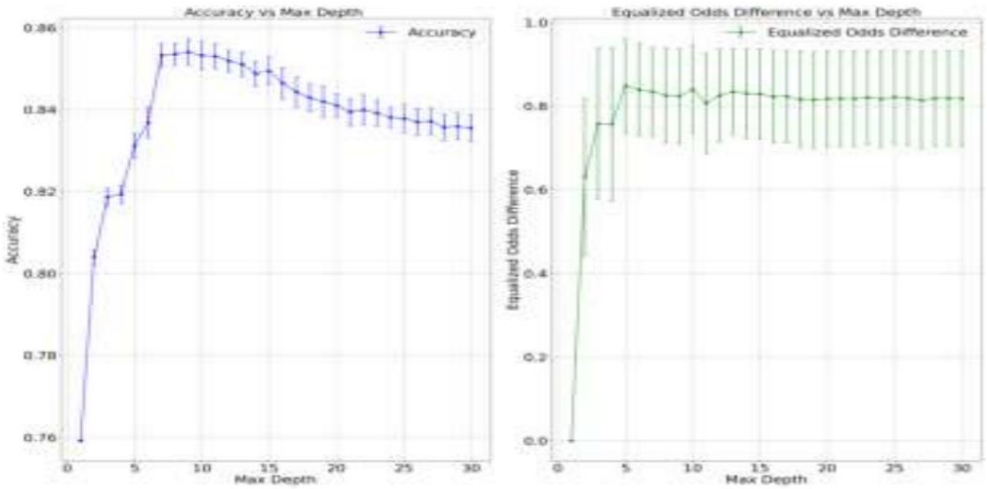


Figura 7. Gráficos de ingresos de adultos utilizando PC-ADASYN, que muestran precisión y EOD con intervalos de confianza del 95% frente a la profundidad máxima del árbol que van de 1 a 30.

Además, nuestros resultados subrayan las complejidades de optimizar simultáneamente múltiples métricas de equidad. Por ejemplo, los esfuerzos por mejorar la paridad estadística (SP) favoreciendo predicciones más positivas para cada grupo protegido en el conjunto de datos COMPAS llevaron a una reducción inadvertida de las predicciones negativas. Este cambio afectó negativamente a la tasa de falsos positivos (FPR), un componente de EOD, empeorando así la métrica de EOD a medida que mejoraba SP. Este fenómeno ilustra las tensiones matemáticas inherentes entre las métricas de equidad, donde la optimización de una puede afectar negativamente a otra. El conjunto de datos COMPAS, con su distribución de clases casi equilibrada, proporciona un ejemplo concreto de cómo las características del conjunto de datos pueden influir en el comportamiento de las métricas de equidad. La optimización de los PS en este contexto implica una medición sesgada de la equidad, particularmente cuando existen diferencias inherentes entre grupos en los atributos protegidos. Esto está respaldado por la literatura que indica que SP puede no tener en cuenta adecuadamente las diferencias de grupo, lo que podría llevar a conclusiones engañosas sobre la equidad de un modelo [63].

7. Limitaciones y trabajo futuro

La naturaleza misma de este estudio es tal que no es posible abordar todas las cuestiones relacionadas con la equidad y el llamado equilibrio entre equidad y desempeño. Como tal, existen limitaciones en el trabajo aquí reportado. Aun así, esperamos e intentamos que el trabajo aquí presentado sugiera vías adicionales de exploración en esta importante área.

Una limitación de este estudio es que nuestro método de muestreo no fue diseñado específicamente para optimizar métricas de equidad arbitrarias. Dicho de otra manera, dado que a menudo existen compensaciones inherentes entre el conjunto disponible de métricas de equidad, se tomó la decisión de centrarse en un enfoque que fuera independiente de las métricas, reconociendo que los resultados podrían haber sido diferentes para otras métricas. Esta también es parte de la razón por la que vimos diferentes comportamientos entre EOD y SP.

Además, se reconoce que, si bien el método de aprendizaje automático subyacente no debería ser relevante para el método propuesto, en realidad no se ha probado. Por lo tanto, en el futuro, esta investigación se ampliará considerando los impactos de otros algoritmos de ML, como la regresión logística, ID3 difuso, K-vecino más cercano y métodos de conjunto como bosques aleatorios o árboles potenciados por gradiente para evaluar la generalización de nuestra nuevos métodos de muestreo. El propósito de dicho estudio sería verificar que nuestros métodos sean independientes del algoritmo ML empleado. Además, esto ayudaría a validar si las mejoras observadas en equidad y precisión son específicas del modelo o pueden aplicarse universalmente.

Machine Translated by Google

Además, se reconoce que sólo se consideraron tres conjuntos de datos distintos: conjuntos de datos que se han estudiado ampliamente en el campo. Esto plantea la preocupación de que los métodos se estén adaptando a estos datos en lugar de abordar la cuestión más amplia de la equidad en el lavado de dinero. Para abordar esto, se planean experimentos con conjuntos de datos más grandes y diversos para proporcionar información más profunda sobre la escalabilidad y solidez de nuestras técnicas. Otra área de trabajo futuro es perfeccionar nuestro enfoque de muestreo multicategoría incorporando subdivisiones más granulares de categorías protegidas, lo que podría revelar sesgos más sutiles y proporcionar una comprensión más matizada de la equidad.

Finalmente, se reconoce que se han propuesto métodos alternativos para mitigar el sesgo , y estos métodos no se han estudiado en este trabajo en absoluto. El trabajo futuro implicaría comparaciones con más estrategias de muestreo. Se realizará una comparación más directa de los métodos propuestos con los métodos de procesamiento interno y posprocesamiento. Por ejemplo , se explorará la incorporación de métodos de procesamiento, como la regularización [22], o un método de posprocesamiento, como el Optimizador de umbral aleatorio [64], como posibles medios para obtener mayores mejoras tanto en la equidad como en el rendimiento.

8. Conclusiones

En este estudio, se investigó la cuestión del sesgo en las predicciones de ML y se desarrolló un método basado en la combinación de variables protegidas en una nueva multicategoría. En particular, la atención se centró en la cuestión sugerida en la literatura sobre la compensación entre sesgo y desempeño y la búsqueda de un método para mitigar esta compensación. El nuevo enfoque multicategoría propuesto refleja la identidad multifacética de los individuos, reconociendo la compleja interacción de atributos que definen los escenarios del mundo real. Dado el desequilibrio inherente a esta multicategoría, se desarrollaron cuatro métodos de muestreo adaptados a estas categorizaciones complejas, en lugar de las etiquetas de clases tradicionales. Para aplicar un clasificador de referencia, se entrenaron árboles de decisión y se evaluó la efectividad de estos métodos utilizando tres conjuntos de datos que a menudo se emplean en estudios de equidad. El rendimiento de los métodos se comparó con los métodos de referencia sin muestreo, utilizando precisión, macro F1, diferencia de probabilidades igualada (EOD) y paridad estadística (SP) como métricas de evaluación.

Los resultados de los experimentos indican que dos de las técnicas de muestreo recientemente desarrolladas (PC-SMOTE y PC-ADASYN) mejoran con éxito la equidad sin comprometer la precisión. Sorprendentemente, en algunos casos, estos métodos también mejoraron la precisión, proporcionando así evidencia contraria a las afirmaciones populares de una compensación entre equidad y desempeño. Un análisis más detallado del impacto de la profundidad máxima del árbol en el rendimiento del modelo reveló que, si bien aumentar la profundidad inicialmente aumenta la precisión, eventualmente conduce a una disminución. Por el contrario, una mayor profundidad afecta negativamente a la equidad, destacando el desafío de equilibrar la complejidad con la equidad. Sin embargo, se identificaron profundidades óptimas de los árboles que mejoran simultáneamente la precisión y la EOD, lo que subraya la posibilidad de lograr equidad sin sacrificar el rendimiento.

En última instancia, estos hallazgos desafían las nociones prevalecientes de una compensación implícita entre desempeño y equidad dentro de la investigación de mitigación de sesgos, lo que sugiere que estrategias de mitigación de sesgos cuidadosamente diseñadas tienen la capacidad de eludir esta compensación. Nuestro enfoque sienta un nuevo precedente para desarrollar algoritmos predictivos más equitativos al redefinir cómo se utilizan los atributos protegidos en el entrenamiento de modelos.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, GP y JS; análisis formal, GP y JS; investigación, médico de cabecera; metodología, médico de cabecera; software, médico de cabecera; supervisión, JS; validación, GP y JS; visualización, médico de cabecera; redacción: borrador original, médico de cabecera; redacción: revisión y edición, JS Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: los conjuntos de datos y el código implementados en este trabajo de investigación se cargaron en https://github.com/horlahsunbo/New-folder (consultado el 10 de junio de 2024).

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Machine Translated by Google

Referencias

1. Maina, IW; Belton, TD; Ginzberg, S.; Singh, A.; Johnson, TJ Una década de estudio de prejuicios raciales/étnicos implícitos en la atención sanitaria proveedores que utilizan la prueba de asociación implícita. Soc. Ciencia. Medicina. 2018, 199, 219–229. [Referencia cruzada]
2. Salimi, B.; Rodríguez, L.; Howe, B.; Suciu, D. Reparación de bases de datos causales para lograr equidad algorítmica. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Gestión de Datos de 2019, Ámsterdam, Países Bajos, 30 de junio a 5 de julio de 2019; págs. 793–810.
3. Kordzadeh, N.; Ghasemaghaei, M. Sesgo algorítmico: revisión, síntesis y direcciones futuras de investigación. EUR. J.Inf. Sistema. 2022, 31, 388–409. [Referencia cruzada]
4. Pesaj, D.; Shmueli, E. Una revisión sobre la equidad en el aprendizaje automático. Computación ACM. Sobrevivir. 2022, 55, 1–44. [Referencia cruzada]
5. Aghaei, S.; Azizi, MJ; Vayanos, P. Aprendizaje de árboles de decisión óptimos y justos para una toma de decisiones no discriminatoria. Proc. AAAI Conf. Artif. Intel. 2019, 33, 1418–1426. [Referencia cruzada]
6. Kamiran, F.; Calders, T. Técnicas de preprocesamiento de datos para clasificación sin discriminación. Conocimiento. Inf. Sistema. 2012, 33, 1–33. [Referencia cruzada]
7. Calmón, F.; Wei, D.; Vinzamuri, B.; Ramamurthy, KN; Varshney, KR Preprocesamiento optimizado para la prevención de la discriminación. En Actas de los avances en sistemas de procesamiento de información neuronal, Long Beach, CA, EE. UU., 4 al 9 de diciembre de 2017.
8. Shahbazi, N.; Lin, Y.; Asudeh, A.; Jagadish, HV Sesgo de representación en los datos: una encuesta sobre técnicas de identificación y resolución. Computación ACM. Sobrevivir. 2023, 55, 1–39. [Referencia cruzada]
9. Chen, Z.; Zhang, JM; Sarro, F.; Harman, M. Un estudio empírico exhaustivo de los métodos de mitigación de sesgos para el aprendizaje automático. clasificadores. Transmisión ACM. Software. Ing. Método. 2023, 32, 1–30. [Referencia cruzada]
10. Perzynski, A.; Berg, KA; Tomás, C.; Cemballi, A.; Smith, T.; Shick, S.; Günzler, D.; Sehgal, AR Discriminación racial y factores económicos en la exclusión de los vecindarios de Ohio. Bois Rev. Soc. Ciencia. Res. Carrera 2023, 20, 293–309. [Referencia cruzada]
11. Steil, JP; Albright, L.; Rugh, JS; Massey, DS La estructura social de la discriminación hipotecaria. Casa. Semental. 2018, 33, 759–776. [Referencia cruzada]
12. Salgado, JF; Moscoso, S.; García-Izquierdo, AL; Anderson, NR Dar forma a lugares de trabajo inclusivos a través del diálogo social; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2017.
13. Leavy, S.; Meaney, G.; Wade, K.; Greene, D. Mitigar el sesgo de género en conjuntos de datos de aprendizaje automático. En Actas sobre el sesgo y los aspectos sociales en la búsqueda y recomendación: Primer taller internacional, BIAS 2020, Lisboa, Portugal, 14 de abril de 2020; págs. 12-26.
14. Hort, M.; Chen, Z.; Zhang, JM; Harman, M.; Sarro, F. Mitigación de sesgos para clasificadores de aprendizaje automático: una encuesta completa. ACM J. Computación responsable. 2023, 1, 1–52. [Referencia cruzada]
15. Fahse, T.; Huber, V.; van Giffen, B. Gestión del sesgo en proyectos de aprendizaje automático. En Innovación a través de sistemas de información: Volumen II: Una colección de las últimas investigaciones sobre cuestiones tecnológicas; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2021; págs. 94-109.
16. Zhang, Z.; Neill, DB Identificación de sesgos predictivos significativos en clasificadores. arXiv 2017, arXiv:1611.08292. [Referencia cruzada]
17. Zheng, Z.; Cai, Y.; Li, Y. Método de sobremuestreo para clasificación desequilibrada. Computadora. Informar. 2015, 34, 1017–1037.
18. Chawla, Nevada; Bowyer, KW; Salón, LO; Kegelmeyer, WP SMOTE: Técnica de sobremuestreo de minoría sintética. J. Artif. Intel. Res. 2002, 16, 321–357. [Referencia cruzada]
19. Él, H.; Bai, Y.; García, EA; Li, S. ADASYN: Enfoque de muestreo sintético adaptativo para el aprendizaje desequilibrado. En Actas de la Conferencia Conjunta Internacional IEEE de 2008 sobre Redes Neuronales (Congreso Mundial IEEE sobre Inteligencia Computacional), Hong Kong, China, 1 a 8 de junio de 2008; págs. 1322-1328.
20. Janssen, P.; Sadowski, BM Bias in Algorithms: Sobre el equilibrio entre precisión y equidad. En Actas de la 23.ª Conferencia Bienal de la Sociedad Internacional de Telecomunicaciones, Gotemburgo, Suecia, 21-23 de junio de 2021.
21. Hardt, M.; Precio, E.; Srebro, N. Igualdad de oportunidades en el aprendizaje supervisado. En actas de los avances en neurología. Sistemas de Procesamiento de Información, Barcelona, España, 5 al 10 de diciembre de 2016.
22. Kamishima, T.; Akaho, S.; Asoh, H.; Sakuma, J. Clasificador consciente de la equidad con regularizador eliminador de prejuicios. En Actas del aprendizaje automático y el descubrimiento de conocimientos en bases de datos: Conferencia europea, ECML PKDD 2012, Bristol, Reino Unido, 24 a 28 de septiembre de 2012; págs. 35–50.
23. Calders, T.; Žliobaitė, I. Por qué los procesos computacionales imparciales pueden conducir a procedimientos de decisión discriminativos. En Discriminación y Privacidad en la Sociedad de la Información: Minería de Datos y Elaboración de Perfiles en Grandes Bases de Datos; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2013; págs. 23–33.
24. Burt, A. Cómo luchar contra la discriminación en la IA. Revisión de negocios de Harvard. 2020 Disponible en línea: https://hbr.org/2020/08/how-to-fight-discrimination-in-ai (consultado el 12 de julio de 2024).
25. Siegler, A.; Admussen, W. Descubriendo la discriminación racial por parte de la policía. Universidad del Noroeste. Ley Rev. 2021, 115, 987–1054.
26. Grabowicz, P.; Perelló, N.; Mishra, A. ¿Cómo entrenar modelos que no propaguen la discriminación? Blog de Equate and Machine Learning , Universidad de Massachusets, Amherst. 2022. Disponible en línea : https://groups.cs.umass.edu/equate-ml/2022/04/07/how-to-train-models-that-do-not-propagate-discrimination/ (consultado el 12 de julio de 2024).
27. Khani, F.; Liang, P. De la discriminación en el aprendizaje automático a la discriminación en la ley, Parte 1: Trato desigual. Blog del laboratorio de IA de Stanford . 2022. Disponible en línea: https://ai.stanford.edu/blog/discrimination_in_ML_and_law/ (consultado el 12 de julio de 2024).
28. Shahriari, K.; Shahriari, M. Revisión del estándar IEEE: diseño alineado éticamente: una visión para priorizar el bienestar humano con inteligencia artificial y sistemas autónomos. En Actas de la Conferencia Internacional de Tecnología Humanitaria (IHTC) de IEEE Canadá, Toronto, ON, Canadá, 21 y 22 de julio de 2017; págs. 197-201.

Machine Translated by Google

29. Comisión Europea; Dirección General de Redes, Contenidos y Tecnologías de Comunicaciones. Directrices éticas para una IA confiable. Oficina de Publicaciones. 2019. Disponible en línea: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d39885 69-0434-11ea-8c1f-01aa75ed71a1/idioma-es/formato-PDF/source-337437547 (consultado el 10 de junio de 2024)
30. Ebers, M.; Hoch, VRS; Rosenkranz, F.; Ruschemeier, H.; Steinrötter, B. La propuesta de la Comisión Europea para una ley de inteligencia artificial: una evaluación crítica realizada por miembros de la Sociedad de Derecho de Robótica e Inteligencia Artificial (RAILS). J 2021, 4, 589–603. [Referencia cruzada]
31. Hajian, S.; Domingo-Ferrer, J. Una metodología para la prevención de la discriminación directa e indirecta en la minería de datos. Traducción IEEE. Conocimiento. Ing. de datos. 2012, 25, 1445–1459. [Referencia cruzada]
32. Pescado, B.; Kun, J.; Lelkes, Á.D. Un enfoque basado en la confianza para equilibrar la equidad y la precisión. En actas del SIAM 2016 Conferencia internacional sobre minería de datos, Miami, FL, EE. UU., 5 al 7 de mayo de 2016; págs. 144-152.
33. Hajian, S. Prevención simultánea de la discriminación y protección de la privacidad en la publicación y extracción de datos. arXiv 2013, arXiv:1306.6805. [Referencia cruzada]
34. Sondeck, LP; Laurent, M.; Frey, V. La métrica de tasa de discriminación semántica para mediciones de privacidad que cuestiona el beneficio de la cercanía t sobre la diversidad l. En Actas de la 14.ª Conferencia Internacional sobre Seguridad y Criptografía, Madrid, España, 24 a 26 de julio de 2017; Volumen 6, págs. 285–294.
35. Ruggieri, S. Uso del anonimato de cercanía t para controlar la no discriminación. Trans. Privado de datos. 2014, 2, 99–129.
36. Romano, Y.; Bates, S.; Candes, E. Lograr probabilidades igualadas mediante el remuestreo de atributos sensibles. En Actas de los avances en sistemas de procesamiento de información neuronal, en línea, 6 a 12 de diciembre de 2020; págs. 361–371.
37. Peng, K.; Chakraborty, J.; Menzies, T. Fairmask: Mayor equidad mediante el reequilibrio de atributos protegidos basado en modelos. Traducción IEEE. Software. Ing. 2022, 49, 2426–2439. [Referencia cruzada]
38. Dhar, P.; Gleason, J.; Roy, A.; Castillo, CD; Chellappa, R. PASS: Sistema de supresión de atributos protegidos para mitigar el sesgo en el reconocimiento facial. En actas de la Conferencia internacional IEEE/CVF sobre visión por computadora, Montreal, QC, Canadá, 10 a 17 de octubre de 2021; págs. 15087-15096.
39. Krasanakis, E.; Spyromitros-Xioufis, E.; Papadopoulos, S.; Kompatsiaris, Y. Reponderación sensible adaptativa para mitigar el sesgo en la clasificación consciente de la equidad. En Actas de la Conferencia World Wide Web, Lyon, Francia, 23 a 27 de abril de 2018; págs. 853–862.
40. Ran˘ci´c, S.; Radovanovic, S.; Delibaši´c, B. Investigación de técnicas de sobremuestreo para modelos justos de aprendizaje automático. En Actas de la XI Sistemas de soporte a la decisión: Sistemas, análisis y tecnologías de soporte a la decisión en respuesta a la gestión de crisis global: 7.ª Conferencia internacional sobre tecnología de sistemas de soporte a la decisión, ICDSST 2021, Loughborough, Reino Unido, 26 a 28 de mayo de 2021; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2021; págs. 110-123.
41. Yan, S.; te Kao, H.; Ferrara, E. Equilibrio justo de clases: mejorar la equidad del modelo sin observar atributos sensibles. En Actas de la 29ª Conferencia Internacional ACM sobre Gestión de la Información y el Conocimiento, evento virtual, Irlanda, 19 a 23 de octubre de 2010; págs. 1715-1724.
42. HuZhang, B.; Lemoine, B.; Mitchell, M. Mitigar los sesgos no deseados con el aprendizaje contradictorio. En Actas de la Conferencia AAAI/ACM sobre IA, Ética y Sociedad, Nueva Orleans, LA, EE. UU., 2 y 3 de febrero de 2018; págs. 335–340.
43. Celis, LE; Huang, L.; Keswani, V.; Vishno, NK Clasificación con restricciones de equidad: un metaalgoritmo con garantías demostrables. En Actas de la Conferencia sobre Equidad, Responsabilidad y Transparencia, Atlanta, GA, EE. UU., 29 y 31 de enero de 2019; págs. 319–328.
44. Zafar, MB; Valera, I.; Rodríguez, MG; Gummadi, KP Equidad más allá del trato dispar y el impacto dispar: clasificación del aprendizaje sin maltrato dispar. En Actas de la 26.ª Conferencia Internacional sobre la World Wide Web, Perth, Australia, 3 a 7 de abril de 2017; págs. 1171-1180.
45. Agarwal, A.; Beygelzimer, A.; Dudík, M.; Langford, J.; Wallach, H. Un enfoque reductor para una clasificación justa. En procedimientos de la Conferencia Internacional sobre Aprendizaje Automático, Estocolmo (Suecia), 10 a 15 de julio de 2018; págs. 60–69.
46. Lowy, A.; Baharlouei, S.; Pavan, R.; Razaviyayn, M.; Beirami, A. Un marco de optimización estocástica para una minimización justa del riesgo. Trans. Mach. Aprender. Res. 2022. [Referencia cruzada]
47. Spinelli, I.; Scardapane, S.; Hussain, A.; Uncini, A. Fairdrop: Abandono de borde sesgado para mejorar la equidad en el aprendizaje de representación gráfica. Traducción IEEE. Artif. Intel. 2021, 3, 344–354. [Referencia cruzada]
48. Hort, M.; Zhang, JM; Sarro, F.; Harman, M. Fairea: Un enfoque de mutación del comportamiento modelo para comparar métodos de mitigación de sesgos. En actas de la 29.ª reunión conjunta de la ACM sobre la conferencia y el simposio europeo sobre ingeniería de software sobre los fundamentos de la ingeniería de software, Atenas, Grecia, 23 a 28 de agosto de 2012; págs. 994-1006.
49. Bhaskaruni, D.; Eh.; Lan, C. Mejora de la equidad de las predicciones mediante el conjunto de modelos. En Actas de la 31.ª Conferencia Internacional del IEEE sobre Herramientas con Inteligencia Artificial (ICTAI), Portland, Oregón, EE. UU., 4 a 6 de noviembre de 2019; págs. 1810–1814.
50. Iosifidis, V.; Fetahu, B.; Ntoutsi, E. Fae: Un marco de conjunto consciente de la equidad. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE sobre Big Data (Big Data), Los Ángeles, CA, EE. UU., 9 a 12 de diciembre de 2019; págs. 1375-1380.
51. Dwork, C.; Hardt, M.; Pitassi, T.; Reingold, O.; Zemel, R. Justicia a través de la conciencia. En las actas de la tercera innovación en Conferencia teórica sobre informática, Cambridge, MA, EE. UU., 8 a 10 de enero de 2012; págs. 214-226.
52. Pleiss, G.; Raghavan, M.; Wu, F.; Kleinberg, J.; Weinberger, KQ Sobre equidad y calibración. En Actas de los Avances en Sistemas de procesamiento de información neuronal, Long Beach, CA, EE. UU., 4 a 8 de diciembre de 2017.
53. Karimi-Haghighi, M.; Castillo, C. Mejora de una herramienta de predicción de reincidencia con aprendizaje automático: eficacia y equidad algorítmica. En Actas de la Decimoctava Conferencia Internacional sobre Inteligencia Artificial y Derecho, São Paulo, Brasil, 21 a 25 de junio de 2017; págs. 210-214.

Machine Translated by Google

54. Friedler, SA; Scheidegger, C.; Venkatasubramanian, S. La (im)posibilidad de la justicia: diferentes sistemas de valores requieren diferentes mecanismos para una toma de decisiones justa. Comunitario. ACM 2021, 64, 136-143. [Referencia cruzada]
55. García, V.; Sánchez, JS; Mollineda, RA Sobre la eficacia de los métodos de preprocesamiento cuando se trata de diferentes niveles de desequilibrio de clases. Sistema basado en el conocimiento. 2012, 25, 13-21. [Referencia cruzada]
56. Breiman, L. Clasificación y árboles de regresión; Routledge: Londres, Reino Unido, 2017.
57. Pedregosa, F.; Varoquaux, G.; Gramfort, A.; Michel, V.; Thirión, B.; Grisel, O.; Blondel, M.; Prettenhofer, P.; Weiss, R.; Dubourg, V.; et al. Scikit-learn: aprendizaje automático en Python. J. Mach. Aprender. Res. 2011, 12, 2825–2830.
58. Kelly, M.; Longjohn, R.; Nottingham, K. El repositorio de aprendizaje automático de la UCI. 2024. Disponible en línea: https://archive.ics.uci.edu (consultado el 10 de junio de 2024).
59. Becker, B.; Kohavi, R. Adulto. Repositorio de aprendizaje automático de la UCI. 1996. Disponible en línea: https://archive.ics.uci.edu/dataset/2/adulto (consultado el 10 de junio de 2024). [Referencia cruzada]
60. Hofmann, H.; Statlog (datos crediticios alemanes). Repositorio de aprendizaje automático de la UCI. 1994. Disponible en línea: https://archive.ics.uci.edu/dataset/144/statlog+alemán+crédito+datos (consultado el 10 de junio de 2024). [Referencia cruzada]
61. Dressel, J.; Farid, H. La precisión, la justicia y los límites de la predicción de la reincidencia. Ciencia. Adv. 2018, 4, eao5580. [Referencia cruzada]
62. Huang, Q.; Mao, J.; Liu, Y. Un algoritmo de búsqueda de cuadrícula mejorado para la optimización de parámetros SVR. En Actas de la 14.ª Conferencia Internacional del IEEE sobre Tecnologías de la Comunicación de 2012, Chengdu, China, 9 a 11 de noviembre de 2012; págs. 1022-1026.
63. Catón, S.; Haas, C. Equidad en el aprendizaje automático: una encuesta. Computación ACM. Sobrevivir. 2023, 56, 1–38. [Referencia cruzada]
64. Alabdulmohsin, I.; Lucic, M. Un algoritmo casi óptimo para desviar modelos de aprendizaje automático entrenados. En Actas de la 35.ª Conferencia sobre sistemas de procesamiento de información neuronal, en línea, del 6 al 14 de diciembre de 2021.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Procesamiento y distribución seguros de datos gestionados en privado Sistema de archivos interplanetario que utiliza pruebas de conocimiento cero

Kyohei Shibano 1,*, Kensuke Ito [1], Changhee Han [2], Tsz Tat Chu [2], Wataru Ozaki [2] y Gento Mogi [1]

[1] Departamento de Gestión Tecnológica para la Innovación, Escuela de Ingeniería, Universidad de Tokio, Tokio 113-8656, Japón
[2] Callisto Inc., Tokio 171-0022, Japón
* Correspondencia: shibano@tmi.tu-tokyo.ac.jp

Resumen: En este estudio, se propone un nuevo método de intercambio de datos que utiliza un sistema de archivos interplanetario privado (un sistema de almacenamiento descentralizado operado dentro de una red cerrada) para distribuir datos a entidades externas y al mismo tiempo hacer que su autenticidad sea verificable. Entre los dos modos operativos de IPFS, público y privado, este estudio se centra en el método para utilizar IPFS privado. El IPFS privado no está abierto al público en general; Aunque plantea un riesgo de manipulación de datos al distribuirlos a partes externas, el método propuesto garantiza la autenticidad de los datos recibidos. En particular, este método aplica un tipo de prueba de conocimiento cero, concretamente, el protocolo Groth16 de zk-SNARK, para garantizar que los datos correspondan al identificador de contenido en un IPFS privado. Además, el nombre del destinatario está incrustado en los datos distribuidos para evitar una distribución secundaria no autorizada. Los experimentos confirmaron la eficacia del método propuesto para un tamaño de datos de imagen de hasta 12 En estudios futuros, el método propuesto se aplicará a tipos de datos más grandes y diversos.

Palabras clave: IPFS; prueba de conocimiento cero; circom; zk-SNARK; IPFS privados; distribución de datos; procesamiento de datos ; seguridad de datos

check for updates

Cita: Shibano, K.; Está bien.; Han, C.; Chu, TT; Ozaki, W.; Mogi, G. Procesamiento y distribución seguros de datos gestionados en un sistema de archivos interplanetario privado mediante conocimiento cero Pruebas. Electrónica 2024, 13, 3025. https://doi.org/10.3390/electrónica13153025

Editor académico: Aryya Gangopadhyay

Recibido: 13 de junio de 2024
Revisado: 14 de julio de 2024
Aceptado: 20 de julio de 2024
Publicado: 31 de julio de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Los sistemas descentralizados son robustos porque carecen de un único punto de falla; por lo tanto, se aplican ampliamente en todos los sectores empresariales, incluidos las criptomonedas, la gestión de la cadena de suministro, los servicios financieros y la identidad digital. Para almacenar datos de gran tamaño, como imágenes , estos sistemas requieren funciones de almacenamiento que estén inherentemente descentralizadas. Blockchain, comúnmente utilizado en conjunto, generalmente maneja tamaños de datos más pequeños, como historiales de transacciones, y opera como una base de datos de libro mayor. El sistema de archivos interplanetario (IPFS) es un destacado sistema de almacenamiento descentralizado que almacena datos en múltiples nodos para mejorar la disponibilidad de los datos. El IPFS tiene dos variantes: IPFS público, en el que los datos pueden ser almacenados por cualquier usuario con acceso ilimitado, e IPFS privado, en el que se establece una red cerrada accesible sólo dentro de organizaciones o grupos específicos, que ofrece mayor privacidad y seguridad.

Al almacenar datos en IPFS, es fundamental comprender las diferencias entre IPFS público e IPFS privado. El IPFS público permite que cualquiera acceda a los datos, mientras que el IPFS privado solo es accesible dentro de organizaciones o grupos específicos, lo que mejora la privacidad y la seguridad. Al almacenar información confidencial, como datos confidenciales, en IPFS públicos, la aplicación de un esquema de cifrado adecuado es vital para garantizar la protección de los datos. Por el contrario, el IPFS privado proporciona mayor seguridad para el almacenamiento de datos, porque sólo es accesible dentro de una red cerrada.

Particularmente para organizaciones como corporaciones o instituciones de atención médica, almacenar datos en IPFS públicos, a pesar de utilizar tecnologías de cifrado sólidas, conlleva riesgos inherentes. Además, en tales casos existe persistentemente la posibilidad de que se produzcan fugas de datos debido a errores operativos ; Aunque los datos están cifrados, quedan expuestos al mundo, lo que los hace vulnerables a ataques de fuerza bruta y otras amenazas a la seguridad.

Machine Translated by Google

En cuanto a la accesibilidad, el IPFS público permite a los usuarios generales acceder y recuperar directamente datos. Sin embargo, en IPFS privado, los datos deben recibirse de miembros de la organización o grupo que constituye la red. Durante este proceso, si los datos son manipulados, los usuarios pueden incapaz de detectarlo. Por tanto, confiar en los intermediarios responsables del tratamiento de los datos. la transferencia en tales casos se vuelve obligatoria. Para abordar el problema de confianza antes mencionado, un nuevo En este documento se propone un método para distribuir datos almacenados en un IPFS privado a entidades externas. al tiempo que se hace verificable su autenticidad. El protocolo Groth16 [1] de zk-SNARKs, un tipo de ZKP, se aplica a los datos almacenados en un IPFS privado para garantizar la autenticidad de los datos. Además, la información del destinatario está integrada en los datos distribuidos para evitar distribución secundaria no autorizada. El método propuesto para compartir datos es importante. porque está adaptado al caso privado de IPFS.

Las diferencias en varios aspectos, incluida la seguridad y la accesibilidad, a la hora de almacenar Los datos en IPFS públicos e IPFS privados dentro del dominio empresarial se resumen en Tabla 1. Este estudio propone soluciones a las amenazas asociadas a los IPFS privados.

Tabla 1. Comparación entre IPFS públicos y privados en el ámbito empresarial.

	IPFS pública	IPFS privado
Modelo de confianza	Sin esperanzas	Requiere confianza en el grupo operativo.
Restricciones de acceso	Accesible para cualquiera	Accesible sólo dentro del grupo operativo
Riesgo de fuga de datos	Riesgo constante de fuga debido a errores del usuario	Bajo riesgo de fuga dentro de una red cerrada
Manejo de confidencialidad Información	Requiere cifrado adecuado	Los datos almacenados en IPFS no requieren cifrado de alto nivel; hay un punto de confianza al pasar datos a los usuarios
Riesgo de ataque de fuerza bruta	Siempre presente	Bajo
Método de recuperación de datos	Acceso directo por parte de los usuarios	Datos recibidos de miembros de la organización o grupo
Amenazas	Requiere cifrado que impida el descifrado por parte de usuarios no autorizados	Existe riesgo de manipulación al transferir datos a los usuarios

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera. La sección 2 presenta antecedentes relacionados. investigación. La sección 3 describe las tecnologías fundamentales, es decir, ZKP y zk-SNARK. La Sección 4 describe la estructura del método propuesto, mientras que la Sección 5 describe la Posibles aplicaciones de este método. La sección 6 presenta la implementación de este método, mientras que la Sección 7 analiza los experimentos realizados para verificar la efectividad del implementación. La Sección 8 presenta una discusión de los resultados experimentales, mientras que la Sección 9 presenta las conclusiones del documento y un resumen de los desafíos futuros.

2. Estudios relacionados

Los sistemas descentralizados existentes utilizan IPFS, particularmente en combinación con blockchain tecnología. Kumar y cols. [2] propuso un método para gestionar de forma segura datos médicos mediante integrando IPFS con una cadena de bloques. Azbeg et al. [3] sugirió específicamente un sistema que datos médicos administrados y almacenados utilizando IPFS privado y una cadena de bloques autorizada por empleando volver a cifrar el proxy para garantizar un descifrado seguro por parte de los médicos designados. Cuando un El médico recibe algunos datos del paciente, obtiene los datos vueltos a cifrar a través de un hospital. Hossan et al. [4] también propuso un sistema para registrar de forma segura información para viajes compartidos. servicios que utilizan IPFS y una cadena de bloques privada.

Centrándose en controlar la distribución de los datos gestionados por IPFS, Lin et al. [5] propuso un sistema para proteger datos privados utilizando IPFS mejorado combinado con un cadena de bloques. Este sistema registró metadatos de archivos y accedió a permisos en la cadena de bloques, permitiendo a los usuarios controlar el intercambio de archivos. Además, el sistema implementó funciones de gestión eficientes mediante contratos inteligentes, mejorando así la seguridad y la gestión de los datos.

Machine Translated by Google

flexibilidad. Battah et al. [6] desarrolló un sistema que utilizaba autenticación multipartita (MPA), recifrado de proxy y contratos inteligentes en una cadena de bloques para el control de acceso descentralizado de datos cifrados almacenados en IPFS. Huang et al. [7] introdujo un proxy IPFS confiable para realizar control de acceso y administración de claves de grupo para datos cifrados almacenados en IPFS. Sol y cols. [8] propusieron un sistema que permitía solo a personas con atributos apropiados descifrar datos cifrados almacenados en IPFS utilizando un sistema de cifrado basado en atributos de política de texto cifrado, lo que facilitaba una gestión eficiente de la información médica. Kang et al. [9] permitió la distribución de datos gestionados utilizando IPFS privado y una cadena de bloques privada a usuarios externos utilizando una red de datos nombrada (NDN). Además, Uddin et al. [10] propusieron un sistema de intercambio de archivos que utilizaba IPFS y tecnología de infraestructura de clave pública (PKI) sin requerir un tercero confiable.

Varios estudios han utilizado ZKP para la distribución de datos. Por ejemplo, Li et al. [11] propuso un sistema de gestión de tráfico que preserva la privacidad y que combina pruebas de rango de conocimiento cero no interactivas con una cadena de bloques. Un prototipo que utiliza Hyperledger Fabric e Hyperledger Ursa cumplió con los requisitos de privacidad de datos para la gestión del tráfico en tiempo r

Este estudio propone un método para procesar y distribuir adecuadamente los datos gestionados dentro de IPFS privados a usuarios fuera de la red, ofreciendo así un enfoque diferente a los propuestos en estudios anteriores. Algunos estudios han adoptado el recifrado de proxy como un método apropiado para el almacenamiento y distribución de datos en IPFS [3,6]. Con este método, los datos distribuidos se pueden volver a cifrar para descifrarlos con la clave privada del destinatario. Además, al almacenar datos en IPFS, registrar el valor hash de los datos previamente cifrados en la cadena de bloques permite a los destinatarios verificar la exactitud de los datos recibidos después del descifrado. Sin embargo, este método no puede manejar casos en los que se procesan datos, como incrustar el nombre del destinatario en los datos descifrados, como en este estudio.

3. Prueba de conocimiento

cero ZKP es un protocolo criptográfico que permite a un probador demostrar la validez de una proposición a un verificador sin revelar ninguna información adicional aparte de la validez de la proposición. La propuesta de este estudio es que los datos proporcionados a una entidad externa se generen en base a un CID determinado. Nuestro objetivo es permitir que un miembro de IPFS privado (probador) pruebe esta proposición ante una entidad externa (verificador como destinatario de los datos) sin revelar ninguna otra información importante (como derechos de acceso de IPFS y claves de cifrado).

ZKP, específicamente el protocolo Groth16 de zk-SNARK utilizado en este estudio, comienza con una configuración confiable donde ambas partes establecen parámetros públicos que son cruciales para la generación segura y verificación de pruebas. En el esquema ZKP, primero generamos un circuito que describe el proceso para el cual se pretende realizar la prueba. El circuito incluye las condiciones a verificar como la existencia de un CID. A través del esquema ZKP, se crean claves criptográficas, específicamente una clave de prueba y una clave de verificación. Estas claves son cruciales para crear una prueba para el circuito y su verificación. Utilizando la clave de prueba y los datos de entrada, el probador genera una prueba que revela la validez de los datos de salida frente a las condiciones especificadas en el circuito. Luego, el verificador utiliza la clave de verificación para verificar la prueba y los datos de salida. Si la prueba es válida, confirma la integridad de los datos sin exponer ninguna información subyacente.

En este estudio, el procesamiento de Groth16 se realiza utilizando circom [12,13] y snarkjs [14]. El flujo del proceso se resume en la Figura 1.

zk-SNARKs se emplea debido a su naturaleza no interactiva y eficiencia, que son particularmente ventajosas para sistemas que emplean contratos inteligentes debido a los bajos costos computacionales para verificar la prueba. Además, zk-SNARKs es conocido por sus altos requisitos computacionales y la necesidad de especificaciones de PC avanzadas. Por ejemplo, en una de las aplicaciones representativas de zk-SNARK, Zcash [15], el proceso de generación de pruebas tarda más de medio minuto para una sola transacción anónima [16].

Machine Translated by Google

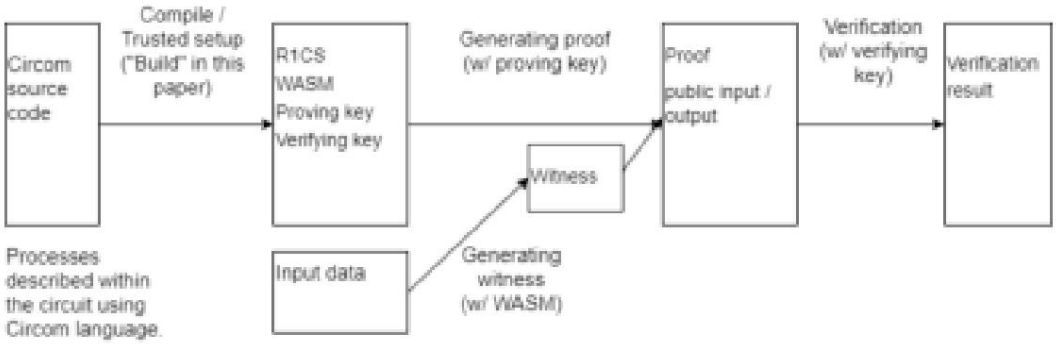


Figura 1. Prueba de conocimiento cero utilizando circom.

4. Sistema propuesto La

Figura 2 presenta una descripción general del sistema propuesto.

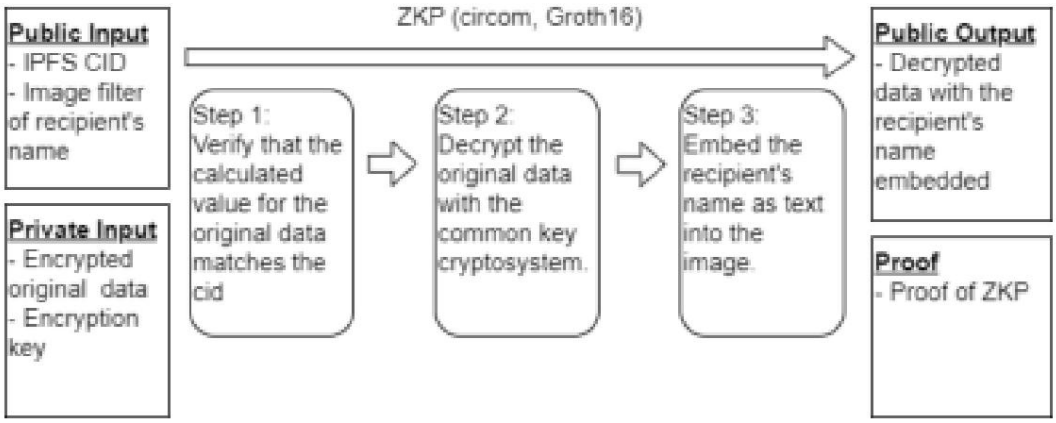


Figura 2. Flujo de proceso de ZKP: un ejemplo de procesamiento de datos de imágenes.

Aquí, hacemos las siguientes suposiciones: • IPFS

privado es operado por un número limitado de miembros. • Los datos se
almacenan en IPFS en un formato cifrado mediante criptografía de clave simétrica. • La clave de cifrado
está en manos exclusivas de un individuo entre los miembros, es decir, un
administrador.

El sistema propuesto facilita la creación de una prueba ZKP a través del circuito por parte del miembro poseedor de la clave de cifrado (equivalente a un administrador). Las entradas y salidas (distintas de las pruebas) de este proceso son las siguientes: • Entrada

pública: – CID de los

datos cifrados originales; – Un filtro para incrustar
el nombre del destinatario en los datos; • Entrada privada: – Datos

originales cifrados; -

Clave de encriptación; • Producción:

– Datos descifrados con el nombre del destinatario incrustado.

Tenga en cuenta que la implementación optimizada para ZK (Sección 6.1) agrega más información a la entrada pública. En particular, el proceso interno de ZKP implica los siguientes pasos:

1. Calcular el CID de los datos cifrados originales para verificar una coincidencia con el cifrado.
CID registrado.

Machine Translated by Google

2. Descifrar los datos originales mediante criptografía de clave simétrica.
3. Incrustar el nombre del destinatario en los datos sin procesar de la imagen descifrada según el filtro proporcionada en la opinión pública.

En el sistema propuesto, no nos centramos únicamente en los datos de imágenes, sino que los utilizamos como datos de ejemplo para verificar la aplicabilidad del esquema propuesto. Los filtros se utilizan para mejorar la eficiencia del procesamiento dentro del circuito. Como la incorporación de datos de nombres dentro del circuito requiere un gran esfuerzo computacional, una parte considerable del procesamiento de la imagen se realiza de antemano fuera del circuito y se crea un filtro. Utilizando información y pruebas públicas, el destinatario puede verificar que los datos descifrados (es decir, la salida) con su nombre incrustado se generan a partir de los datos originales (contenidos en la entrada privada) administrados con el CID. El destinatario puede consultar con al menos un miembro de la red para confirmar la existencia del CID en IPFS privado.

En resumen, el proceso antes mencionado permite al destinatario verificar la información recibida. datos realizando las siguientes tareas:

- verificar que los datos recibidos fueron generados a partir de los datos gestionados con el CID de IPFS privado,
- confirmar utilizando la prueba de que todo el proceso se realizó correctamente sin conocer directamente los datos cifrados o la clave de cifrado, y • verificar que el CID existe específicamente dentro del IPFS privado preguntando al menos a un miembro de la red.

La novedad del sistema propuesto es que permite verificar la autenticidad de los datos confiando en al menos un miembro de la red incluso si el destinatario no controla la clave de cifrado.
(Es natural que el receptor confíe en al menos un miembro de un sistema multimiembro en particular. Si no se puede confiar en ninguno de los miembros, habrá un incentivo marginal para recibir datos administrados por esa red).

5. Aplicaciones potenciales En la industria médica, los datos de diagnóstico de pacientes se gestionan en múltiples instituciones médicas. Utilizando el sistema propuesto, los pacientes pueden verificar si los datos que reciben realmente se administran en IPFS privado para garantizar la autenticidad. También se propone aquí una plataforma todo en uno para la investigación y desarrollo de aprendizaje automático con imágenes médicas [17]. En esta plataforma, las imágenes médicas anónimas se gestionan en IPFS privados operados por un grupo de instituciones médicas. El sistema permite a los investigadores de aprendizaje automático, externos a la red, verificar si los datos de la imagen realmente se administran en el IPFS privado. Además, al incorporar información sobre los investigadores de aprendizaje automático en los datos de las imágenes, las instituciones médicas pueden mitigar el riesgo de distribución secundaria.

Si la aplicación no se limita a incorporar el nombre del destinatario, las aplicaciones potenciales del sistema propuesto se pueden ampliar aún más. Por ejemplo, considere un escenario en el que una empresa específica establece IPFS privados para compartir documentos confidenciales entre las empresas de su grupo. Si se incluyen datos de los empleados, ocultar datos privados y distribuirlos a entidades externas les permite a estas entidades confirmar la asociación de los empleados con la empresa y al mismo tiempo garantizar que su privacidad esté proteg
Además, supongamos que una universidad ha creado IPFS privados para permitir que sólo el personal académico acceda a los datos de rendimiento de los estudiantes. En este caso, los estudiantes pueden verificar que los datos de desempeño recibidos se administran genuinamente en el IPFS privado.
Por lo tanto, el sistema propuesto admite un caso híbrido: distribuir datos internos a entidades externas específicas según sea necesario, que prevalecen en entornos del mundo real.

6. Implementación El sistema propuesto se implementó para procesar datos de imágenes utilizando circom, una reconocida herramienta especializada en la construcción de circuitos zk-SNARK. Circom permite la descripción de procesos computacionales dentro de un circuito utilizando su lenguaje único, y la

Machine Translated by Google

El archivo ejecutable generado después de la compilación se puede invocar a través de la biblioteca JavaScript, snarkjs. Esta disposición permite describir los procesos del circuito en circom, y el procesamiento externo y las pruebas de corrección del circuito se realizan utilizando JavaScript. Para los zk-SNARK esquema, se utilizó Groth16; es conocido por su velocidad de ejecución relativamente más rápida que otros Esquema zk-SNARK.

En particular, trabajamos en dos tipos de implementaciones para datos de imágenes: un estándar implementación utilizando técnicas criptográficas generales y una implementación optimizada para ZK utilizando técnicas criptográficas compatibles con ZK para reducir el tiempo de cálculo del circuito. Estas implementaciones se utilizaron para comparar los tiempos de cálculo requeridos. Los circuitos ZKP requieren un tiempo de cálculo considerablemente largo, incluso para cálculos que pueden ser fácilmente manejado por software de computadora (esto es particularmente notable cuando se trata de datos de imagen). Por lo tanto, la eficiencia computacional es crucial para el uso práctico.

6.1. Implementación estándar

La sección 4 describe la entrada de datos en el circuito. Para simplificar el circuito procesamiento, los datos cifrados originales se formatearon como datos de imagen de mapa de bits compatibles con estándares OS/2. Los primeros 54 bytes de los datos de la imagen almacenan información como el ancho, alto y profundidad de color de las imágenes [18]. La profundidad del color es de 8 bits y cada color Al componente en RGB se le asigna un byte, lo que da como resultado una representación de 3 bytes por píxel.

Inicialmente, el sistema comprueba si los datos cifrados, introducidos como entrada privada, coincide con el CID proporcionado como entrada pública. Si no coinciden, el sistema indica un error y los datos de la imagen generados como salida son una secuencia de bytes donde todos los valores son 0x00. CID sirve como mecanismo crucial para identificar archivos de forma única y eficientemente Recuperar datos de IPFS. CID tiene dos versiones: V0 y V1 [19]. En este caso, cuanto más flexible Se utilizó la versión CID V1. CID incluye un hash de los datos respectivos, asegurando diferentes Los datos tendrán diferentes CID. Normalmente, el CID V1 se calcula utilizando el hash SHA256. función, y la implementación estándar utiliza SHA256 para calcular CID.

La estructura de datos de CID V1 se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Estructura de datos CID V1.

Posición del byte	Descripción	Valor en la implementación
Primer byte	Prefijo multibase	0x01
Segundo byte	de versión CID	0x55: datos sin procesar
Tercer byte	Identificador de función hash	0x12: SHA-256
Cuarto byte	Longitud del hash	0x20: 32 bytes
Desde el quinto byte	valor hash	Valor hash SHA-256 (32 bytes)

La codificación de CID se realiza utilizando Base32. Base32 codifica una secuencia de bytes construido en base a esta estructura para generar CID.

Dentro del circuito, el valor CID ingresado se decodifica desde Base32 y el sistema comprueba si el valor hash extraído coincide con el hash SHA256 calculado a partir del datos cifrados.

Posteriormente, los datos cifrados se descifran. AES-CTR se utiliza como cifrado algoritmo, que es un tipo de criptografía de clave simétrica. El cifrado AES-CTR y se utilizó el descifrado en circom-chacha20 [20] . Para descifrar el cifrado AES-CTR, Se requieren la clave de cifrado y el nonce utilizados durante el cifrado. Se introducen en el circuito como una clave de 256 bits y un nonce de 128 bits, respectivamente, como entradas privadas. Además, AES-CTR maneja volúmenes de datos en múltiplos de 16. Por lo tanto, si la longitud de la imagen Los datos antes del cifrado no son múltiplos de 16, se agregan ceros (0x00) al final de los datos. para alinearlo con este requisito.

Finalmente, se aplica un filtro a los datos descifrados para incrustar el nombre del destinatario. La implementación de texto incrustado directamente dentro del circuito puede aumentar sustancialmente la carga de cálculo; por lo tanto, se crea un filtro fuera del circuito que realiza una considerable

Machine Translated by Google

parte del procesamiento de la imagen por adelantado. La fuente utilizada para el texto que representa el nombre del destinatario es la fuente Misaki [21]. Luego, el filtro se utiliza para agilizar el procesamiento dentro del circuito. El filtro es una lista de números donde se utilizan valores del 0 al 255 para cambiar el color de cada píxel en caso de que difiera del de los píxeles de la imagen original; además, un valor de 300 indica que el color debe permanecer como en la imagen original. Este filtro representa la posición en la imagen donde se debe insertar el nombre del destinatario.

Dentro del circuito, los colores de píxeles especificados en los datos BMP descifrados se cambian según este filtro.

6.2. Implementación optimizada para ZK

La implementación optimizada para ZK cambia la función hash, la tecnología de cifrado y el procesamiento en circuito a la implementación de cifrado estándar compatible con ZK. Esta implementación mejora la eficiencia computacional y no evalúa la diferencia en las velocidades de cálculo entre el cifrado compatible con ZK y el cifrado general. Por lo tanto, también se modificó el procesamiento en circuito.

El hash Poseidon [22] se utilizó como función hash para calcular el CID. En particular, el uso del hash Poseidon para CID no está oficialmente soportado; por lo tanto, fue desarrollado específicamente para este estudio. Aunque SHA256 se usa comúnmente en cálculos generales, exige un tiempo de cálculo considerable dentro de los circuitos ZKP. El hash Poseidon se implementa en circom y JavaScript (circomlib [23] y circomlibjs [24], respectivamente). Se calcula sobre un campo finito con orden primo y puede aceptar hasta 16 variable El orden utilizado es menor que el máximo de 32 bytes pero mayor que el máximo de 31 bytes. Esto indica que cada una de las 16 entradas debe contener datos que no excedan este orden. En esta implementación, los datos destinados al cálculo hash se dividen en segmentos de 31 bytes como valores de entrada. Si la división supera los 16 segmentos, el hash de Poseidón se calcula para los primeros 16 segmentos. Este resultado se agrega a los siguientes 15 segmentos de datos para una entrada hash Poseidon posterior. El proceso se repite hasta que todos los datos de entrada se utilizan para el cálculo hash. Computacionalmente, si la entrada final no completa 16 segmentos, las entradas faltantes se establecen en cero para garantizar que el cálculo siempre involucre 16

Al generar CID a partir del valor hash de Poseidon, la secuencia de bytes debe seguir la estructura de datos CID V1 y estar codificada en Base32. Sin embargo, para reducir aún más el tiempo de cálculo, esta implementación omite la codificación Base32 y utiliza directamente el valor hash Poseidon como sustituto del CID. Dividir los datos de entrada en 16 segmentos dentro del circuito requiere una gran cantidad de cálculo; por lo tanto, esta división se realiza fuera del circuito y se da como entrada. En este caso, la secuencia de bytes de datos cifrados y la lista de valores para calcular el hash de Poseidón se proporcionan como entradas públicas, lo que permite verificar que ambos conjuntos de datos representan la misma información. Los destinatarios pueden confirmar que los datos que se calculan para el hash de Poseidón y los datos que se descifran en el circuito son idénticos al convertir y verificar mutuamente estos dos valores. En este caso, como los usuarios pueden obtener los datos descifrados, existe la preocupación de que se filtre la contraseña mediante ataques de fuerza bruta u otros medios.

Para la tecnología de cifrado, adoptamos el cifrado Poseidon [25] en lugar del cifrado AES- CTR. El cifrado Poseidon, implementado en circom y TypeScript (poseidon- cryption-circom2 [26]), implica recibir la clave pública del destinatario, generar una clave común y garantizar un cifrado y descifrado seguro por parte de ambas partes. En este caso, sin embargo, se genera directamente una clave común que se utiliza para el cifrado y descifrado. El circuito cuenta con dos valores que representan las coordenadas de una curva elíptica y un valor nonce como entradas privadas para el cifrado. Además, el filtro se implementa de la misma manera que en la implementación estándar.

7. Evaluación

Creamos un programa de muestra basado en las implementaciones antes mencionadas que usa circom para describir el circuito y usa snarkjs para ejecutar el circuito y verificar.

Machine Translated by Google

pruebas. Como bibliotecas criptográficas, circom-chacha20 [20], circomlib [23], circomlibjs [24], y se utilizaron poseidon-encryption-circom2 [26] .

Se implementaron las implementaciones estándar y optimizada para ZK para cada circuito, y sus tiempos de cómputo se compararon durante la ejecución. Imágenes de mapa de bits blancas fueron las imágenes objetivo, y los experimentos se realizaron utilizando la letra "A" como carácter incrustado. Como incrustar cualquier número de caracteres no altera el procesamiento por el filtro, incrustar un solo carácter permitió comparar los tiempos de cálculo. Además, variamos los tamaños de las imágenes para medir los tiempos de ejecución de cada circuito. Los tamaños utilizados fueron 10×10, 15×15, 30×15, 30×30, 60×30, 60×60, 120×60, 120×120, y 180 × 120 píxeles. El entorno de ejecución fue Windows 11 con un Ryzen 9 3950X CPU y 128 GB de RAM operando bajo Ubuntu 22.04 en un entorno WSL2.

La Figura 3 muestra una imagen de ejemplo generada por el circuito, específicamente para el 60 × 30 píxeles. tamaño utilizando la implementación optimizada para ZK. Se presentan los resultados para cada tamaño de imagen. en la Tabla 3, donde las restricciones no lineales indican el número de restricciones no lineales en el circuito, el tiempo de construcción es el tiempo necesario para compilar circom y generar el circuito, y la prueba El tiempo de generación es el tiempo necesario para generar pruebas utilizando el circuito. Como la implementación estándar utiliza cifrado AES-CTR, se añaden datos con 0x00 al final para garantizar que el El tamaño de entrada es múltiplo de 16.

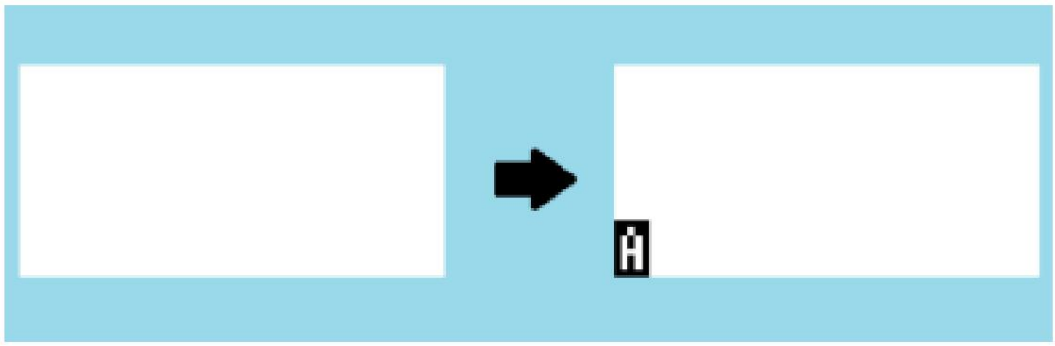


Figura 3. Una imagen generada por el circuito para un tamaño de imagen de 60 × 30 mediante una implementación optimizada para ZK.

Tabla 3. Comparación del tiempo de ejecución del circuito.

	Píxel	Tamaño de la imagen [Byte]	No lineal Restricciones	Tiempo de construcción [EM]	Generación de prueba Tiempo [ms]
Estándar					
	10 × 10	384	558.341	668.220	14.377
	15 × 15	784	1.095.292	1.316.666	25.545
	30 × 15	1440	1.980.688	1.696.370	35.161
	30 × 30	2816	3.867.989	3.657.578	65.785
	60 × 30	5456	7.453.300	7.864.583	126,262
optimizado para ZK					
	10 × 10	376	35.407	128.979	3076
	15 × 15	775	72.725	173.210	4032
	30 × 15	1435	134.663	275.630	5900
	30 × 30	2815	263.450	470.872	9733
	60 × 30	5455	509.375	850.612	17.571
	60 × 60	10.855	1.013.483	1.257.418	29.044
	120 × 120	43.255	4.036.913	6.754.928	96.580

En implementaciones estándar y optimizadas para ZK para 60 × 60 píxeles y 180 × 120 píxeles tamaños de imagen, el sistema se quedó sin memoria y no se pudo completar el cálculo. En la implementación optimizada para ZK, el número de restricciones no lineales se redujo a aproximadamente una décima parte de la implementación estándar para el mismo tamaño de imagen.

Machine Translated by Google

Esto redujo los tiempos de generación de compilación y prueba. Sin embargo, el tamaño máximo de imagen manejable seguía siendo sólo de 120 × 120 píxeles, lo que es considerablemente pequeño para aplicaciones prácticas.

8. Discusión

Aunque se utilizaron tecnologías criptográficas compatibles con ZK y se optimizaron los procesos en el circuito durante la implementación optimizada de ZK, el tamaño máximo de imagen manejable fue de aproximadamente 120 × 120 píxeles. Esto limita la utilidad práctica a tamaños de imagen considerablemente pequeños. Sin embargo, se están realizando investigaciones destinadas a mejorar el rendimiento de los ZKP y los avances tecnológicos futuros pueden permitir el manejo de tamaños de imágenes más grandes. Por ejemplo, Zhang et al. [27] lograron una aceleración diez veces mayor de los zk-SNARK utilizando ASIC. Ma et al. [16] utilizaron de manera similar unidades de procesamiento de gráficos para acelerar el tiempo de generación de pruebas, logrando un rendimiento hasta 48,1 veces más rápido en comparación con los métodos tradicionales. Además, se han propuesto métodos para simplificar los procesos computacionales, como el método del "plegado". Este método comprime las proposiciones que se prueban [28]. A medida que se vayan estudiando progresivamente las mejoras en la velocidad , es probable que también se optimice el consumo de memoria. Esto permitirá potencialmente el manejo de tamaños de imagen más grandes en el futuro.

Además, descubrimos que nuestro método de propuesta puede manejar tamaños de datos de aproximadamente 10 KB. Aunque aplicar directamente nuestra propuesta a datos de imágenes realistas (que van desde varios MB hasta docenas de MB) es un desafío, dividir los datos en fragmentos modificando el cifrado y las cadenas incrustadas podría hacer que la aplicación sea factible.

Además, nuestras implementaciones requieren un valor basado en el tamaño de los datos originales que se procesarán (cifrarán) como argumento durante la generación del circuito. Por lo tanto, se debe generar un circuito para cada dato. El tiempo de generación del circuito (tiempo de construcción) aumenta considerablemente con el tamaño de los datos de la imagen; por ejemplo, incluso en una implementación optimizada para ZK, generar un circuito para un tamaño de imagen de 120 × 120 requiere más de 112 minutos (6,754,9
Sin embargo, una vez generado el circuito, el tiempo de generación de la prueba en las mismas condiciones es corto, aproximadamente 97 s (96,580 ms). En otras palabras, una vez que se genera un circuito, la generación de pruebas no requiere mucho tiempo. Este hecho no plantea ningún problema práctico en los casos en que la misma imagen se distribuye a varias personas.

En las implementaciones compatibles con ZK, los datos cifrados se ingresan como entrada pública. El manejo de claves de cifrado para imágenes requiere una consideración cuidadosa. Los datos gestionados en IPFS privados están cifrados. Sin embargo, si se filtran las claves de cifrado, los datos cifrados podrían descifrarse. Por lo tanto, los usuarios específicos que administran IPFS privados deben convertirse en administradores para administrar cuidadosamente las claves o se podría establecer una cadena de bloques de tipo consorcio en la misma red para establecer y administrar los derechos de acceso de manera adecuada.

9. Conclusiones

En este documento se propuso un nuevo método para distribuir datos almacenados en IPFS privados a entidades externas y al mismo tiempo hacer verificable su autenticidad. El método aplicó un tipo de ZKP, zk-SNARKs, para verificar el CID de los datos e incrustar el nombre del destinatario. Este enfoque permite a entidades externas verificar que los datos recibidos se generan a partir de los datos originales en IPFS privado sin requerir detalles como derechos de acceso a IPFS y claves de cifrado.

Se implementó una implementación estándar que utiliza técnicas criptográficas convencionales y una implementación optimizada para ZK que utiliza esquemas criptográficos compatibles con ZK para mejorar la eficiencia computacional del método propuesto. Los experimentos con un programa de muestra confirmaron la eficacia del método propuesto para un tamaño de datos de imagen de hasta 120 × 120 píxeles.

Este método propuesto amplía la gama utilizable de sistemas de almacenamiento descentralizados a un caso híbrido: distribuye datos internos a entidades externas específicas según sea necesario. Este estudio allana una nueva forma de compartir información confidencial entre diferentes sectores dentro y fuera de un grupo. Sin embargo, para una amplia aplicabilidad práctica del método propuesto a tipos de datos más grandes y diversos, como imágenes y videos, la velocidad de procesamiento debe

Machine Translated by Google

Se deben mejorar y utilizar métodos de división de datos, que están dentro del alcance de nuestros estudios futuros.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, KS, CH, TTC y WO; escritura: preparación del borrador original , KS; redacción: revisión y edición, KS y KI; supervisión, GM; administración del proyecto, KS Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: esta investigación se llevó a cabo como un proyecto de investigación colaborativo entre la Universidad de Tokio y Callisto Inc., financiado por Callisto Inc. Este trabajo ha sido apoyado por la Cátedra Endowed for Blockchain Innovation y el Centro Mohammed bin Salman para la Ciencia y Tecnología Futuras de Arabia Saudita. -Japan Vision 2030 (MbSC2030) en la Universidad de Tokio.

Declaración de disponibilidad de datos: el código fuente utilizado para las simulaciones está disponible en GitHub. https://github.com/blockchaininnovation/circom_image_processing (consultado el 21 de marzo de 2024).

Conflictos de intereses: El autor Changhee Han, Tsz Tat Chu y Wataru Ozaki fueron empleados de la empresa Callisto Inc. Los autores restantes declaran que la investigación se realizó en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un posible conflicto de intereses. .

Referencias

1. Groth, J. Sobre el tamaño de los argumentos no interactivos basados en emparejamientos. En Actas de los avances en criptología – EUROCRYPT 2016: 35.ª Conferencia internacional anual sobre teoría y aplicaciones de técnicas criptográficas, Viena, Austria, 8 a 12 de mayo de 2016; Actas, Parte II 35; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2016; págs. 305–326.
2. Kumar, S.; Bharti, Alaska; Amin, R. Almacenamiento seguro descentralizado de registros médicos utilizando Blockchain e IPFS: una comparación análisis con direcciones futuras. Seguro. Priv. 2021, 4, e162. [Referencia cruzada]
3. Azbeg, K.; Ouchetto, O.; Andaloussi, SJ BlockMedCare: Un sistema sanitario basado en IoT, Blockchain e IPFS para datos seguridad de la gestión. Egipto. Informar. J. 2022, 23, 329–343. [Referencia cruzada]
4. Hossan, MS; Khatun, ML; Rahman, S.; Reno, S.; Ahmed, M. Asegurar el servicio de viajes compartidos utilizando IPFS e Hyperledger basado en blockchain privada. En actas de la 24.ª Conferencia Internacional sobre Informática y Tecnología de la Información (ICCIT) de 2021, Dhaka (Bangladesh), 18 a 20 de diciembre de 2021; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2021; págs. 1–6.
5. Lin, Y.; Zhang, C. Un método para proteger datos privados en IPFS. En actas de la 24.ª Conferencia internacional del IEEE de 2021 sobre trabajo cooperativo en diseño asistido por computadora (CSCWD), Dalian, China, 5 a 7 de mayo de 2021; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2021; págs. 404–409.
6. Battah, AA; Madine, MM; Alzaabi, H.; Yaqoob, I.; Salah, K.; Jayaraman, R. Autorización multipartita basada en Blockchain para acceder a datos cifrados IPFS. Acceso IEEE 2020, 8, 196813–196825. [Referencia cruzada]
7. Huang, HS; Chang, TS; Wu, JY Un sistema seguro para compartir archivos basado en IPFS y blockchain. En Actas de la 2.ª Conferencia Internacional sobre Comunicación Electrónica, Singapur, 8 a 10 de julio de 2020; págs. 96-100.
8. Sol, J.; Yao, X.; Wang, S.; Wu, Y. Esquema de acceso y almacenamiento seguro basado en blockchain para registros médicos electrónicos en IPFS. Acceso IEEE 2020, 8, 59389–59401. [Referencia cruzada]
9. Kang, P.; Yang, W.; Zheng, J. Método de intercambio de almacenamiento de archivos privado Blockchain basado en IPFS. Sensores 2022, 22, 5100. [CrossRef] [PubMed]
10. Uddin, Minnesota; Hasnat, AHMA; Nasrin, S.; Alam, MS; Yousuf, MA Sistema seguro para compartir archivos que utiliza tecnologías blockchain, ipfs y pki. En actas de la Quinta Conferencia Internacional sobre Tecnologías de la Información y las Comunicaciones Eléctricas (EICT) de 2021, Khulna, Bangladesh, 17 a 19 de diciembre de 2021; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2021; págs. 1 a 5.
11. Li, W.; Guo, H.; Nejad, M.; Shen, CC Gestión del tráfico que preserva la privacidad: un enfoque inspirado en blockchain y prueba de conocimiento cero . Acceso IEEE 2020, 8, 181733–181743. [Referencia cruzada]
12. Bellés-Muñoz, M.; Isabel, M.; Muñoz-Tapia, JL; Rubio, A.; Baylina, J. Circom: un lenguaje de descripción de circuitos para la construcción. Aplicaciones de conocimiento cero. Traducción IEEE. Seguridad confiable. Computadora. 2022, 20, 4733–4751. [Referencia cruzada]
13. Sitio web oficial de Circom. Disponible en línea: https://iden3.io/circom (consultado el 24 de marzo de 2024).
14. Repositorio Snarkjs Github. Disponible en línea: https://github.com/iden3/snarkjs (consultado el 4 de junio de 2024).
15. ZCash. Disponible en línea: https://z.cash/ (consultado el 12 de julio de 2024).
16. Ma, W.; Xiong, Q.; Shi, X.; Mamá, X.; Jin, H.; Kuang, H.; Gao, M.; Zhang, Y.; Shen, H.; Hu, W. Gzkp: Un sistema de prueba de conocimiento cero acelerado por GPU. En actas de la 28.ª Conferencia internacional de ACM sobre soporte arquitectónico para lenguajes de programación y sistemas operativos, volumen 2, Vancouver BC Canadá, 25 a 29 de marzo de 2023; págs. 340–353.
17. Han, C.; Shibano, K.; Ozaki, W.; Osaki, K.; Haraguchi, T.; Hirahara, D.; Kimura, S.; Kobayashi, Y.; Mogi, G. Plataforma todo en uno para I+D de IA en imágenes médicas, que abarca la recopilación, selección, anotación y preprocesamiento de datos. En Actas de Medical Imaging 2024: Imaging Informatics for Healthcare, Research and Applications, San Diego, CA, EE. UU., 18 a 23 de febrero de 2024; SPIE: Bellingham, WA, EE. UU., 2024; Volumen 12931, págs. 311–315.
18. Miano, J. Formatos de archivos de imágenes comprimidas: Jpeg, png, gif, xbm, bmp; Addison-Wesley Profesional: Boston, MA, EE. UU., 1999.

Machine Translated by Google

19. Identificadores de contenido (CID). Disponible en línea: https://docs.ipfs.tech/concepts/content-addressing/#cids-are-not-file-hashes (consultado el 24 de marzo de 2024). 20. circom-chacha20
Repositorio Github. Disponible en línea: https://github.com/reclaimprotocol/circom-chacha20 (consultado el 24 marzo de 2024).
21. La fuente japonesa de 8 × 8 puntos “Misaki Font”. Disponible en línea: https://littlelimit.net/misaki.htm (consultado el 11 de junio de 2024). (En japonés)
22. Grassi, L.; Khovratovich, D.; Rechberger, C.; Roy, A.; Schofnegger, M. Poseidon: Una nueva función hash para sistemas de prueba de {conocimiento cero} . En actas del 30.º Simposio de seguridad de USENIX (USENIX Security 21), Vancouver, BC, Canadá, 11 a 13 de agosto de 2021; págs. 519–535.

23. Repositorio Circomlib Github. Disponible en línea: https://github.com/iden3/circomlib (consultado el 21 de marzo de 2024).
24. Repositorio Github de Circomlibjs. Disponible en línea: https://github.com/iden3/circomlibjs (consultado el 21 de marzo de 2024).
25. Khovratovich, D. Cifrado con Poseidón. 2019. Disponible en línea: https://drive.google.com/file/d/1EVrP3DzoGbmzkRmYnyEDcIQcXVU7GlOd/vista (consultado el 19 de julio de 2024).
26. Repositorio Github Poseidon-Encryption-Circom2. Disponible en línea: https://github.com/Shigoto-dev19/poseidon-encryption-c ircom2 (consultado el 21 de marzo de 2024).
27. Zhang, Y.; Wang, S.; Zhang, X.; Dong, J.; Mao, X.; Largo, F.; Wang, C.; Zhou, D.; Gao, M.; Sun, G. Pipezk: Acelerando la prueba de conocimiento cero con una arquitectura canalizada. En actas del 48.º Simposio internacional anual sobre arquitectura informática (ISCA) de ACM/IEEE de 2021, Valencia, España, 14 a 18 de junio de 2021; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2021; págs. 416–428.
28. Kothapalli, A.; Setty, S.; Tzialla, I. Nova: Argumentos recursivos de conocimiento cero a partir de esquemas plegables. En Actas de la Conferencia Anual Internacional de Criptología, Santa Bárbara, CA, EE. UU., 15 a 18 de agosto de 2022; Springer: Cham, Suiza, 2022; págs. 359–388.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Investigación y mitigación del equilibrio entre desempeño y equidad mediante el muestreo de categorías protegidas

Gideon Popoola y John Sheppard *

Escuela de Computación Gianforte, Universidad Estatal de Montana, Bozeman, MT 59717,
EE. UU.; gideon.popoola@student.montana.edu
* Correspondencia: john.sheppard@montana.edu

Resumen: Los algoritmos de aprendizaje automático se han vuelto comunes en la toma de decisiones cotidiana y los sistemas de asistencia a las decisiones son omnipresentes en nuestra vida cotidiana. Por lo tanto, en los últimos años ha aumentado la investigación sobre la prevención y mitigación del posible sesgo e injusticia de las predicciones realizadas por estos algoritmos . La mayoría de las investigaciones sobre equidad y mitigación de sesgos en el aprendizaje automático a menudo tratan cada variable protegida por separado, pero en realidad, es posible que una persona pertenezca a múltiples categorías protegidas. Por lo tanto, en este trabajo se examinó la combinación de un conjunto de variables protegidas y la generación de nuevas columnas que separan estas variables protegidas en muchas subcate Estas nuevas subcategorías tienden a estar extremadamente desequilibradas, por lo que la mitigación del sesgo se abordó como un problema de clasificación desequilibrada. Específicamente, se desarrollaron e investigaron cuatro nuevos métodos de muestreo personalizados para muestrear estas nuevas subcategorías. Estos nuevos métodos de muestreo se conocen como sobremuestreo de categoría protegida, muestreo proporcional de categoría protegida, técnica de sobremuestreo de minoría sintética de categoría protegida (PC-SMOTE) y muestreo sintético adaptativo de categoría protegida (PC-ADASYN). Estos métodos de muestreo modifican el método de muestreo existente al centrar su muestreo en las nuevas subcategorías en lugar de en la etiqueta de clase. Luego se evaluó el impacto de estas estrategias de muestreo con base en el desempeño clásico y la equidad en los entornos de clasificación.
El rendimiento de la clasificación se midió usando precisión y F1 basado en el entrenamiento de árboles de decisión univariados, y la equidad se midió usando diferencias impares ecualizadas y paridad estadística. Para evaluar el impacto de la equidad versus el desempeño, estas medidas se evaluaron en comparación con la profundidad del árbol de decisiones. Los resultados muestran que los métodos propuestos pudieron determinar puntos óptimos, mediante los cuales la equidad aumentó sin disminuir el desempeño, mitigando así cualquier posible compensación entre desempeño y equidad.

Palabras clave: equidad; categorías protegidas; aprendizaje automático; muestreo

check for updates

Cita: Popoola, G.; Sheppard, J.
Investigar y mitigar el
Compensación entre desempeño y equidad a través de
Muestreo de categoría protegida.
Electrónica 2024, 13 , 3024. https://doi.org/
10.3390/electronics13153024

Editores académicos: Niusha Shafiabady y
Jianlong Zhou

Recibido: 11 de junio de 2024
Revisado: 23 de julio de 2024
Aceptado: 24 de julio de 2024
Publicado: 31 de julio de 2024

Copyright: © 2024 por los autores.
Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.
Este artículo es un artículo de acceso abierto.
distribuido bajo los términos y
condiciones de los Creative Commons
Licencia de atribución (CC BY)
(https:// creativecommons.org/licenses/by/
4.0/).

1. Introducción

A medida que los algoritmos de aprendizaje automático (ML) dominan cada vez más los sistemas de toma y asistencia de decisiones, su implementación generalizada en varios sectores plantea cuestiones apremiantes sobre la equidad y transparencia de sus predicciones [1]. El potencial de estos algoritmos para perpetuar o exacerbar los prejuicios sociales existentes ha impulsado un importante conjunto de investigaciones para investigar y mitigar la injusticia algorítmica. Esto es fundamental porque las decisiones influenciadas por estos algoritmos impactan profundamente a los individuos, afectando los resultados en ámbitos que van desde las finanzas y el empleo hasta la justicia penal y la atención médica [2].

La fuente de injusticia y sesgo en el LD es multifacética [3]. En particular, es posible que la injusticia surja directamente de los propios algoritmos de ML debido a una posible desalineación del sesgo inductivo subyacente de los algoritmos con respecto al concepto objetivo y la distribución de datos. Esto se conoce como sesgo algorítmico. Una preocupación alternativa radica en el posible sesgo residente en los datos utilizados para entrenar los modelos donde, como resultado directo del supuesto típico de "independiente e idénticamente distribuido" (IID) empleado en la mayoría de M

Machine Translated by Google

Con estos métodos, el resultado del aprendizaje es propagar el sesgo en las predicciones de manera que coincidan con el sesgo de los datos subyacentes. Esta última situación es la que constituye el foco de nuestro trabajo aquí.

1.1. Sesgo e injusticia en el aprendizaje automático

El sesgo es el trato perjudicial, injusto o desigual de un individuo o grupo basado en características específicas, a menudo denominadas características sensibles o protegidas [4]. Ejemplos de estas características protegidas incluyen la edad, la raza, la discapacidad, el sexo y el género [5]. El sesgo en el LD se puede dividir a grandes rasgos en trato desigual (injusticia directa) y trato de impacto (injusticia indirecta) [6]. La injusticia directa ocurre cuando las características protegidas se utilizan explícitamente al tomar decisiones. La injusticia indirecta se ha vuelto cada vez más común hoy en día. Este tipo de injusticia no utiliza atributos protegidos explícitamente; en cambio, ocurre cuando la dependencia de variables asociadas con estos atributos da como resultado resultados significativamente diferentes para los grupos protegidos. Estas otras variables se conocen como funciones proxy. Ejemplos de sesgo en el mundo real incluyen la práctica histórica estadounidense de “línea roja”, donde se negaban hipotecas a residentes de códigos postales predominantemente habitados por minorías, el sesgo de género en el proceso de contratación de Amazon, el sesgo racial del dispensador de jabón de Google, etc. [7].

Aunque estas herramientas de asistencia para la toma de decisiones ayudan a automatizar el proceso de toma de decisiones, pueden dar lugar a un trato injusto de individuos o grupos, tanto directa como indirectamente [8]. La injusticia puede ocurrir en varias áreas del modelado, como en el conjunto de datos de entrenamiento. Esto puede suceder cuando el conjunto de datos de entrenamiento no proporciona una representación justa de las categorías protegidas, por lo que la “verdad fundamental” se vuelve difícil de determinar. Por ejemplo, consideremos un conjunto de datos de una empresa en la que un grupo específico ha enfrentado históricamente discriminación. Específicamente, supongamos que las empleadas de esta empresa no han sido promovidas como sus homólogos masculinos, quienes, por el contrario, han experimentado un avance profesional, a pesar de que ambos grupos se desempeñan al mismo nivel. En esta situación, el verdadero valor de las contribuciones de las empleadas (la verdad básica) no es visible. Como resultado, es probable que un algoritmo de aprendizaje automático entrenado con estos datos detecte e incorpore este sesgo, perpetuando así los prejuicios existentes. Esto podría llevar a que el algoritmo tome decisiones discriminatorias, como recomendar candidatos masculinos para contratación o ascenso con más frecuencia que candidatas igual o más calificadas.

Otra área donde puede ocurrir injusticia es en el propio algoritmo de ML [9]. Los algoritmos de ML aún pueden producir decisiones discriminatorias, incluso cuando se entrenan en un conjunto de datos imparcial donde la “verdad fundamental” se representa con precisión. Esta situación surge cuando los errores del sistema afectan de manera desproporcionada a los individuos de un grupo o minoría específica. Por ejemplo, considere un algoritmo de detección de cáncer de mama que muestra tasas de falsos negativos significativamente más altas para personas negras en comparación con personas blancas, lo que significa que no logra identificar el cáncer de mama con más frecuencia en pacientes negras que en pacientes blancas. Si este algoritmo se utiliza para informar las recomendaciones de tratamiento, desaconsejaría erróneamente el tratamiento para un mayor número de personas negras que blancas, lo que generaría disparidades raciales en los resultados de la atención médica. Esto subraya la necesidad crítica de garantizar que los algoritmos funcionen de manera equitativa en todos los grupos en términos de sus datos de entrenamiento y cómo sus errores afectan a las diferentes poblaciones. Los resultados de la literatura anterior han reportado varios casos de algoritmos que resultan en un trato injusto, por ejemplo, líneas rojas y perfiles raciales [10], discriminación hipotecaria [11], empleo y selección de personal [12].

Si bien se han dirigido esfuerzos considerables a abordar el sesgo en las predicciones de ML [13,14], gran parte de la investigación existente se ha centrado en mitigar el sesgo para atributos protegidos únicos de forma aislada [15]. Por ejemplo, en un conjunto de datos con dos atributos protegidos, raza y sexo, la mayoría de los enfoques existentes pueden aprender un modelo justo que incluya raza o un modelo justo que incluya sexo, pero no un modelo justo que incluya raza y sexo [7]. Sin embargo, las identidades del mundo real no son singulares; son complejos y multifacéticos, y los individuos a menudo pertenecen a múltiples grupos protegidos simultáneamente [16]. Por ejemplo, un individuo puede ser discriminado por varios atributos protegidos, como edad, raza y sexo simultáneamente. Esta interseccionalidad puede conducir a formas compuestas de sesgo y

Machine Translated by Google

discriminación, que no se abordan adecuadamente mediante intervenciones de equidad de una sola variable. Por lo tanto, es fundamental desarrollar metodologías que aborden de manera integral la naturaleza multidimensional de las identidades personales. Este proyecto busca cerrar esta brecha considerando combinaciones de categorías protegidas, sintetizando así estas categorías protegidas en grupos integrales de múltiples categorías, y apunta a abordar las complejidades estratificadas del sesgo de manera más efectiva utilizando métodos novedosos de muestreo de categorías protegidas, reconociendo y abordando así la naturaleza multifacética. de identidades personales y posibles sesgos.

El trabajo presentado en este artículo está motivado por el problema de utilizar algoritmos de ML para la toma de decisiones en áreas socialmente sensibles como la evaluación de préstamos, la contratación o la evaluación de hipotecas, trabajando con esta situación donde un individuo puede pertenecer a varias categorías protegidas . Dado un conjunto de datos de entrenamiento etiquetado que contiene dos o más características protegidas, el método propuesto combina estos atributos protegidos y luego los divide en nuevas multicategorías. Es probable que estas nuevas categorías estén extremadamente desequilibradas y es necesario equilibrarlas para mejorar la equidad de la predicción de nuestros algoritmos de ML. Los métodos de muestreo populares , como el sobremuestreo [17], la técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas (SMOTE) [18], el muestreo sintético adaptativo (ADASYN) [19], etc., muestrean datos entre etiquetas de clases, lo que no se alinea con el objetivo de nuestra investigación de muestreo en las nuevas multicategorías. Por lo tanto, se propone una nueva clase de modificaciones de estos métodos de muestreo que pueden muestrear a través de la nueva categoría en lugar de etiquetas de clase. Esta nueva clase de muestreo modificado se denomina muestreo de categoría protegida. Los métodos de muestreo de categorías protegidas propuestos resultantes se utilizan para muestrear y equilibrar las nuevas categorías antes de realizar la clasificación. La novedad de esta obra es doble. En primer lugar, el enfoque propuesto combina las categorías protegidas para formar nuevas multicategorías que imitan la identidad del ser humano en el mundo real. El segundo es la modificación de los métodos de muestreo existentes para ajustarlos al muestreo de estas nuevas categorías a fin de garantizar que todas las nuevas categorías tengan el mismo número de insta

Sólo con fines de demostración, se eligió un árbol de decisión univariado como algoritmo de clasificación. La intención es demostrar los efectos de los diferentes métodos de muestreo en el desempeño, esperando que se muestren tendencias similares independientemente del método de aprendizaje subyacente. El método de muestreo propuesto se comparó con la línea de base (datos no muestreados) utilizando precisión y F1 como métricas de desempeño de clasificación, así como diferencias de probabilidades igualadas y paridad estadística como métricas de equidad. Además, se realizaron varios análisis para mostrar cómo la profundidad máxima en el árbol de decisión afecta tanto a la precisión como a la equidad.

1.2. Pregunta de

investigación Partiendo de la observación empírica de que a veces existe una compensación entre la equidad y el rendimiento del ML [20], esta investigación intenta responder varias preguntas, como por ejemplo, cómo se podría mitigar esta compensación. En particular, buscamos responder si el método de muestreo de categorías protegidas para abordar la equidad puede mitigar esta compensación. Además, ¿podemos desarrollar un marco metodológico que mitigue eficazmente los sesgos entre estas variables protegidas combinadas sin comprometer la precisión predictiva de los modelos de ML? Finalmente, planeamos responder a la pregunta de cómo la profundidad de un árbol de decisión afecta tanto a las métricas de precisión como a las de equidad, explorando así la relación entre el nivel de ajuste (de subajuste a través de sobreajuste) y la equidad.

1.3. Hipótesis

Nuestra hipótesis es que, al emplear técnicas sofisticadas de muestreo de categorías protegidas diseñadas para estos grupos multicategorías recientemente formulados, podemos aumentar significativamente la equidad del modelo en términos de diferencias de probabilidades igualadas sin disminuir el rendimiento de la clasificación en términos de precisión y F1. Además, exploramos el delicado equilibrio entre equidad y precisión, planteando la hipótesis de que es posible identificar puntos estratégicos donde se puede maximizar la equidad sin impactos perjudiciales en el desempeño.

Esta investigación cuestiona las afirmaciones existentes sobre la existencia de compensaciones en materia de equidad y LD.

Machine Translated by Google

predicción. Prepara el escenario para futuras exploraciones sobre la naturaleza multidimensional de la identidad y la discriminación en los sistemas de decisión automatizados.

1.4. Contribuciones

El amplio problema de la equidad en el aprendizaje automático es importante porque la prevalencia de los sistemas de IA y ML en la actualidad está teniendo un impacto importante en las vidas y los medios de subsistencia de las personas. Si bien la atención al lavado de dinero justo ha aumentado sustancialmente, sigue siendo necesario contar con métodos para promover el lavado de dinero justo sin afectar negativamente el rendimiento del lavado de dinero. Con base en una revisión en profundidad de la literatura y la necesidad mencionada anteriormente de este tipo de trabajo, los métodos reportados aquí hacen las siguientes

contribuciones:

1. La suposición comúnmente aceptada de que existe un compromiso inherente entre equidad y desempeño (es decir, precisión) en el aprendizaje automático se enfrenta al desafío con evidencia proporcionada para respaldar este desafío. En particular, los resultados de este artículo indican que dicha compensación puede mitigarse, lo que sugiere que lo más probable es que cualquier compensación esté ligada a cómo se gestionan los datos.
2. Se presentan cuatro métodos novedosos de preprocesamiento para el muestreo de datos basados en la aplicación de una estrategia de muestreo multicategoría utilizando datos capturados en categorías protegidas. Los métodos parten del supuesto y la hipótesis correspondiente de que equilibrar los datos en función de estas propiedades multicategoría puede aumentar la equidad sin afectar negativamente el rendimiento del modelo de aprendizaje automático.
3. Los resultados experimentales se presentan utilizando tres conjuntos de datos estudiados exhaustivamente dentro de la comunidad justa de ML. Los experimentos incluyen comparaciones con métodos tradicionales de entrenamiento sin remuestreo para demostrar los efectos relativos de los métodos propuestos. Los resultados demuestran que dos de los métodos propuestos, la técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas de categoría protegida (PC-SMOTE) y el muestreo sintético adaptativo de categoría protegida (PC-ADASYN), son particularmente eficaces para mejorar tanto la equidad como el rendimiento.
4. Se presenta un análisis detallado que relaciona los efectos potenciales del desajuste y el sobreajuste en la equidad examinando diferentes niveles en un modelo de árbol de decisión, con y sin el uso de los métodos de muestreo propuestos. Los resultados demuestran la capacidad de los métodos propuestos para identificar un nivel ideal del árbol donde se maximizan tanto la equidad como la precisión.

Como resultado de las contribuciones anteriores, este trabajo representa un importante paso adelante para abordar las preocupaciones sobre la equidad en el aprendizaje automático. Una conclusión clave de los métodos y resultados presentados aquí es que se puede abordar la equidad sin comprometer el rendimiento del modelo.

1.5. Organización

Este documento está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2, se presenta una explicación detallada de la equidad y una discusión de varias métricas técnicas de equidad. Luego, en la Sección 3, se describe la literatura previa relacionada con las estrategias de mitigación de sesgos. En la Sección 4, describimos nuestras técnicas de muestreo propuestas, el conjunto de datos y el enfoque para el ajuste de hiperparámetros. En la Sección 5, presentamos los resultados de varios experimentos junto con pruebas de hipótesis estadísticas como medio para validar estos resultados. En la Sección 6, se analizan los resultados experimentales y se analiza cómo se desempeña cada algoritmo en cada conjunto de datos y cada métrica. También se presentan más resultados sobre el impacto de la profundidad del árbol en la equidad y la precisión . En la Sección 7, se presentan las limitaciones de este trabajo y las direcciones correspondientes para trabajos futuros , y la Sección 8 presenta una serie de conclusiones.

2. Antecedentes

Este estudio considera la equidad al predecir un resultado y Y a partir de un conjunto de características, tures x X Rd y algunos atributos protegidos adicionales s S Rp género y sexo. Por，como raza, ejemplo, en la predicción de préstamos, x representa el historial financiero de un solicitante, s es su raza y género autoinformados e y es si su préstamo está aprobado.

Machine Translated by Google

o negado. Un modelo de predicción se considera justo si sus errores se distribuyen uniformemente entre grupos protegidos, como diferentes razas o géneros. Las predicciones de clase a partir de los datos de entrenamiento D se denotan como Yˆ D := h(x, s) para algunos h : X × S → Y de una clase H. Se supone que los atributos protegidos s S en nuestro estudio son binarios con un valor n que denota el grupo sin privilegios. Por ejemplo, S podría ser raza yn "no blanco"; por lo tanto, la naturaleza binaria de S es {w, n} donde w representa a los solicitantes blancos, que son el grupo privilegiado, y n representa a los solicitantes no blancos, que son el grupo no privilegiado. La definición se puede generalizar aún más a casos no binarios.

X , La discriminación en conjuntos de datos etiquetados se puede definir como un conjunto de datos D, un conjunto de características y un conjunto de atributos protegidos S con valor de dominio {w, n}. La discriminación en D con respecto al grupo S = n denotado como diss=n(D) se define como

$$\text{diss=n(D)} = \left|\frac{|\{x \quad D : x(s) = w, h(x) = +\}|}{\{x \quad D : x(s) = w\}|} - \frac{|\{x \quad D : x(s) = n, h(x) = +\}| \; |\{x}{D : x(s) = n\}|}\right.$$

La definición anterior se puede traducir a la diferencia en la probabilidad de que un solicitante esté en la clase positiva para cada dominio de atributos protegidos {w, n}. Nuestro estudio amplía la definición anterior al considerar el conjunto de datos D, que contiene dos o más atributos protegidos.

Se utilizan dos métricas de equidad populares. La primera es la diferencia impar igualada (EOD), que mide qué tan discriminativa o justa es nuestra predicción. EOD establece que un clasificador binario yˆ es justo si su tasa de falsos negativos (FNR) y su tasa de verdaderos positivos (TPR) son iguales en todo el dominio de S [21]. FPR y TPR con respecto al atributo protegido s S con valor n se pueden definir como

$$TPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 1, S = n)$$

$$FPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = n)$$

Luego, EOD se define matemáticamente como la diferencia entre TPR y FPR entre diferentes grupos en un atributo protegido. Eso es,

$$EOD = TPRn(\hat{y}) - FPRn(\hat{y}).$$

Un clasificador justo tiene una EOD de 0, mientras que un clasificador injusto tiene una EOD de 1. Aunque lograr un clasificador completamente justo en la práctica es casi imposible, esta investigación está orientada a mejorar la EOD sin disminuir la precisión. Luego, para EOD,

$$FPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = n) = TPRn(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 1, S = n)$$

y

$$FPRw(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = w) = TPRw(\hat{y}) = P(\hat{y} = 1|y = 0, S = w)$$

Para extender la definición de EOD anterior a nuestra multicategoría, el EOD se calcula para cada columna, luego el macropromedio del EOD se presenta como el EOD final. La segunda métrica utilizada para medir la equidad en la predicción de ML es la paridad estadística (SP). SP define la equidad como una probabilidad igual de ser clasificado como positivo [22]. Esto puede interpretarse como que cada grupo de un atributo protegido tiene la misma probabilidad de ser clasificado con un resultado positivo.

$$P(\hat{y} = 1|S = w) = P(\hat{y} = 1|S = n)$$

3. Revisión de la literatura

Inicialmente se podría suponer que los algoritmos de aprendizaje automático, cada vez más utilizados para la toma de decisiones en aplicaciones críticas como reincidencia, calificación crediticia, decisiones de préstamos, etc., son justos y están libres de sesgos inherentes. Sin embargo, en realidad, pueden heredar cualquier sesgo o discriminación presente en los datos con los que están capacitados, como señaló Burt [23]. Además, simplemente eliminar las variables protegidas del conjunto de datos es insuficiente para abordar la discriminación indirecta y

Machine Translated by Google

de hecho, podría ocultarlo. Este reconocimiento ha aumentado la necesidad de herramientas más avanzadas, lo que hace que descubrir y prevenir la discriminación sea un área importante de investigación, como lo destacan [24-27].

El sesgo en el aprendizaje automático es un tema de rápido crecimiento en la comunidad de investigación del aprendizaje automático. El sesgo en un modelo de LD puede conducir a un trato injusto de las personas que pertenecen a ciertos grupos protegidos. Últimamente, los líderes industriales han comenzado a poner cada vez más énfasis en el sesgo en los modelos y software de ML. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) [28], Microsoft [29] y la Unión Europea [30] han publicado recientemente principios para guiar una conducta justa en IA. Estas organizaciones han declarado que los modelos de ML deben ser justos en aplicaciones del mundo real . Las estrategias de mitigación de sesgos implican modificar uno o más de los siguientes para garantizar que las predicciones realizadas por el algoritmo ML estén menos sesgadas: (a) los datos de entrenamiento, (b) el algoritmo ML y (c) las predicciones resultantes. Estos se clasifican, respectivamente, en enfoques de preprocesamiento [31], procesamiento interno [32] y posprocesamiento [21].

En primer lugar, los datos de entrenamiento se pueden preprocesar para reducir la injusticia o el sesgo antes de entrenar el modelo. Kamiran y Calders [6] sugieren muestrear o reponderar los datos para neutralizar la discriminación. Este enfoque puede ajustar la representación o importancia de ciertos puntos de datos para favorecer (o reducir el favor) a una clase sobre otra. Otro método implica cambiar los registros de datos individuales directamente para reducir la discriminación, como lo explora [33]. Por ejemplo, este enfoque implica alterar los valores en un conjunto de datos para disminuir los sesgos identificables contra ciertos grupos. Además, el concepto de cercanía t, introducido por Sondeck et al. [34], se aplica al control de la discriminación en el trabajo de [35]. El uso de t-closeness garantiza que la distribución de atributos sensibles en cualquier grupo determinado sea cercana a la distribución del atributo en todo el conjunto de datos, preservando así la privacidad y evitando la discriminación basada en atributos sensibles. Un hilo común entre estos enfoques es equilibrar el control de la discriminación con la utilidad de los datos procesados, es decir, minimizar el sesgo sin comprometer significativamente la precisión, representatividad y utilidad general de los datos para el modelado o análisis predictivo. Este equilibrio es esencial para garantizar que los esfuerzos por promover la equidad no reduzcan inadvertidamente la calidad o aplicabilidad de los datos.

En general, el método de preprocesamiento se puede dividir en tres categorías: (1) modificación de datos, (2) eliminación de datos y (3) remuestreo de datos. Los métodos de la primera categoría tienen como objetivo modificar los valores de los puntos de datos de entrenamiento (incluidos los valores de atributos protegidos, los valores de clase y los valores de características) para reducir el sesgo en el conjunto de datos. Un ejemplo de este método es el masaje de datos propuesto por [15]. Su enfoque clasifica los datos de entrenamiento y se invierten los datos cercanos al límite de decisión tanto en los grupos privilegiados como en los no privilegiados. Alternativamente, Fahse et al propusieron un método de preprocesamiento optimizado que aprende una transformación probabilística que edita las clases y características con distorsión individual y equidad grupal . [23]. En [36], los valores de los atributos originales se reemplazan con valores elegidos independientemente de la etiqueta de clase para entrenar un modelo que logra aproximadamente probabilidades igualadas. De manera similar, Peng et al. [37] reemplazan los valores de los atributos protegidos con valores predichos en función de otros atributos, similar a la imputación de datos.

Los métodos de la segunda categoría tienen como objetivo entrenar un modelo justo eliminando ciertas características del conjunto de entrenamiento. Un ejemplo de este método es la supresión de datos propuesta por Dhar et al. [38]. En su artículo, los atributos y características protegidos que están altamente correlacionados con los atributos protegidos, también conocidos como atributos proxy, se eliminan del conjunto de datos para entrenar un modelo justo.

Los métodos de la tercera categoría tienen como objetivo entrenar un modelo justo, ya sea ajustando las ponderaciones de la muestra o sobremuestreando el conjunto de datos. Por ejemplo, Krasanakis et al. [39] propusieron un método de reponderación que adapta iterativamente los pesos de las muestras de entrenamiento con un modelo fundamentado teóricamente para mitigar el equilibrio entre sesgo y precisión. En [40], Chakraborty et al. propuso FairSMOTE como un método para sobremuestrear puntos de entrenamiento de grupos minoritarios con puntos de datos artificiales basados en la Técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas (SMOTE) [18], para lograr distribuciones de clases equilibradas. Además, Yan et al. [41] propusieron sobremuestrear los datos de entrenamiento de los grupos minoritarios con puntos de datos artificiales para lograr una distribución equilibrada de clase

Machine Translated by Google

ciones. A diferencia de FairSMOTE, los autores se centraron en escenarios en los que se desconocen los atributos protegidos y aplicaron un método de agrupación para identificar diferentes grupos demográficos.

El procesamiento interno implica métodos que modifican la forma en que se entrena un modelo de ML como medio para reducir el sesgo. En [42], se propuso un enfoque contradictorio para eliminar el sesgo. Este enfoque aprende un clasificador para aumentar la precisión y la equidad en la predicción al incluir una variable para el grupo interesado al aprender simultáneamente un predictor y un adversario. Esto conduce a la generación de un clasificador imparcial porque las predicciones no contienen ninguna información de discriminación grupal que el adversario pueda utilizar. Alternativamente, en [43] se propuso un algoritmo que toma una métrica de equidad como parte de la función de pérdida y devuelve un modelo entrenado para esa métrica de equidad . Kamishima et al. [22] propusieron un método de regularización, que incluía un término de penalización en la función de pérdida de un clasificador para producir una predicción insesgada. Zafar et al. [44] desarrollaron un nuevo método de ponderación mediante el cual ajustan el peso de la muestra para cada dato de entrenamiento para lograr un objetivo de equidad específico, como probabilidades igualadas en los datos de validación. Recientemente, la mitigación de sesgos se ha abordado como un problema de optimización restringida agregando una restricción de equidad y optimizando la pérdida para que sea consistente con esa restricción [45,46]. Además, algunos trabajos modifican las redes neuronales mediante el uso de abandono para eliminar neuronas que pertenecen a atributos prot

Los métodos de posprocesamiento mitigan el sesgo después de ajustar un modelo de ML e incluyen enfoques como calibración, optimización de restricciones y umbrales de transformación [6]. Dichos métodos proponen un algoritmo que proporciona resultados favorables a los grupos desfavorecidos y resultados desfavorables a los grupos favorables dentro de un intervalo de confianza determinado alrededor del límite de decisión con la mayor incertidumbre. Por ejemplo, un enfoque modifica los umbrales máximos del clasificador para producir un objetivo específico de igualdad de oportunidades o de probabilidades igualadas. Otro enfoque más implica mutar aleatoriamente las clases de ciertas predicciones en clases diferentes [48].

Varios estudios nuevos [49,50] combinaron preprocesamiento, procesamiento interno o posprocesamiento para formar un método conjunto. Por ejemplo, Bhaskaruni et al. [50] combinan el sobremuestreo de la clase protegida por desequilibrio con un límite de decisión que cambia un método de posprocesamiento para abordar el problema de la injusticia.

Los investigadores han profundizado en varios conceptos de discriminación y equidad dentro de la toma de decisiones algorítmica. El impacto dispar (anteriormente denominado equidad indirecta), por ejemplo, se mide a través de la paridad estadística y la equidad grupal, como lo analizan Bhaskaruni et al. [50]. Por otro lado, el concepto de justicia individual, también introducido por Bhaskaruni et al., enfatiza que individuos similares deben ser tratados de manera similar, independientemente de su afiliación grupal. Este enfoque se centra en la equidad a nivel individual , asegurando que las decisiones se tomen basándose en atributos relevantes en lugar de estereotipos o prejuicios grupales .

En clasificadores y otros modelos predictivos, lograr tasas de error iguales entre diferentes grupos es un objetivo clave, como destacan Zhang y Neill [16]. De manera similar, asegurar la calibración o la ausencia de sesgo predictivo en las predicciones, como discuten Hardt et al. [21], es crucial. Sin embargo, Dwork et al. exploran la tensión entre estas nociones (calibración y tasas de error iguales) . [51] y Pleiss et al. [52], lo que indica que satisfacer ambos simultáneamente puede ser un desafío. Karimi-Haghighi y Castillo [53] presentan trabajos relacionados que exploran las complejidades inherentes a lograr la equidad algorítmica. Friedler et al. [54] examina más a fondo las ventajas y desventajas de cumplir con varias definiciones de equidad algorítmica, especialmente desde una perspectiva de seguridad pública. Dado que nuestro trabajo se centra en el preprocesamiento en lugar del modelado, consideraciones como las tasas de error equilibradas y el sesgo predictivo se vuelven menos directamente aplicables.

Según nuestra revisión de varios métodos de preprocesamiento, parece que no se ha realizado ningún trabajo que intente modelar la equidad para dos o más atributos protegidos simultáneamente. Además, el método de muestreo utilizado en trabajos anteriores se centró únicamente en el muestreo basado en etiquetas de clase en lugar de en las categorías protegidas. Por lo tanto, en este artículo se enfatiza el preprocesamiento, ya que representa el aspecto más adaptable del proceso de ciencia de datos [55]. El preprocesamiento se distingue porque no depende de la elección del algoritmo de modelado y puede realizarse sin proble

Machine Translated by Google

incorporados con mecanismos de divulgación y publicación de datos. Esta independencia y flexibilidad hacen que el preprocesamiento sea fundamental para garantizar la calidad y la equidad de los datos antes de que se produzca cualquier modelado analítico o predictivo. Finalmente, nos centramos en nuevos métodos de muestreo personalizados que muestrean la categoría protegida en el entrenamiento de datos para construir un modelo justo.

4. Metodología El

objetivo de nuestro trabajo es explorar métodos de muestreo para mejorar la equidad en ML sin que el rendimiento de predicción correspondiente se vea afectado, mitigando así el equilibrio entre equidad y desempeño . Como resultado, se proponen cuatro métodos de muestreo novedosos enfocados a lograr este objetivo. Estos métodos de muestreo abordan el problema de desequilibrio de clases que plantea la nueva multicategoría generada debido a la combinación de las categorías protegidas. Se necesitan métodos de muestreo personalizados porque los métodos existentes muestrean datos basándose en clases minoritarias y mayoritarias, pero para mitigar la equidad, las nuevas multicategorías se muestrean para que sean iguales. Esto, a su vez, exige modificar los métodos de muestreo existentes para muestrear datos basados en estas nuevas categorías. Esto conduce a cuatro nuevos métodos de muestreo: sobremuestreo de categoría protegida, muestreo proporcional de categoría protegida, SMOTE de categoría protegida (PC- SMOTE) y ADASYN de categoría protegida (PC-ADASYN).

4.1. Sobremuestreo de categorías

protegidas En el sobremuestreo de categorías protegidas, el primer paso es combinar las categorías protegidas en el conjunto de datos y codificar la combinación para producir nuestra nueva multicategoría. Por ejemplo, en el conjunto de datos de Ingresos de Adultos, la edad (joven y adulto), la raza (blanca y otros) y el sexo (masculino y femenino) se combinan para generar ocho nuevas categorías, que se convierten en ADULTOWHITEMALE, ADULTOTHERSMALE, YOUNGWHITEMALE, YOUNGOTHERSMAIL, ADULTWHITEFEMALE, MUJER ADULTA, MUJER BLANCA JOVEN y MUJER OTRA JOVEN, respectivamente. Estas nuevas categorías tienen diferentes tamaños de muestra, y el objetivo de nuestro sobremuestreo de categoría protegida es equilibrar esta nueva categoría de modo que el tamaño de muestra de cada una de las nuevas categorías coincida con el tamaño de la categoría con el tamaño de muestra más alto. Para evitar la fuga de datos, el conjunto de datos se separa en tren y prueba, aplicando sobremuestreo solo en los datos de entrenamiento y luego probando en un conjunto de prueba sin muestrear.

El pseudocódigo del Algoritmo 1 muestra en detalle nuestro método de sobremuestreo de categoría protegida. En el algoritmo, se utilizó la categoría más grande como línea de base porque es la categoría con el tamaño de muestra más alto. El proceso de muestreo da como resultado nuevos datos de entrenamiento con un tamaño de muestra equilibrado en toda la nueva categoría. El algoritmo funciona muestreando el resto de las categorías protegidas para que coincidan con el tamaño de muestra de la línea de base. Este muestreo se realiza repitiendo las categorías varias veces junto con sus etiquetas de clase.

4.2. Muestreo proporcional de categoría protegida

El método de muestreo proporcional de categoría protegida es una generalización del sobremuestreo de categoría protegida porque el proceso comienza estableciendo un tamaño de muestra objetivo (que es un hiperparámetro que se debe ajustar, en lugar de solo el tamaño de la multicategoría más grande), denominado targetSamples. Esto corresponde al número deseado de instancias necesarias para cada categoría. Este objetivo garantiza la uniformidad en todas las categorías, mitigando el riesgo de sesgo del modelo hacia categorías más frecuentes. El resultado típico de aplicar este método es que algunas categorías que tienen más muestras que las muestras objetivo se submuestrearán mientras que otras se sobremuestrearán para producir una proporción igual de ellas en el conjunto de datos de entrenamiento. El pseudocódigo del Algoritmo 2 muestra el paso a paso del método de muestreo proporcional de categoría protegida.

Machine Translated by Google

Algoritmo 1 Sobremuestreo de categoría protegida

```
baselineCount ← suma de entradas en 'Largest_Category' de Xtrain
totalCount ← número de entradas en Xtrain
proporción de línea de base ← recuento de línea de base/recuento total
balanceadoData ← inicializar un conjunto de datos vacío
categorías ← lista de nombres de columnas en Xtrain que comienzan con 'combined_category_'
para cada categoría en categorías hacer
    categoríaDatos ← seleccionar entradas en Xtrain donde categoría = 1
    CategoryData ← combina CategoryData con las etiquetas correspondientes de ytrain
    CategoryCount ← número de entradas en CategoryData
    targetCount ← parte entera de totalCount × baselineProportion
    si categoríaCount < targetCount entonces
        sampledData ← muestra targetCount de categoríaData con reemplazo
        balanceedData ← agregar sampledData a balanceData
    demás
        balanceData ← agregar categoríaData a balanceData
terminar si
fin para
devolver datos equilibrados
```

Algoritmo 2 Muestreo proporcional de categoría protegida

```
muestras objetivo ← 5000
sampledBalanced ← inicializa un conjunto de datos vacío
para cada columna en new_categories.columns haga
    CategoryRows ← seleccionar filas en new_categories donde columna = 1
sampledRows ← muestra targetSamples entradas de categoríaFilas con reemplazo
    para cada columna en oneHotEncodedBalanced.columns
        filas muestreadas[col] ← 0
fin para
    filas muestreadas[columna] ← 1
    sampledBalanced ← agregar sampledRows a sampledBalanced
fin de
retorno muestreadoEquilibrado
```

4.3. SMOTE de categoría protegida

La técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas de categoría protegida (PC-SMOTE) El método de muestreo es un proceso más complejo destinado a imitar SMOTE pero modificado para muestreando nuestras nuevas categorías, en lugar de etiquetas de clases. En este enfoque, el primer paso fue modificar SMOTE para utilizar un número fijo de vecinos y seleccionar aleatoriamente un vecino para la interpolación en lugar de promediarlos todos. El pseudocódigo del algoritmo 3 muestra el procedimiento para el PC-SMOTE. Dado que la intención del método es utilizarlo para el nuevo muestreo de categorías, no aborda la generación de etiquetas de clase directamente. De ahí que una nueva Se necesita una función que pueda generar una nueva etiqueta de clase para los datos sintéticos. Para ello, un nuevo Se define una función que genera etiquetas de clase en función del número de nuevos datos sintéticos. generado y un ratio de equilibrio preseleccionado entre las dos clases. El algoritmo 4 muestra cómo nuestra nueva función genera etiquetas para nuestras muestras sintéticas. El algoritmo primero determina el número de muestras para cada clase en función del índice de equilibrio y genera la muestra necesario para cada clase. Las etiquetas de clase se barajan para evitar sesgos algorítmicos en el clases generadas.

Estos dos algoritmos se combinan para formar PC-SMOTE, como se muestra en el Algoritmo 5. En el enfoque para lograr el equilibrio multicategoría, cada categoría distinta se repite de manera que se identifique el subconjunto de datos asociados con esa categoría. El número El número de muestras sintéticas necesarias para alcanzar un tamaño máximo predefinido por categoría es entonces calculado. Si se requieren muestras adicionales, los datos se generan usando PC-SMOTE,

Machine Translated by Google

que interpola entre los puntos de datos existentes y sus vecinos más cercanos. Al mismo tiempo, Se crea una distribución equilibrada de etiquetas de clases sintéticas con una relación de equilibrio específica mediante empleando el algoritmo 4. Estas características y etiquetas sintéticas luego se incorporan al subconjunto de entrenamiento para cada categoría. El proceso se repite para todas las categorías, lo que da como resultado una conjunto de datos equilibrado. Los hiperparámetros en este Algoritmo 5 son el número de vecinos. y relación de equilibrio.

Algoritmo 3 Técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas personalizadas (SMOTE)

```
procedimiento CUSTOMSMOTE(datos, n_muestras)
    SyntheticSamples ← matriz cero de tamaño (n_samples× número de columnas en datos)
nn ← Vecinos más cercanos(n_vecinos = 7).fit(datos)
    vecinos ← nn.kneighbors(datos, distancia_retorno = Falso)
    para i ← 1 a n_muestras hacer
        sampleIdx ← entero aleatorio de 0 a (número de filas en los datos − 1)
        nnIdx ← elección aleatoria de vecinos[sampleIdx, 1 :]
        di ff ← datos[nnIdx] − datos[muestraIdx]
        peso ← número aleatorio de distribución uniforme entre 0 y 1
        muestras sintéticas [i] ← datos [sampleIdx] + peso × di ff
fin para
    devolver muestras sintéticas
finalizar el procedimiento
```

Algoritmo 4 Generar etiquetas sintéticas equilibradas

```
procedimiento GENBALSYNTHLABELS(n_samplesNeeded, balanceRatio)
    nClass1 ← int(n_samplesNeeded × balanceRatio)
    nClass0 ← n_samplesNeeded − nClass1
    etiquetas sintéticas ← [0] × nClass0 + [1] × nClass1
    SHUFFLE(etiquetassintéticas)                    Mezcla aleatoriamente las etiquetas
    devuelve etiquetas sintéticas
finalizar el procedimiento
```

Algoritmo 5 SMOTE de categoría protegida

```
balanceDataList ← inicializar una lista vacía
para cada categoría en categorías hacer
    categoríaSubconjunto ← seleccionar filas en train_data st 'combined_category' == categoría
    Características ← eliminar 'clase', 'categoría_combinada' de categoríaSubconjunto
    nSamples ← max_size- número de filas en categoríaSubconjunto
    si nMuestras > 0 entonces
        SyntheticFeatures ← PCSmote( características, nSamples)
        SyntheticLabels ← GenBalSynthLabels(nSamples, balanceRatio)
        características sintéticas[′ clase′ ] ← etiquetas sintéticas
        características sintéticas[′ categoría_combinada′ ] ← categoría
        categoríaSubconjuntoBalanceado ← concatenar categoríaSubconjunto y características sintéticas
    demás
        categoríaSubconjuntoEquilibrado ← categoríaSubconjunto
terminar si
agregar categoríaSubconjuntoEquilibrado a lista de datos equilibrada
fin para
balanceedData ← agregar balanceDataList y restablecer el índice
```

4.4. ADASYN de categoría protegida

El método ADASYN de categoría protegida imita la minoría sintética adaptativa (ADASYN) muestreo, pero se modifica ligeramente para cumplir con nuestro objetivo de muestreo de categoría protegida. Nuestro algoritmo PC-ADASYN se muestra en el Algoritmo 6. Amplía ADASYN centrándose en la categoría

Machine Translated by Google

densidad más que desequilibrio de clases. Específicamente, esta función opera encontrando el punto más cercano vecinos de los datos y luego calcular la densidad de la categoría de cada punto de datos dentro de su vecindad inmediata. Pondera estas densidades de manera inversa para priorizar las categorías minoritarias, lo que hace que sea más probable que genere muestras sintéticas de categorías subrepresentadas. El Las muestras sintéticas se crean interpolando entre puntos de datos seleccionados y sus vecinos. similar a SMOTE pero usando un peso aleatorio para variar la interpolación, asegurando así una conjunto de datos sintéticos diversos. Este enfoque ayuda a abordar el desequilibrio a nivel de categoría y Enriquece la varianza del conjunto de datos, mejorando potencialmente la solidez y la equidad de los modelos de ML. entrenados con estos datos. Dado que este método de muestreo también genera nuevas muestras mediante interpolación, El algoritmo 4 se utiliza para generar etiquetas de clase para las nuevas muestras sintéticas.

Algoritmo 6 PC-ADASYN para equilibrio basado en categorías

```
procedimiento PCADASYNCATEGORIES(datos, etiquetas, n_samplesNeeded, n_neighbors)
    n_vecinos ← n_vecinos + 1 nn ← Incluyendo el punto de datos en sí
Vecinos más cercanos(n_vecinos).fit(datos)
    distancias, índices ← nn.vecinos(datos)
    densidades ← cero matriz de longitud (datos)
    para i ← 0 a longitud (datos) − 1 hacer
        categoría_actual ← etiquetas[i]
        índices_vecinos ← índices[i][1 :] Saltar el autoíndice
        densidades[i] ← SUMA(etiquetas[índices_vecinos] == categoría_actual)
fin para
    pesos ← 1/(densidades + 1) pesos Suma 1 para evitar la división por cero
    ← pesos/SUM(pesos) muestras sintéticas Normalizar pesos
    ← lista vacía
    sampleIndices ← elección aleatoria con reemplazo de longitud (datos) usando pesos
    para cada idx en sampleIndices, haga
        baseIdx ← idx
        vecino Idx ← RANDOMCHOICE(índices[baseIdx][1 :])
        di ff ← datos[vecino Idx] − datos[baseIdx]
        muestra sintética ← datos[baseIdx] + RANDOM() × di ff
        agregar muestra sintética a muestras sintéticas
fin para
    matriz de retorno (muestras sintéticas)
finalizar el procedimiento
```

Los algoritmos 4 y 6 se combinan para formar nuestro muestreo ADASYN de categoría protegida, como se muestra en el Algoritmo 7. Para cada categoría, los datos correspondientes a esa categoría son se aísla y se calcula el déficit de tamaño en relación con la categoría más grande. Si es adicional Si se necesitan muestras, se aplica el método PC-ADASYN, generando características sintéticas que respetar las características de distribución de la categoría. Estas características luego se complementan con etiquetas generadas sintéticamente, manteniendo un ratio de equilibrio de clases predefinido. El El proceso no solo corrige los desequilibrios de categorías sino que también enriquece el conjunto de datos, lo que potencialmente mejorar la precisión predictiva y la equidad de los modelos entrenados con estos datos.

4.5. Ajuste de conjuntos de datos e hiperparámetros

Para probar los cuatro métodos de muestreo, se necesitaba un clasificador para evaluar los efectos sobre equidad y desempeño. En última instancia, el tipo de clasificador no es directamente relevante ya que el El objetivo es mitigar el equilibrio entre equidad y desempeño, en lugar de encontrar el mejor clasificador. Por lo tanto, optamos por utilizar árboles de decisión univariados basados en CART [56] debido a su Robustez contra el ruido y los datos faltantes. La implementación específica que elegimos fue tomado de la biblioteca sklearn (versión 1.5.1) [57]. Además, los árboles de decisión nos permiten controle la fuerza del ajuste estableciendo la profundidad del árbol aprendido. Esto nos permite comparar la equidad y el rendimiento en diferentes niveles de adaptación.

Machine Translated by Google

El proceso comienza combinando categorías protegidas dentro de cada conjunto de datos, aplicando codificación one-hot para crear nuevas características multicategoría y luego realizando la codificación de etiquetas. Luego, los conjuntos de datos se dividieron utilizando una validación cruzada estratificada de 10 veces para garantizar una distribución representativa de las clases en cada pliegue. Para cada pliegue, el entrenamiento se realizó con datos muestreados utilizando los métodos descritos anteriormente, mientras que la clasificación se probó en los correspondientes conjuntos de prueba no muestreados. La coherencia en el entrenamiento del modelo se mantuvo aplicando una profundidad de árbol idéntica en todos los métodos de muestreo, y los resultados proporcionados son promedios de las ejecuciones de 10 veces con sus correspondientes intervalos de confianza.

Algoritmo 7 ADASYN de categoría protegida

```
lista de datos equilibrada ← inicializar una lista vacía
para cada categoría en categorías haga
    categoríaSubconjunto ← seleccione de new_data3 st 'combined_category' == características de
    categoría ← elimine 'clase', 'categoría_combinada' de categoríaSubconjunto
    categoríaEtiquetas ← extraiga 'categoría_combinada' de categoríaSubconjunto
    nSamplesNeeded ← tamaño_máximo menos número de filas en categoríaSubconjunto si
    nSamplesNeeded > 0 entonces
        SyntheticFeatures ← PCAdasyn( características, categoríaLabels, nSamplesNeeded)
        SyntheticLabels ← GenBalSynthLabels(nSamplesNeeded, balanceRatio)
        SyntheticFeatures[ ' clase' ] ← SyntheticLabels
        SyntheticFeatures[ ' ' ] ← categoría categoríaSubconjuntoEquilibrado
        ← concatenar categoríaSubconjunto con características sintéticas de lo contrario

    categoríaSubconjuntoEquilibrado ← categoríaSubconjunto
finalizar si
agregar categoríaSubconjuntoEquilibrado a lista de datos equilibrada
finalizar
para datos equilibrados ← concatenar lista de datos equilibrada y restablecer índice
```

Se seleccionaron tres conjuntos de datos del repositorio de la UCI [58] para nuestro análisis: el conjunto de datos de Ingresos de Adultos [59], el conjunto de datos de Crédito Alemán [60] y el conjunto de datos de Perfiles de Gestión de Delincuentes Correccionales para Sanciones Alternativas (COMPAS). El conjunto de datos Adult Income tiene como objetivo predecir si un individuo gana más de 50.000 dólares, presentando ocho atributos categóricos y cuatro numéricos, con variables protegidas correspondientes a la edad (joven o adulto), sexo (masculino o femenino) y raza (blanca u otros). El conjunto de datos sobre ingresos de adultos fue donado a UCI en 1996. El conjunto de datos de crédito alemán, utilizado para predecir la solvencia, comprende 20 atributos categóricos y dos numéricos, con variables protegidas de edad y sexo. El conjunto de datos crediticios alemán fue donado a la UCI en 1994. El conjunto de datos COMPAS [61], que evalúa las tasas de reincidencia en los Estados Unidos, incluye seis características categóricas y seis numéricas, con variables protegidas de edad, raza y sexo. El conjunto de datos se publicó en 2018. Estos conjuntos de datos se seleccionaron porque representan conjuntos de datos de última generación para medir el sesgo y la discriminación y se utilizan ampliamente en otros estudios sobre el sesgo y la equidad algorítmicos (consulte la Sección 3). Además, los conjuntos de datos tienen varios tamaños, desde pequeños hasta grandes, lo que los hace adecuados para probar nuestros métodos de muestreo.

El ajuste de hiperparámetros se realizó mediante búsqueda en cuadrícula [62] para explorar una amplia gama de parámetros, complementados con evaluaciones visuales para identificar configuraciones óptimas que equilibren la diferencia de probabilidades igualadas (EOD) y la precisión. Para el conjunto de datos de Adult Income, los hiperparámetros óptimos incluían una profundidad máxima de árbol de 3 y, para PC-SMOTE y PC-ADASYN, una configuración de vecino más cercano de 5 con una proporción equilibrada de 0,34. Estos parámetros fueron igualmente efectivos para el conjunto de datos de crédito alemán. Para el conjunto de datos COMPAS, una profundidad máxima de árbol de 2 fue óptima para todos los métodos de muestreo. PC-SMOTE y PC-ADASYN se ajustaron a la configuración del vecino más cercano de 3 y una relación equilibrada de 0,60.

Machine Translated by Google

5. Resultados

Las cuatro estrategias de muestreo se aplicaron a los tres conjuntos de datos descritos anteriormente y evaluaron su impacto utilizando un clasificador de árbol de decisión univariado simple. Los resultados en Las tablas 1 a 3 muestran diferencias notables en el desempeño del modelo en cinco estrategias de muestreo: sin muestreo, sobremuestreo, muestreo proporcional, PC-SMOTE y PC-ADASYN en nuestros tres conjuntos de datos. Cada método se evaluó en función de la precisión, macro F1, ecualizado Diferencia de probabilidades (EOD) y paridad estadística (SP). Los resultados se midieron con precisión. y macro F1 porque estas dos métricas son las métricas de clasificación más populares. También, limitar la métrica a dos hace que los resultados sean comparables para el análisis estadístico.

Para determinar la significación estadística de los resultados de cada método, utilizamos el método de Friedman. prueba, una alternativa no paramétrica al ANOVA unidireccional con medidas repetidas. Al Al encontrar resultados significativos de la prueba de Friedman, procedimos con la prueba post hoc de Nemenyi. prueba. Esta prueba se utiliza para evaluar comparaciones por pares entre los métodos para determinar qué métodos difieren estadísticamente entre sí. La prueba de Nemenyi es ventajosa en esta configuración porque tiene en cuenta múltiples comparaciones sin asumir normal distribuciones, proporcionando así una forma sólida de comprender diferencias específicas por pares.

Para el conjunto de datos sobre ingresos de adultos (Tabla 1), el método sin muestreo arrojó una precisión de 0,82, lo que establece una base de referencia alta para la comparación. Sin embargo, demostró una actitud ligeramente sesgada. predicción con una EOD de 0,36 y una disparidad mínima en las tasas de predicción (SP = 0,02). En Por el contrario, el sobremuestreo mantuvo la misma precisión pero redujo ligeramente la macro F1 a 0,65, lo que indica posibles problemas de sobreajuste y empeora la equidad (EOD = 0,66) y disparidad creciente en las tasas de predicción (SP = 0,09). Disminución del muestreo proporcional precisión a 0,79 pero mejoró la macro F1 a 0,79, lo que sugiere un mejor equilibrio entre precisión y recuperación. Sin embargo, aumentó significativamente el SP a 0,71, lo que indica una sustancial disparidad en las tasas de predicción positiva, lo que genera preocupaciones sobre la equidad del modelo. El Se diseñaron dos enfoques personalizados para SMOTE y ADASYN específicamente para mejorar sobre estas métricas. PC-SMOTE mostró un rendimiento moderado con una precisión de 0,81 y una EOD mejorada de 0,25, lo que sugiere una mayor equidad con respecto al sobremuestreo básico y el método sin muestreo. Sin embargo, aún registró una macro F1 más baja (0,63), lo que indica Problemas de tergiversación en la generación de datos sintéticos. PC-ADASYN demostró ser el enfoque más equilibrado, manteniendo una alta precisión (0,82) y un mejor manejo de la clase desequilibrios, con una mejora moderada en la equidad (EOD = 0,28) y una controlada aumento en la disparidad de la tasa de predicción (SP = 0,09). En general, la precisión inicial es estadísticamente significativamente mejor que el muestreo proporcional, aunque no es estadísticamente significativo como en comparación con los otros métodos de muestreo. Para la macro F1 el muestreo proporcional es estadísticamente significativamente mejor que otros métodos de muestreo. Para el EOD, PC-ADASYN es estadísticamente mejor que otros métodos de muestreo, mientras que el método sin muestreo SP es estadísticamente significativamente mejor que otros métodos de muestreo.

Tabla 1. Resultados de los métodos de muestreo en el conjunto de datos de Ingreso de Adultos con intervalos de confianza del 95%.

Muestreo Método	Exactitud	macrof1	EOD	SP
Sin muestreo	0,82 ± 0,00	0,66 ± 0,01	0,36 ± 0,18	0,02 ± 0,00
Sobremuestra	0,82 ± 0,02	0,65 ± 0,06	0,66 ± 0,2	0,09 ± 0,02
Prop. Muestra	0,79 ± 0,05	0,79 ± 0,06	0,46 ± 0,12	0,71 ± 0,10
PC-SMOTE	0,81 ± 0,05	0,63 ± 0,07	0,25 ± 0,21	0,07 ± 0,00
PC-ADASYN	0,82 ± 0,04	0,64 ± 0,07	0,28 ± 0,19	0,09 ± 0,02

Los resultados de los experimentos con el conjunto de datos de crédito alemán también muestran impactos variables. de cada estrategia de muestreo, particularmente en lo que respecta a la equidad y precisión, como se muestra en la Tabla 2. Sin muestreo, el modelo de referencia logró una precisión de 0,72 pero mostró resultados significativos. sesgo en su predicción, con una EOD de 0,88, lo que indica una disparidad sustancial en el error tarifas entre grupos en los atributos protegidos. Implementación de sobremuestreo mantenido precisión al tiempo que mejora la macro F1 a 0,68 y reduce notablemente el EOD a 0,37, aunque a

Machine Translated by Google

el costo de aumentar el SP a 0,35, lo que destaca una posible compensación entre diferentes equidades medidas. El muestreo proporcional redujo ligeramente la precisión a 0,68, pero logró la mejor Puntuación F1 de 0,69. También redujo la EOD a 0,32, lo que sugiere que equilibra efectivamente la predicción. calidad con equidad. PC-SMOTE muestra una mejora en la precisión con 0,73 pero una menor macro F1 de 0,55; La equidad del modelo muestra una gran mejora con respecto a la línea de base con un EOD de 0,15 y un SP moderado de 0,1. PC-ADASYN muestra una precisión similar a la línea de base en 0,72, aunque con el F1 macro más bajo de 0,48, lo que sugiere una posible compensación en precisión y recuperación. Sin embargo, el modelo exhibe la mejor predicción de equidad con un EOD de 0,13 y SP de 0,06. En general, el resultado muestra que la precisión de la ausencia de muestreo no es estadísticamente significativo para otros métodos de muestreo excepto los muestreos proporcionales mientras que para el EOD los resultados de todos los métodos de muestreo son estadísticamente significativos en comparación con el método sin muestreo.

Tabla 2. Resultados de los métodos de muestreo en el conjunto de datos de crédito alemán con intervalos de confianza del 95%.

Muestreo Método	Exactitud	macrof1	EOD	SP
Sin muestreo	0,72 ± 0,03	0,62 ± 0,06	0,88 ± 0,10	0,07 ± 0,01
Sobremuestra	0,72 ± 0,05	0,68 ± 0,04	0,37 ± 0,16	0,35 ± 0,11
Prop. Muestra	0,69 ± 0,04	0,69 ± 0,07	0,32 ± 0,26	0,29 ± 0,10
PC-SMOTE	0,73 ± 0,05	0,55 ± 0,09	0,15 ± 0,09	0,1 ± 0,02
PC-ADASYN	0,72 ± 0,03	0,48 ± 0,11	0,13 ± 0,02	0,06 ± 0,00

La Tabla 3 muestra los resultados de nuestra experiencia con el conjunto de datos COMPAS. Estos resultados revelan variaciones significativas en el rendimiento del modelo entre las diferentes estrategias de muestreo. El enfoque de referencia, sin muestreo, logró precisión y una puntuación macro F1 de 0,89 pero mostró mayores disparidades en las métricas de equidad, con una diferencia de probabilidades igualada (EOD) de 0,39 y una Paridad Estadística (SP) de 0,29. Esto subraya los posibles sesgos que Los modelos no ajustados pueden exhibirse hacia grupos protegidos. La aplicación del sobremuestreo Precisión ligeramente mejorada a 0,90, pero también mejoró notablemente la equidad, disminuyendo la EOD a 0,26. Esto sugiere efectividad para reducir las disparidades de resultados sin comprometer SP. Por el contrario, el muestreo proporcional, al tiempo que aumenta la precisión y la macro F1 a 0,90 y 0,91, respectivamente, también lograron un EOD de 0,26, mejorándolo con respecto a la línea de base, mientras que También registró un SP más alto de 0,36, lo que indica un aumento potencial en la disparidad de resultados positivos. resultados entre grupos. PC-SMOTE y PC-ADASYN, con puntuaciones idénticas en precisión, macro F1 y SP lograron mantener mejoras de equidad con un EOD de 0,30, aunque estos métodos también aumentaron el SP a 0,47. En general, los resultados muestran que tanto el La precisión y la EOD de nuestros métodos de muestreo son estadísticamente significativamente mejores que el método sin muestreo.

Tabla 3. Resultados de los métodos de muestreo en el conjunto de datos COMPAS con intervalos de confianza del 95%.

Muestreo Método	Exactitud	macrof1	EOD	SP
Sin muestreo	0,89 ± 0,04	0,89 ± 0,04	0,39 ± 0,15	0,29 ± 0,17
Sobremuestra	0,90 ± 0,03	0,90 ± 0,05	0,26 ± 0,14	0,25 ± 0,07
Prop. Muestra	0,90 ± 0,05	0,91 ± 0,04	0,26 ± 0,12	0,36 ± 0,10
PC-SMOTE	0,91 ± 0,02	0,91 ± 0,02	0,30 ± 0,11	0,47 ± 0,19
PC-ADASYN	0,91 ± 0,02	0,91 ± 0,03	0,30 ± 0,13	0,47 ± 0,21

6. Discusión

Los resultados de los experimentos en los tres conjuntos de datos corroboran esa categoría protegida. El muestreo puede mejorar notablemente la equidad del modelo, a menudo sin comprometer significativamente la precisión de la predicción. En algunos casos, también se mejoraron la precisión y la macro F1. demostrado. Centrándose en los resultados del conjunto de datos de ingresos de adultos, PC-SMOTE y PC-ADASYN

Machine Translated by Google

demostró mejoras notables en EOD y mantuvo niveles moderados de SP. La eficacia de estos métodos puede atribuirse en gran medida a sus sofisticadas técnicas de interpolación. Por ejemplo, un examen visual de los árboles de decisión generados sin muestreo y PC-ADASYN proporciona contrastes reveladores. En las Figuras 1 y 2, respectivamente, se muestran ejemplos de un único pliegue representativo . El árbol de decisión aprendido sin muestreo seleccionó su raíz con una característica estrechamente asociada con atributos protegidos, actuando así como un atributo proxy. Esto dio lugar a un pronunciado sesgo de predicción, como se refle Por el contrario, el árbol de decisión entrenado con datos generados usando PC-ADASYN comenzó con una característica que generalizaba muy bien las predicciones y mitigaba el sesgo, como lo demuestra una mejora notable en la equidad del modelo y una mayor impureza de Gini, lo que indica una división inicial más pura.

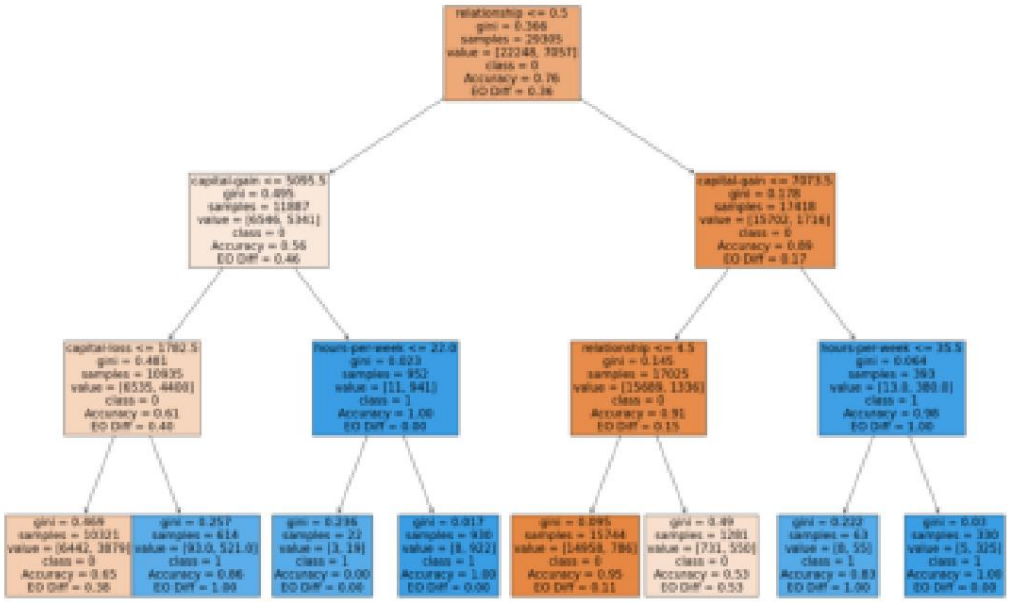


Figura 1. Ejemplo de árbol de decisión entrenado en Ingresos de Adultos sin muestreo.

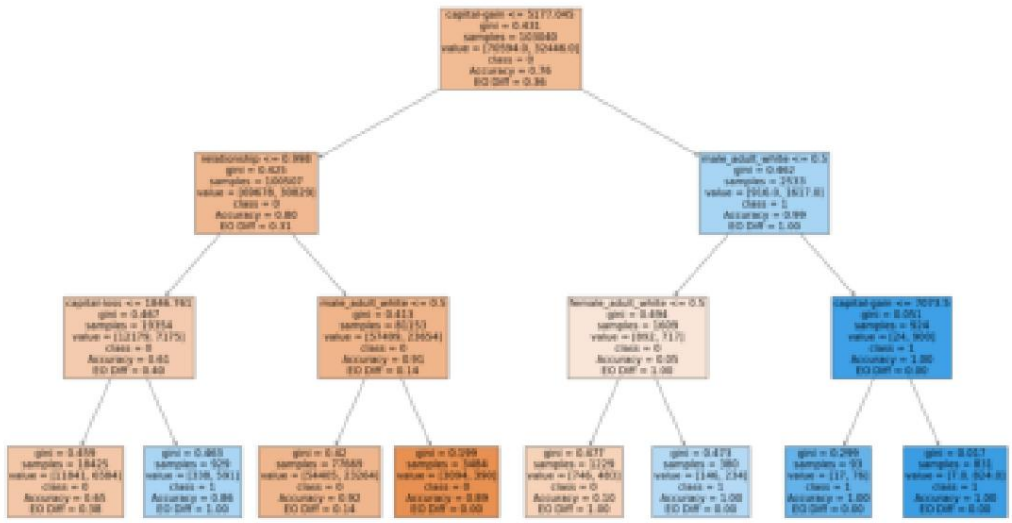


Figura 2. Árbol de decisiones de PC-ADASYN sobre ingresos de adultos.

Machine Translated by Google

6.1. Comparación de equidad versus desempeño

Al comparar el sobremuestreo y el muestreo proporcional, los enfoques de los métodos para aumentar el tamaño de la muestra mediante la duplicación de filas de datos existentes fueron sencillos y no produjeron mejoras sustanciales en la EOD. Este resultado tiene sentido ya que estos métodos tienden a replicar sesgos existentes, lo que potencialmente puede exacerbar los problemas de equidad en lugar de aliviarlos. Esto es evidente, en particular, cuando se considera el conjunto de datos sobre ingresos de adultos, donde las clases están extremadamente desequilibradas. Estas ingenuas estrategias de replicación carecen de la capacidad de interpolación de PC-SMOTE y PC-ADASYN para ajustar muestras cerca de los límites de decisión, lo cual es crucial para mitigar el sesgo en el conjunto de datos. Por el contrario, las estrategias de interpolación utilizadas por SMOTE y ADASYN amplían el conjunto de datos y mejoran su diversidad. Esto es particularmente efectivo para muestras cercanas a los límites de decisión, donde ligeros cambios en las características pueden afectar significativamente la equidad de las predicciones. Al interpolar entre muestras, SMOTE y ADASYN mueven efectivamente estas muestras límite hacia regiones más equitativas del espacio de características, confrontando y reduciendo así directamente el sesgo de manera más efectiva que los métodos que aumentan el volumen de muestra sin alterar la estructura de datos.

La función de generación de clases (Algoritmo 4) también ayuda a aumentar la distribución general de clases. Los resultados de nuestro PC-SMOTE y PC-ADASYN sobre ingresos de adultos también muestran superioridad sobre los resultados obtenidos en [41], donde se obtuvo una precisión de 0,59 y un SP de 0,17. Además, los resultados de PC-SMOTE y PC-ADASYN muestran superioridad sobre los resultados obtenidos en [40], donde un EOD de 0,89 y una precisión ligeramente mejor de 0,84.

Al examinar los resultados del conjunto de datos de Crédito Alemán, observamos una tendencia similar a la que se observó en el conjunto de datos de Ingreso de Adultos: el método sin muestreo tiene un sesgo muy alto con respecto a la EOD. El bajo SP de 0,07 indica una disparidad mínima en las tasas de predicción positiva entre los grupos, pero esto en sí mismo no es una buena manera de medir la equidad ya que el grupo favorecido tiene más muestras que el desfavorecido. Esto tiene el efecto de sesgar el cálculo del SP, ya que sólo cuenta las decisiones positivas en cada grupo, que están influenciadas por el tamaño de la muestra. Una conclusión es la importancia de emplear múltiples métricas de equidad para ver de manera integral el impacto de un modelo en todas las partes interesadas. Para el sobremuestreo, vimos una mejora en EOD con un SP similar; esto muestra que aumentar el número de muestras para cada uno de los atributos protegidos de la multicategoría mejora la equidad con respecto a la EOD. Además, el SP actualizado refleja cómo se vería tener un número más igual de muestras para cada multicategoría, a diferencia de la línea de base donde el grupo favorecido tiene cinco veces más muestras que el grupo desfavorecido. La precisión del muestreo proporcional disminuye porque el número de referencia de muestras seleccionadas después del ajuste de hiperparámetros fue insuficiente para que el modelo generalizara el conjunto de pruebas sin muestrear, lo que provocó un sobreajuste. El sobreajuste se confirmó considerando la precisión del entrenamiento. Curiosamente, el modelo no intercambia precisión por recuperación como otros modelos, y esto le da al muestreo proporcional la macro F1 más alta.

En cuanto a la equidad, encontramos un aumento en la EOD en comparación con el valor inicial y el sobremuestreo . Esto surge porque cada multicategoría está representada en los mismos recuentos de referencia. Esto puede mejorar la equidad del modelo porque el modelo ahora tiene una imagen más amplia de las categorías y hace mejores predicciones y, en última instancia, decisiones más justas. PC-SMOTE y PC-ADASYN desempeñan un papel fundamental a la hora de reducir significativamente el sesgo en las predicciones de los m
Esta coherencia confirmó la solidez de estos métodos en diferentes conjuntos de datos. En particular , ninguno de los métodos compromete la precisión, mientras que ambos mejoran la equidad, lo que ilustra su eficacia en el manejo de las compensaciones típicamente asociadas con el modelado predictivo.

Estos resultados demuestran las sólidas capacidades de interpolación inherentes a PC-SMOTE y PC-ADASYN. Estos métodos reasignan efectivamente muestras dentro del espacio de características, especialmente moviendo aquellas en regiones desfavorecidas de límites de decisión negativos a más positivos . Estos ajustes son cruciales para mitigar los resultados sesgados y promover la equidad en los procesos automatizados de toma de decisiones. La macro F1 en ambos modelos cae en comparación con la línea de base porque se requiere una mayor cantidad de muestras para que el modelo funcione mejor en la generalización, que este conjunto de datos no admite. Específicamente, el conjunto de datos tiene 700 muestras para la clase 0 y 300 muestras para la clase 1, lo que significa que el conjunto de prueba

Machine Translated by Google

solo tiene 30 muestras para la clase 1. Esta pequeña cantidad de muestras hizo que ambos modelos cambiaran la recuperación por precisión en la clase 1. En particular, vimos una recuperación baja para la clase 1 que, en última instancia, conduce a una puntuación f1 baja para la clase 1 y desde la macro F1 promedia las dos puntuaciones f1 y las trata por igual, esto afecta el rendimiento de ambos modelos en macro F1. En general, los dos modelos arrojan un modelo más justo con buena precisión en comparación con la línea de base y otros dos métodos de muestreo.

La evaluación del conjunto de datos COMPAS valida aún más la efectividad de nuestros métodos de muestreo . Los distintos patrones que surgen se alinean con los observados en los conjuntos de datos sobre ingresos de adultos y crédito alemán, lo que subraya la solidez de nuestros hallazgos. En particular, las técnicas de sobremuestreo y muestreo proporcional han demostrado mejoras sustanciales en la diferencia de probabilidades igualadas (EOD) y la precisión, mientras que el sobremuestreo también mejora notablemente en SP. Es probable que esta mejora se deba a la composición y el equilibrio únicos dentro del conjunto de datos COMPAS, a diferencia de otros conjuntos de datos en los que las clases están desequilibradas. El éxito del sobremuestreo y del muestreo proporcional en este contexto puede atribuirse a la naturaleza equilibrada del conjunto de datos, que permite la duplicación repetida de filas existentes (técnicas de muestreo empleadas por estos métodos) para mejorar el conjunto de datos sin introducir un sesgo significativo hacia ningún particular. clase. Este método aumenta efectivamente la representación de todas las clases y los atributos protegidos en una forma equilibrada, haciendo que estas técnicas sean particularmente efectivas para conjuntos de datos donde los dominios de características contribuyen igualmente a las predicciones y donde las distribuciones de clases iniciales no sufren un desequilibrio severo . Esto se puede verificar aún más desde su macro F1, ya que ninguno de los modelos intercambia precisión por recuperación. La mejora del SP en el sobremuestreo se puede atribuir al mayor número de muestras en el sobremuestreo en comparación con el muestreo proporcional. Con respecto a PC-SMOTE y PC-ADASYN, estos algoritmos muestran una mejora con respecto a la línea de base tanto en precisión como en EOD. Estas tendencias siguen las de los resultados anteriores. Una cosa notable en esto resulta en la gran caída en SP que se puede atribuir a nuestra nueva etiqueta que se generó para hacer que el conjunto de datos esté sesgado hacia la clase negativa. Estos resultados muestran la dificultad de optimizar dos o más métricas de equidad a la vez y cómo esta optimización puede afectarse entre sí.

6.2. Impacto de la profundidad del árbol en la equidad y la precisión

En este estudio, también se investigó el impacto de la profundidad del árbol de decisión en el rendimiento del modelo , examinando específicamente cómo las variaciones en la profundidad del árbol influyen en la precisión y la EOD. Comprender el efecto de la profundidad es crucial, ya que proporciona información sobre los efectos que van desde el desajuste hasta el sobreajuste y ayuda a identificar el nivel de complejidad óptimo en el que se maximizan tanto la precisión como la equidad. Inicialmente, se permitió que el árbol de decisión creciera sin restricciones hasta su máxima profundidad, que en promedio era de unas 30 ramas. Luego se examinó visualmente el árbol para deducir la profundidad máxima excluyendo las ramas que no se partían. Para analizar sistemáticamente los efectos de la profundidad de los árboles, se permitió que la profundidad máxima de los árboles variara de 1 a 30. Cada límite de profundidad se evaluó mediante una validación cruzada diez veces para garantizar la solidez y generalización de los hallazgos.

Para cada configuración de profundidad del árbol, se midieron la precisión y la EOD en el conjunto de prueba. Además, se calcularon intervalos de confianza del 95 % para las métricas en los diez pliegues. Este análisis estadístico destacó la profundidad con la que el árbol de decisión equilibraba el equilibrio entre precisión y equidad, al mismo tiempo que consideraba el equilibrio estadístico subyacente entre sesgo y varianza. Al hacerlo, fue posible identificar el “punto óptimo”, un punto delicado en el que el árbol de decisión mantiene una alta precisión predictiva sin comprometer la equidad, contrarrestando efectivamente la compensación frecuentemente citada presentada en la literatura a

Las Figuras 3 a 7 muestran los gráficos de precisión y EOD frente a la profundidad máxima para cada uno de los cinco métodos de muestreo en el conjunto de datos de Ingresos de Adultos.

Machine Translated by Google

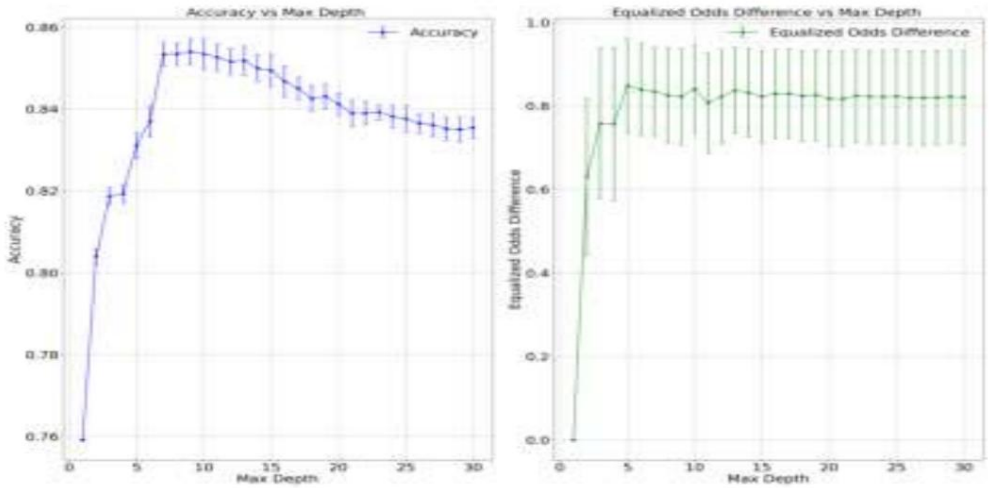


Figura 3. Gráficos de ingresos de adultos sin muestreo, que muestran precisión y EOD con intervalos de confianza del 95 % frente a la profundidad máxima del árbol que van de 1 a 30.

Según resultados como los que se muestran en las Figuras 3 y 4, hay un notable aumento inicial en la precisión a medida que aumenta la profundidad máxima tanto para el método sin muestreo como para el método con sobremuestreo. Sin embargo, ambos métodos muestran una disminución en la precisión a partir de una profundidad de 10 en adelante, lo que sugiere la aparición de un sobreajuste. En consecuencia, la EOD disminuye bruscamente al aumentar la profundidad hasta aproximadamente la profundidad 10, más allá de la cual se estabiliza. Este patrón indica que si bien los árboles más profundos inicialmente mejoran la equidad, eventualmente alcanzan un umbral más allá del cual no se observan más ganancias. Recordando que el objetivo de equidad era minimizar la EOD, una observación clave es que establecer la profundidad máxima entre tres y cinco logra un equilibrio óptimo entre lograr una alta precisión y mantener una EOD b

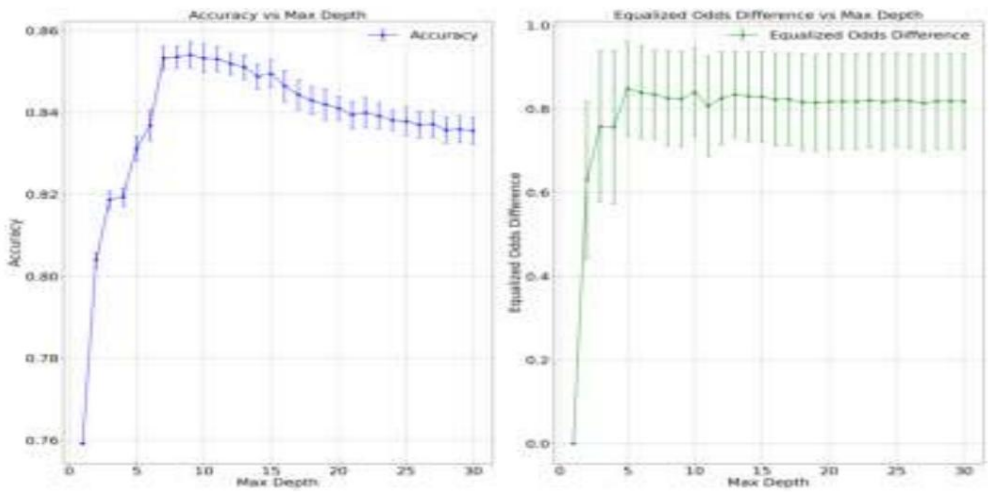


Figura 4. Gráficos de ingresos de adultos utilizando sobremuestreo, que muestran precisión y EOD con intervalos de confianza del 95 % frente a la profundidad máxima del árbol que van de 1 a 30.

Al considerar los resultados mostrados en la Figura 5, el método de muestreo proporcional aumenta continuamente la precisión con la profundidad del árbol, alcanzando un máximo a una profundidad de aproximadamente 26. Por el contrario, la EOD aumenta inicialmente antes de disminuir y estabilizarse a una profundidad de alrededor de 15. Los amplios intervalos de confianza observados en la métrica EOD sugieren una variabilidad significativa en los resultados de equidad. Este hallazgo subraya la importancia de seleccionar una profundidad que minimice la variabilidad en la equidad y al mismo tiempo maximice la precisión.

Machine Translated by Google

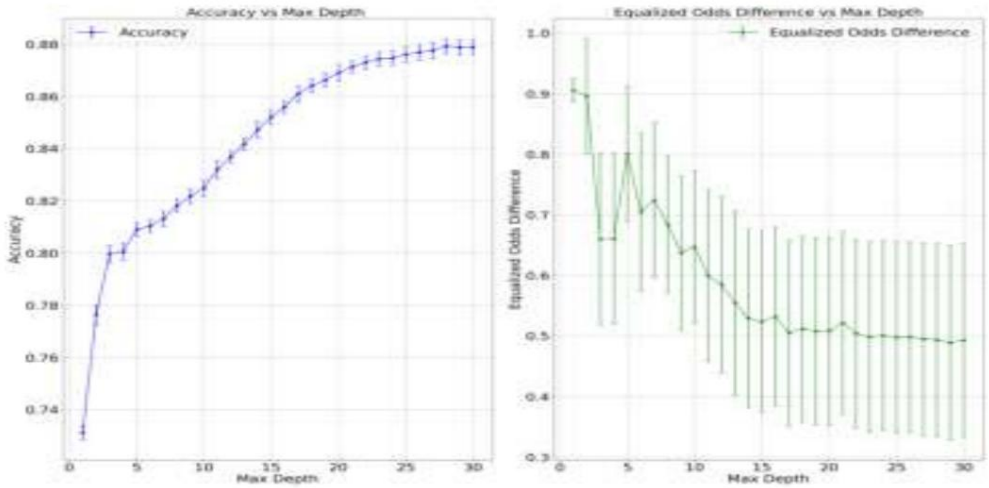


Figura 5. Gráficas de ingresos de adultos utilizando muestreo proporcional, que muestran precisión y EOD con intervalos de confianza del 95 % frente a la profundidad máxima del árbol que van de 1 a 30.

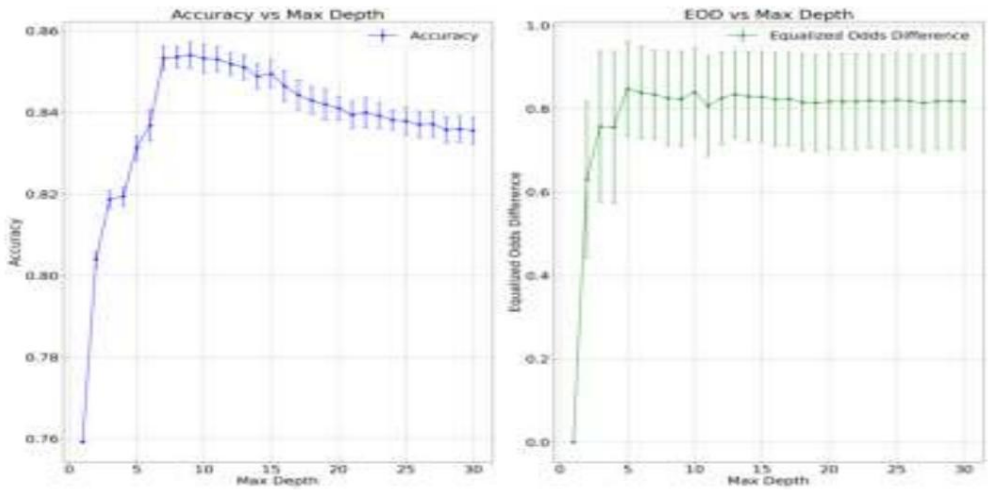


Figura 6. Gráficos de ingresos de adultos utilizando PC-SMOTE, que muestran precisión y EOD con intervalos de confianza del 95% frente a la profundidad máxima del árbol que van de 1 a 30.

Las Figuras 6 y 7, que representan los resultados utilizando PC-SMOTE y PC-ADASYN, respectivamente , muestran ligeras tendencias a la baja en la precisión, que mejoran brevemente antes de descender nuevamente, un patrón indicativo de sobreajuste a mayores profundidades. Las métricas de EOD para estos métodos muestran estabilidad inicial a profundidades más bajas, aumento en profundidades de nivel medio y disminución, lo que sugiere interacciones complejas entre la generación de muestras sintéticas y la delimitación de límites de decisión . Dadas estas observaciones, se eligió una profundidad máxima de 3 para nuestros experimentos, ya que representa un "punto óptimo" donde se optimizan tanto la precisión como la EOD.

Teniendo en cuenta estos resultados, una conclusión es cuestionar el equilibrio que a menudo se supone entre precisión y equidad demostrando que nuestro método PC-ADASYN supera consistentemente las líneas de base en los tres conjuntos de datos en términos de precisión y equidad. Este hallazgo es significativo, ya que sugiere mejorar la equidad del modelo sin sacrificar la precisión con métodos de muestreo apropiados y es posible ajustar el modelo. Sin embargo, nuestro análisis también revela escenarios en los que los ajustes a la complejidad del modelo, específicamente la profundidad máxima de los árboles de decisión, pueden mejorar la precisión a expensas de la equidad, como lo indican los aumentos en la diferencia de probabilidades igualadas (EOD). Sin embargo, se espera que el acoplamiento de métodos de muestreo con métodos de procesamiento, como la regularización basada en la equidad, pueda compensar estos efectos. Estas decisiones resaltan el poder discrecional de los investigadores para equilibrar las métricas de rendimiento del modelo en función de los objetivos y limitaciones esp La cantidad de muestra y la complejidad del tiempo son como cualquier otro método de muestreo. como el

Machine Translated by Google

La cantidad de muestra aumenta, la complejidad del tiempo aumenta pero, en general, los métodos de muestreo tienen la misma complejidad de tiempo que sus algoritmos subyacentes porque tienen la misma funcionalidad.

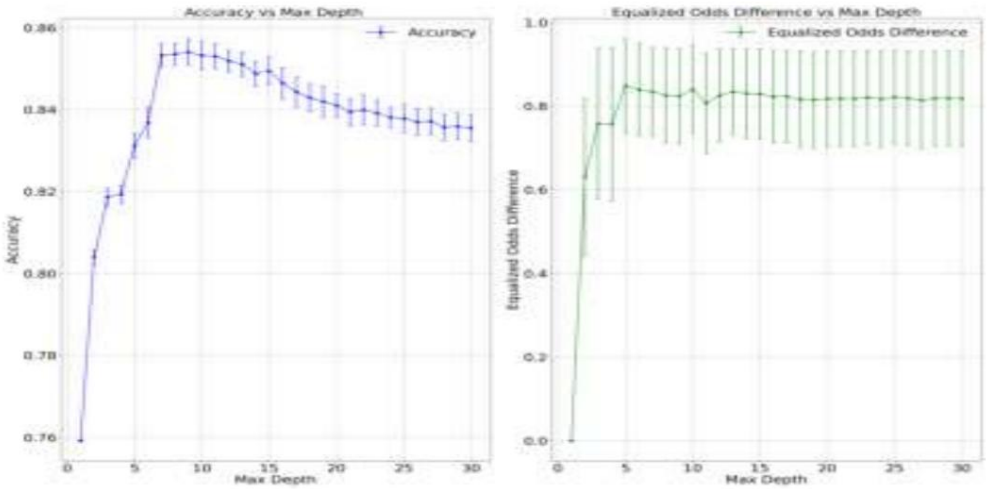


Figura 7. Gráficos de ingresos de adultos utilizando PC-ADASYN, que muestran precisión y EOD con intervalos de confianza del 95% frente a la profundidad máxima del árbol que van de 1 a 30.

Además, nuestros resultados subrayan las complejidades de optimizar simultáneamente múltiples métricas de equidad. Por ejemplo, los esfuerzos por mejorar la paridad estadística (SP) favoreciendo predicciones más positivas para cada grupo protegido en el conjunto de datos COMPAS llevaron a una reducción inadvertida de las predicciones negativas. Este cambio afectó negativamente a la tasa de falsos positivos (FPR), un componente de EOD, empeorando así la métrica de EOD a medida que mejoraba SP. Este fenómeno ilustra las tensiones matemáticas inherentes entre las métricas de equidad, donde la optimización de una puede afectar negativamente a otra. El conjunto de datos COMPAS, con su distribución de clases casi equilibrada, proporciona un ejemplo concreto de cómo las características del conjunto de datos pueden influir en el comportamiento de las métricas de equidad. La optimización de los PS en este contexto implica una medición sesgada de la equidad, particularmente cuando existen diferencias inherentes entre grupos en los atributos protegidos. Esto está respaldado por la literatura que indica que SP puede no tener en cuenta adecuadamente las diferencias de grupo, lo que podría llevar a conclusiones engañosas sobre la equidad de un modelo [63].

7. Limitaciones y trabajo futuro

La naturaleza misma de este estudio es tal que no es posible abordar todas las cuestiones relacionadas con la equidad y el llamado equilibrio entre equidad y desempeño. Como tal, existen limitaciones en el trabajo aquí reportado. Aun así, esperamos e intentamos que el trabajo aquí presentado sugiera vías adicionales de exploración en esta importante área.

Una limitación de este estudio es que nuestro método de muestreo no fue diseñado específicamente para optimizar métricas de equidad arbitrarias. Dicho de otra manera, dado que a menudo existen compensaciones inherentes entre el conjunto disponible de métricas de equidad, se tomó la decisión de centrarse en un enfoque que fuera independiente de las métricas, reconociendo que los resultados podrían haber sido diferentes para otras métricas. Esta también es parte de la razón por la que vimos diferentes comportamientos entre EOD y SP.

Además, se reconoce que, si bien el método de aprendizaje automático subyacente no debería ser relevante para el método propuesto, en realidad no se ha probado. Por lo tanto, en el futuro, esta investigación se ampliará considerando los impactos de otros algoritmos de ML, como la regresión logística, ID3 difuso, K-vecino más cercano y métodos de conjunto como bosques aleatorios o árboles potenciados por gradiente para evaluar la generalización de nuestra nuevos métodos de muestreo. El propósito de dicho estudio sería verificar que nuestros métodos sean independientes del algoritmo ML empleado. Además, esto ayudaría a validar si las mejoras observadas en equidad y precisión son específicas del modelo o pueden aplicarse universalmente.

Machine Translated by Google

Además, se reconoce que sólo se consideraron tres conjuntos de datos distintos: conjuntos de datos que se han estudiado ampliamente en el campo. Esto plantea la preocupación de que los métodos se estén adaptando a estos datos en lugar de abordar la cuestión más amplia de la equidad en el lavado de dinero. Para abordar esto, se planean experimentos con conjuntos de datos más grandes y diversos para proporcionar información más profunda sobre la escalabilidad y solidez de nuestras técnicas. Otra área de trabajo futuro es perfeccionar nuestro enfoque de muestreo multicategoría incorporando subdivisiones más granulares de categorías protegidas, lo que podría revelar sesgos más sutiles y proporcionar una comprensión más matizada de la equidad.

Finalmente, se reconoce que se han propuesto métodos alternativos para mitigar el sesgo , y estos métodos no se han estudiado en este trabajo en absoluto. El trabajo futuro implicaría comparaciones con más estrategias de muestreo. Se realizará una comparación más directa de los métodos propuestos con los métodos de procesamiento interno y posprocesamiento. Por ejemplo , se explorará la incorporación de métodos de procesamiento, como la regularización [22], o un método de posprocesamiento, como el Optimizador de umbral aleatorio [64], como posibles medios para obtener mayores mejoras tanto en la equidad como en el rendimiento.

8. Conclusiones

En este estudio, se investigó la cuestión del sesgo en las predicciones de ML y se desarrolló un método basado en la combinación de variables protegidas en una nueva multicategoría. En particular, la atención se centró en la cuestión sugerida en la literatura sobre la compensación entre sesgo y desempeño y la búsqueda de un método para mitigar esta compensación. El nuevo enfoque multicategoría propuesto refleja la identidad multifacética de los individuos, reconociendo la compleja interacción de atributos que definen los escenarios del mundo real. Dado el desequilibrio inherente a esta multicategoría, se desarrollaron cuatro métodos de muestreo adaptados a estas categorizaciones complejas, en lugar de las etiquetas de clases tradicionales. Para aplicar un clasificador de referencia, se entrenaron árboles de decisión y se evaluó la efectividad de estos métodos utilizando tres conjuntos de datos que a menudo se emplean en estudios de equidad. El rendimiento de los métodos se comparó con los métodos de referencia sin muestreo, utilizando precisión, macro F1, diferencia de probabilidades igualada (EOD) y paridad estadística (SP) como métricas de evaluación.

Los resultados de los experimentos indican que dos de las técnicas de muestreo recientemente desarrolladas (PC-SMOTE y PC-ADASYN) mejoran con éxito la equidad sin comprometer la precisión. Sorprendentemente, en algunos casos, estos métodos también mejoraron la precisión, proporcionando así evidencia contraria a las afirmaciones populares de una compensación entre equidad y desempeño. Un análisis más detallado del impacto de la profundidad máxima del árbol en el rendimiento del modelo reveló que, si bien aumentar la profundidad inicialmente aumenta la precisión, eventualmente conduce a una disminución. Por el contrario, una mayor profundidad afecta negativamente a la equidad, destacando el desafío de equilibrar la complejidad con la equidad. Sin embargo, se identificaron profundidades óptimas de los árboles que mejoran simultáneamente la precisión y la EOD, lo que subraya la posibilidad de lograr equidad sin sacrificar el rendimiento.

En última instancia, estos hallazgos desafían las nociones prevalecientes de una compensación implícita entre desempeño y equidad dentro de la investigación de mitigación de sesgos, lo que sugiere que estrategias de mitigación de sesgos cuidadosamente diseñadas tienen la capacidad de eludir esta compensación. Nuestro enfoque sienta un nuevo precedente para desarrollar algoritmos predictivos más equitativos al redefinir cómo se utilizan los atributos protegidos en el entrenamiento de modelos.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, GP y JS; análisis formal, GP y JS; investigación, médico de cabecera; metodología, médico de cabecera; software, médico de cabecera; supervisión, JS; validación, GP y JS; visualización, médico de cabecera; redacción: borrador original, médico de cabecera; redacción: revisión y edición, JS Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: los conjuntos de datos y el código implementados en este trabajo de investigación se cargaron en https://github.com/horlahsunbo/New-folder (consultado el 10 de junio de 2024).

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Machine Translated by Google

Referencias

1. Maina, IW; Belton, TD; Ginzberg, S.; Singh, A.; Johnson, TJ Una década de estudio de prejuicios raciales/étnicos implícitos en la atención sanitaria proveedores que utilizan la prueba de asociación implícita. Soc. Ciencia. Medicina. 2018, 199, 219–229. [Referencia cruzada]
2. Salimi, B.; Rodríguez, L.; Howe, B.; Suciu, D. Reparación de bases de datos causales para lograr equidad algorítmica. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Gestión de Datos de 2019, Ámsterdam, Países Bajos, 30 de junio a 5 de julio de 2019; págs. 793–810.
3. Kordzadeh, N.; Ghasemaghaei, M. Sesgo algorítmico: revisión, síntesis y direcciones futuras de investigación. EUR. J.Inf. Sistema. 2022, 31, 388–409. [Referencia cruzada]
4. Pesaj, D.; Shmueli, E. Una revisión sobre la equidad en el aprendizaje automático. Computación ACM. Sobrevivir. 2022, 55, 1–44. [Referencia cruzada]
5. Aghaei, S.; Azizi, MJ; Vayanos, P. Aprendizaje de árboles de decisión óptimos y justos para una toma de decisiones no discriminatoria. Proc. AAAI Conf. Artif. Intel. 2019, 33, 1418–1426. [Referencia cruzada]
6. Kamiran, F.; Calders, T. Técnicas de preprocesamiento de datos para clasificación sin discriminación. Conocimiento. Inf. Sistema. 2012, 33, 1–33. [Referencia cruzada]
7. Calmón, F.; Wei, D.; Vinzamuri, B.; Ramamurthy, KN; Varshney, KR Preprocesamiento optimizado para la prevención de la discriminación. En Actas de los avances en sistemas de procesamiento de información neuronal, Long Beach, CA, EE. UU., 4 al 9 de diciembre de 2017.
8. Shahbazi, N.; Lin, Y.; Asudeh, A.; Jagadish, HV Sesgo de representación en los datos: una encuesta sobre técnicas de identificación y resolución. Computación ACM. Sobrevivir. 2023, 55, 1–39. [Referencia cruzada]
9. Chen, Z.; Zhang, JM; Sarro, F.; Harman, M. Un estudio empírico exhaustivo de los métodos de mitigación de sesgos para el aprendizaje automático. clasificadores. Transmisión ACM. Software. Ing. Método. 2023, 32, 1–30. [Referencia cruzada]
10. Perzynski, A.; Berg, KA; Tomás, C.; Cemballi, A.; Smith, T.; Shick, S.; Günzler, D.; Sehgal, AR Discriminación racial y factores económicos en la exclusión de los vecindarios de Ohio. Bois Rev. Soc. Ciencia. Res. Carrera 2023, 20, 293–309. [Referencia cruzada]
11. Steil, JP; Albright, L.; Rugh, JS; Massey, DS La estructura social de la discriminación hipotecaria. Casa. Semental. 2018, 33, 759–776. [Referencia cruzada]
12. Salgado, JF; Moscoso, S.; García-Izquierdo, AL; Anderson, NR Dar forma a lugares de trabajo inclusivos a través del diálogo social; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2017.
13. Leavy, S.; Meaney, G.; Wade, K.; Greene, D. Mitigar el sesgo de género en conjuntos de datos de aprendizaje automático. En Actas sobre el sesgo y los aspectos sociales en la búsqueda y recomendación: Primer taller internacional, BIAS 2020, Lisboa, Portugal, 14 de abril de 2020; págs. 12-26.
14. Hort, M.; Chen, Z.; Zhang, JM; Harman, M.; Sarro, F. Mitigación de sesgos para clasificadores de aprendizaje automático: una encuesta completa. ACM J. Computación responsable. 2023, 1, 1–52. [Referencia cruzada]
15. Fahse, T.; Huber, V.; van Giffen, B. Gestión del sesgo en proyectos de aprendizaje automático. En Innovación a través de sistemas de información: Volumen II: Una colección de las últimas investigaciones sobre cuestiones tecnológicas; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2021; págs. 94-109.
16. Zhang, Z.; Neill, DB Identificación de sesgos predictivos significativos en clasificadores. arXiv 2017, arXiv:1611.08292. [Referencia cruzada]
17. Zheng, Z.; Cai, Y.; Li, Y. Método de sobremuestreo para clasificación desequilibrada. Computadora. Informar. 2015, 34, 1017–1037.
18. Chawla, Nevada; Bowyer, KW; Salón, LO; Kegelmeyer, WP SMOTE: Técnica de sobremuestreo de minoría sintética. J. Artif. Intel. Res. 2002, 16, 321–357. [Referencia cruzada]
19. Él, H.; Bai, Y.; García, EA; Li, S. ADASYN: Enfoque de muestreo sintético adaptativo para el aprendizaje desequilibrado. En Actas de la Conferencia Conjunta Internacional IEEE de 2008 sobre Redes Neuronales (Congreso Mundial IEEE sobre Inteligencia Computacional), Hong Kong, China, 1 a 8 de junio de 2008; págs. 1322-1328.
20. Janssen, P.; Sadowski, BM Bias in Algorithms: Sobre el equilibrio entre precisión y equidad. En Actas de la 23.ª Conferencia Bienal de la Sociedad Internacional de Telecomunicaciones, Gotemburgo, Suecia, 21-23 de junio de 2021.
21. Hardt, M.; Precio, E.; Srebro, N. Igualdad de oportunidades en el aprendizaje supervisado. En actas de los avances en neurología. Sistemas de Procesamiento de Información, Barcelona, España, 5 al 10 de diciembre de 2016.
22. Kamishima, T.; Akaho, S.; Asoh, H.; Sakuma, J. Clasificador consciente de la equidad con regularizador eliminador de prejuicios. En Actas del aprendizaje automático y el descubrimiento de conocimientos en bases de datos: Conferencia europea, ECML PKDD 2012, Bristol, Reino Unido, 24 a 28 de septiembre de 2012; págs. 35–50.
23. Calders, T.; Žliobaitè, I. Por qué los procesos computacionales imparciales pueden conducir a procedimientos de decisión discriminativos. En Discriminación y Privacidad en la Sociedad de la Información: Minería de Datos y Elaboración de Perfiles en Grandes Bases de Datos; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2013; págs. 23–33.
24. Burt, A. Cómo luchar contra la discriminación en la IA. Revisión de negocios de Harvard. 2020 Disponible en línea: https://hbr.org/2020/08/how-to-fight-discrimination-in-ai (consultado el 12 de julio de 2024).
25. Siegler, A.; Admussen, W. Descubriendo la discriminación racial por parte de la policía. Universidad del Noroeste. Ley Rev. 2021, 115, 987–1054.
26. Grabowicz, P.; Perelló, N.; Mishra, A. ¿Cómo entrenar modelos que no propaguen la discriminación? Blog de Equate and Machine Learning , Universidad de Massachusets, Amherst. 2022. Disponible en línea : https://groups.cs.umass.edu/equate-ml/2022/04/07/how-to-train-models-that-do-not-propagate-discrimination/ (consultado el 12 de julio de 2024).
27. Khani, F.; Liang, P. De la discriminación en el aprendizaje automático a la discriminación en la ley, Parte 1: Trato desigual. Blog del laboratorio de IA de Stanford . 2022. Disponible en línea: https://ai.stanford.edu/blog/discrimination_in_ML_and_law/ (consultado el 12 de julio de 2024).
28. Shahriari, K.; Shahriari, M. Revisión del estándar IEEE: diseño alineado éticamente: una visión para priorizar el bienestar humano con inteligencia artificial y sistemas autónomos. En Actas de la Conferencia Internacional de Tecnología Humanitaria (IHTC) de IEEE Canadá, Toronto, ON, Canadá, 21 y 22 de julio de 2017; págs. 197-201.

Machine Translated by Google

29. Comisión Europea; Dirección General de Redes, Contenidos y Tecnologías de Comunicaciones. Directrices éticas para una IA confiable. Oficina de Publicaciones. 2019. Disponible en línea: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d39885 69-0434-11ea-8c1f-01aa75ed71a1/idioma-es/formato-PDF/source-337437547 (consultado el 10 de junio de 2024)
30. Ebers, M.; Hoch, VRS; Rosenkranz, F.; Ruschemeier, H.; Steinrötter, B. La propuesta de la Comisión Europea para una ley de inteligencia artificial: una evaluación crítica realizada por miembros de la Sociedad de Derecho de Robótica e Inteligencia Artificial (RAILS). J 2021, 4, 589–603. [Referencia cruzada]
31. Hajian, S.; Domingo-Ferrer, J. Una metodología para la prevención de la discriminación directa e indirecta en la minería de datos. Traducción IEEE. Conocimiento. Ing. de datos. 2012, 25, 1445–1459. [Referencia cruzada]
32. Pescado, B.; Kun, J.; Lelkes, Á.D. Un enfoque basado en la confianza para equilibrar la equidad y la precisión. En actas del SIAM 2016 Conferencia internacional sobre minería de datos, Miami, FL, EE. UU., 5 al 7 de mayo de 2016; págs. 144-152.
33. Hajian, S. Prevención simultánea de la discriminación y protección de la privacidad en la publicación y extracción de datos. arXiv 2013, arXiv:1306.6805. [Referencia cruzada]
34. Sondeck, LP; Laurent, M.; Frey, V. La métrica de tasa de discriminación semántica para mediciones de privacidad que cuestiona el beneficio de la cercanía t sobre la diversidad l. En Actas de la 14.ª Conferencia Internacional sobre Seguridad y Criptografía, Madrid, España, 24 a 26 de julio de 2017; Volumen 6, págs. 285–294.
35. Ruggieri, S. Uso del anonimato de cercanía t para controlar la no discriminación. Trans. Privado de datos. 2014, 2, 99–129.
36. Romano, Y.; Bates, S.; Candes, E. Lograr probabilidades igualadas mediante el remuestreo de atributos sensibles. En Actas de los avances en sistemas de procesamiento de información neuronal, en línea, 6 a 12 de diciembre de 2020; págs. 361–371.
37. Peng, K.; Chakraborty, J.; Menzies, T. Fairmask: Mayor equidad mediante el reequilibrio de atributos protegidos basado en modelos. Traducción IEEE. Software. Ing. 2022, 49, 2426–2439. [Referencia cruzada]
38. Dhar, P.; Gleason, J.; Roy, A.; Castillo, CD; Chellappa, R. PASS: Sistema de supresión de atributos protegidos para mitigar el sesgo en el reconocimiento facial. En actas de la Conferencia internacional IEEE/CVF sobre visión por computadora, Montreal, QC, Canadá, 10 a 17 de octubre de 2021; págs. 15087-15096.
39. Krasanakis, E.; Spyromitros-Xioufis, E.; Papadopoulos, S.; Kompatsiaris, Y. Reponderación sensible adaptativa para mitigar el sesgo en la clasificación consciente de la equidad. En Actas de la Conferencia World Wide Web, Lyon, Francia, 23 a 27 de abril de 2018; págs. 853–862.
40. Ran˘ci´c, S.; Radovanovic, S.; Delibaši´c, B. Investigación de técnicas de sobremuestreo para modelos justos de aprendizaje automático. En Actas de la XI Sistemas de soporte a la decisión: Sistemas, análisis y tecnologías de soporte a la decisión en respuesta a la gestión de crisis global: 7.ª Conferencia internacional sobre tecnología de sistemas de soporte a la decisión, ICDSST 2021, Loughborough, Reino Unido, 26 a 28 de mayo de 2021; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2021; págs. 110-123.
41. Yan, S.; te Kao, H.; Ferrara, E. Equilibrio justo de clases: mejorar la equidad del modelo sin observar atributos sensibles. En Actas de la 29ª Conferencia Internacional ACM sobre Gestión de la Información y el Conocimiento, evento virtual, Irlanda, 19 a 23 de octubre de 2010; págs. 1715-1724.
42. HuZhang, B.; Lemoine, B.; Mitchell, M. Mitigar los sesgos no deseados con el aprendizaje contradictorio. En Actas de la Conferencia AAAI/ACM sobre IA, Ética y Sociedad, Nueva Orleans, LA, EE. UU., 2 y 3 de febrero de 2018; págs. 335–340.
43. Celis, LE; Huang, L.; Keswani, V.; Vishno, NK Clasificación con restricciones de equidad: un metaalgoritmo con garantías demostrables. En Actas de la Conferencia sobre Equidad, Responsabilidad y Transparencia, Atlanta, GA, EE. UU., 29 y 31 de enero de 2019; págs. 319–328.
44. Zafar, MB; Valera, I.; Rodríguez, MG; Gummadi, KP Equidad más allá del trato dispar y el impacto dispar: clasificación del aprendizaje sin maltrato dispar. En Actas de la 26.ª Conferencia Internacional sobre la World Wide Web, Perth, Australia, 3 a 7 de abril de 2017; págs. 1171-1180.
45. Agarwal, A.; Beygelzimer, A.; Dudík, M.; Langford, J.; Wallach, H. Un enfoque reductor para una clasificación justa. En procedimientos de la Conferencia Internacional sobre Aprendizaje Automático, Estocolmo (Suecia), 10 a 15 de julio de 2018; págs. 60–69.
46. Lowy, A.; Baharlouei, S.; Pavan, R.; Razaviyayn, M.; Beirami, A. Un marco de optimización estocástica para una minimización justa del riesgo. Trans. Mach. Aprender. Res. 2022. [Referencia cruzada]
47. Spinelli, I.; Scardapane, S.; Hussain, A.; Uncini, A. Fairdrop: Abandono de borde sesgado para mejorar la equidad en el aprendizaje de representación gráfica. Traducción IEEE. Artif. Intel. 2021, 3, 344–354. [Referencia cruzada]
48. Hort, M.; Zhang, JM; Sarro, F.; Harman, M. Fairea: Un enfoque de mutación del comportamiento modelo para comparar métodos de mitigación de sesgos. En actas de la 29.ª reunión conjunta de la ACM sobre la conferencia y el simposio europeo sobre ingeniería de software sobre los fundamentos de la ingeniería de software, Atenas, Grecia, 23 a 28 de agosto de 2012; págs. 994-1006.
49. Bhaskaruni, D.; Eh.; Lan, C. Mejora de la equidad de las predicciones mediante el conjunto de modelos. En Actas de la 31.ª Conferencia Internacional del IEEE sobre Herramientas con Inteligencia Artificial (ICTAI), Portland, Oregón, EE. UU., 4 a 6 de noviembre de 2019; págs. 1810–1814.
50. Iosifidis, V.; Fetahu, B.; Ntoutsi, E. Fae: Un marco de conjunto consciente de la equidad. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE sobre Big Data (Big Data), Los Ángeles, CA, EE. UU., 9 a 12 de diciembre de 2019; págs. 1375-1380.
51. Dwork, C.; Hardt, M.; Pitassi, T.; Reingold, O.; Zemel, R. Justicia a través de la conciencia. En las actas de la tercera innovación en Conferencia teórica sobre informática, Cambridge, MA, EE. UU., 8 a 10 de enero de 2012; págs. 214-226.
52. Pleiss, G.; Raghavan, M.; Wu, F.; Kleinberg, J.; Weinberger, KQ Sobre equidad y calibración. En Actas de los Avances en Sistemas de procesamiento de información neuronal, Long Beach, CA, EE. UU., 4 a 8 de diciembre de 2017.
53. Karimi-Haghighi, M.; Castillo, C. Mejora de una herramienta de predicción de reincidencia con aprendizaje automático: eficacia y equidad algorítmica. En Actas de la Decimoctava Conferencia Internacional sobre Inteligencia Artificial y Derecho, São Paulo, Brasil, 21 a 25 de junio de 2017; págs. 210-214.

Machine Translated by Google

54. Friedler, SA; Scheidegger, C.; Venkatasubramanian, S. La (im)posibilidad de la justicia: diferentes sistemas de valores requieren diferentes mecanismos para una toma de decisiones justa. Comunitario. ACM 2021, 64, 136-143. [Referencia cruzada]
55. García, V.; Sánchez, JS; Mollineda, RA Sobre la eficacia de los métodos de preprocesamiento cuando se trata de diferentes niveles de desequilibrio de clases. Sistema basado en el conocimiento. 2012, 25, 13-21. [Referencia cruzada]
56. Breiman, L. Clasificación y árboles de regresión; Routledge: Londres, Reino Unido, 2017.
57. Pedregosa, F.; Varoquaux, G.; Gramfort, A.; Michel, V.; Thirión, B.; Grisel, O.; Blondel, M.; Prettenhofer, P.; Weiss, R.; Dubourg, V.; et al. Scikit-learn: aprendizaje automático en Python. J. Mach. Aprender. Res. 2011, 12, 2825–2830.
58. Kelly, M.; Longjohn, R.; Nottingham, K. El repositorio de aprendizaje automático de la UCI. 2024. Disponible en línea: https://archive.ics.uci.edu (consultado el 10 de junio de 2024).
59. Becker, B.; Kohavi, R. Adulto. Repositorio de aprendizaje automático de la UCI. 1996. Disponible en línea: https://archive.ics.uci.edu/dataset/2/adulto (consultado el 10 de junio de 2024). [Referencia cruzada]
60. Hofmann, H.; Statlog (datos crediticios alemanes). Repositorio de aprendizaje automático de la UCI. 1994. Disponible en línea: https://archive.ics.uci.edu/dataset/144/statlog+alemán+crédito+datos (consultado el 10 de junio de 2024). [Referencia cruzada]
61. Dressel, J.; Farid, H. La precisión, la justicia y los límites de la predicción de la reincidencia. Ciencia. Adv. 2018, 4, eao5580. [Referencia cruzada]
62. Huang, Q.; Mao, J.; Liu, Y. Un algoritmo de búsqueda de cuadrícula mejorado para la optimización de parámetros SVR. En Actas de la 14.ª Conferencia Internacional del IEEE sobre Tecnologías de la Comunicación de 2012, Chengdu, China, 9 a 11 de noviembre de 2012; págs. 1022-1026.
63. Catón, S.; Haas, C. Equidad en el aprendizaje automático: una encuesta. Computación ACM. Sobrevivir. 2023, 56, 1–38. [Referencia cruzada]
64. Alabdulmohsin, I.; Lucic, M. Un algoritmo casi óptimo para desviar modelos de aprendizaje automático entrenados. En Actas de la 35.ª Conferencia sobre sistemas de procesamiento de información neuronal, en línea, del 6 al 14 de diciembre de 2021.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Procesamiento y distribución seguros de datos gestionados en privado Sistema de archivos interplanetario que utiliza pruebas de conocimiento cero

Kyohei Shibano 1,*, Kensuke Ito [1], Changhee Han [2], Tsz Tat Chu [2], Wataru Ozaki [2] y Gento Mogi [1]

[1] Departamento de Gestión Tecnológica para la Innovación, Escuela de Ingeniería, Universidad de Tokio, Tokio 113-8656, Japón
[2] Callisto Inc., Tokio 171-0022, Japón
* Correspondencia: shibano@tmi.tu-tokyo.ac.jp

Resumen: En este estudio, se propone un nuevo método de intercambio de datos que utiliza un sistema de archivos interplanetario privado (un sistema de almacenamiento descentralizado operado dentro de una red cerrada) para distribuir datos a entidades externas y al mismo tiempo hacer que su autenticidad sea verificable. Entre los dos modos operativos de IPFS, público y privado, este estudio se centra en el método para utilizar IPFS privado. El IPFS privado no está abierto al público en general; Aunque plantea un riesgo de manipulación de datos al distribuirlos a partes externas, el método propuesto garantiza la autenticidad de los datos recibidos. En particular, este método aplica un tipo de prueba de conocimiento cero, concretamente, el protocolo Groth16 de zk-SNARK, para garantizar que los datos correspondan al identificador de contenido en un IPFS privado. Además, el nombre del destinatario está incrustado en los datos distribuidos para evitar una distribución secundaria no autorizada. Los experimentos confirmaron la eficacia del método propuesto para un tamaño de datos de imagen de hasta 12 En estudios futuros, el método propuesto se aplicará a tipos de datos más grandes y diversos.

Palabras clave: IPFS; prueba de conocimiento cero; circom; zk-SNARK; IPFS privados; distribución de datos; procesamiento de datos ; seguridad de datos

check for updates

Cita: Shibano, K.; Está bien.; Han, C.; Chu, TT; Ozaki, W.; Mogi, G. Procesamiento y distribución seguros de datos gestionados en un sistema de archivos interplanetario privado mediante conocimiento cero Pruebas. Electrónica 2024, 13, 3025. https://doi.org/10.3390/electrónica13153025

Editor académico: Aryya Gangopadhyay

Recibido: 13 de junio de 2024
Revisado: 14 de julio de 2024
Aceptado: 20 de julio de 2024
Publicado: 31 de julio de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Los sistemas descentralizados son robustos porque carecen de un único punto de falla; por lo tanto, se aplican ampliamente en todos los sectores empresariales, incluidos las criptomonedas, la gestión de la cadena de suministro, los servicios financieros y la identidad digital. Para almacenar datos de gran tamaño, como imágenes , estos sistemas requieren funciones de almacenamiento que estén inherentemente descentralizadas. Blockchain, comúnmente utilizado en conjunto, generalmente maneja tamaños de datos más pequeños, como historiales de transacciones, y opera como una base de datos de libro mayor. El sistema de archivos interplanetario (IPFS) es un destacado sistema de almacenamiento descentralizado que almacena datos en múltiples nodos para mejorar la disponibilidad de los datos. El IPFS tiene dos variantes: IPFS público, en el que los datos pueden ser almacenados por cualquier usuario con acceso ilimitado, e IPFS privado, en el que se establece una red cerrada accesible sólo dentro de organizaciones o grupos específicos, que ofrece mayor privacidad y seguridad.

Al almacenar datos en IPFS, es fundamental comprender las diferencias entre IPFS público e IPFS privado. El IPFS público permite que cualquiera acceda a los datos, mientras que el IPFS privado solo es accesible dentro de organizaciones o grupos específicos, lo que mejora la privacidad y la seguridad. Al almacenar información confidencial, como datos confidenciales, en IPFS públicos, la aplicación de un esquema de cifrado adecuado es vital para garantizar la protección de los datos. Por el contrario, el IPFS privado proporciona mayor seguridad para el almacenamiento de datos, porque sólo es accesible dentro de una red cerrada.

Particularmente para organizaciones como corporaciones o instituciones de atención médica, almacenar datos en IPFS públicos, a pesar de utilizar tecnologías de cifrado sólidas, conlleva riesgos inherentes. Además, en tales casos existe persistentemente la posibilidad de que se produzcan fugas de datos debido a errores operativos ; Aunque los datos están cifrados, quedan expuestos al mundo, lo que los hace vulnerables a ataques de fuerza bruta y otras amenazas a la seguridad.

Machine Translated by Google

En cuanto a la accesibilidad, el IPFS público permite a los usuarios generales acceder y recuperar directamente datos. Sin embargo, en IPFS privado, los datos deben recibirse de miembros de la organización o grupo que constituye la red. Durante este proceso, si los datos son manipulados, los usuarios pueden incapaz de detectarlo. Por tanto, confiar en los intermediarios responsables del tratamiento de los datos. la transferencia en tales casos se vuelve obligatoria. Para abordar el problema de confianza antes mencionado, un nuevo En este documento se propone un método para distribuir datos almacenados en un IPFS privado a entidades externas. al tiempo que se hace verificable su autenticidad. El protocolo Groth16 [1] de zk-SNARKs, un tipo de ZKP, se aplica a los datos almacenados en un IPFS privado para garantizar la autenticidad de los datos. Además, la información del destinatario está integrada en los datos distribuidos para evitar distribución secundaria no autorizada. El método propuesto para compartir datos es importante. porque está adaptado al caso privado de IPFS.

Las diferencias en varios aspectos, incluida la seguridad y la accesibilidad, a la hora de almacenar Los datos en IPFS públicos e IPFS privados dentro del dominio empresarial se resumen en

Tabla 1. Este estudio propone soluciones a las amenazas asociadas a los IPFS privados.

Tabla 1. Comparación entre IPFS públicos y privados en el ámbito empresarial.

	IPFS pública	IPFS privado
Modelo de confianza	Sin esperanzas	Requiere confianza en el grupo operativo.
Restricciones de acceso	Accesible para cualquiera	Accesible sólo dentro del grupo operativo
Riesgo de fuga de datos	Riesgo constante de fuga debido a errores del usuario	Bajo riesgo de fuga dentro de una red cerrada
Manejo de confidencialidad Información	Requiere cifrado adecuado	Los datos almacenados en IPFS no requieren cifrado de alto nivel; hay un punto de confianza al pasar datos a los usuarios
Riesgo de ataque de fuerza bruta	Siempre presente	Bajo
Método de recuperación de datos	Acceso directo por parte de los usuarios	Datos recibidos de miembros de la organización o grupo
Amenazas	Requiere cifrado que impida el descifrado por parte de usuarios no autorizados	Existe riesgo de manipulación al transferir datos a los usuarios

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera. La sección 2 presenta antecedentes relacionados. investigación. La sección 3 describe las tecnologías fundamentales, es decir, ZKP y zk-SNARK. La Sección 4 describe la estructura del método propuesto, mientras que la Sección 5 describe la Posibles aplicaciones de este método. La sección 6 presenta la implementación de este método, mientras que la Sección 7 analiza los experimentos realizados para verificar la efectividad del implementación. La Sección 8 presenta una discusión de los resultados experimentales, mientras que la Sección 9 presenta las conclusiones del documento y un resumen de los desafíos futuros.

2. Estudios relacionados

Los sistemas descentralizados existentes utilizan IPFS, particularmente en combinación con blockchain tecnología. Kumar y cols. [2] propuso un método para gestionar de forma segura datos médicos mediante integrando IPFS con una cadena de bloques. Azbeg et al. [3] sugirió específicamente un sistema que datos médicos administrados y almacenados utilizando IPFS privado y una cadena de bloques autorizada por empleando volver a cifrar el proxy para garantizar un descifrado seguro por parte de los médicos designados. Cuando un El médico recibe algunos datos del paciente, obtiene los datos vueltos a cifrar a través de un hospital. Hossan et al. [4] también propuso un sistema para registrar de forma segura información para viajes compartidos. servicios que utilizan IPFS y una cadena de bloques privada.

Centrándose en controlar la distribución de los datos gestionados por IPFS, Lin et al. [5] propuso un sistema para proteger datos privados utilizando IPFS mejorado combinado con un cadena de bloques. Este sistema registró metadatos de archivos y accedió a permisos en la cadena de bloques, permitiendo a los usuarios controlar el intercambio de archivos. Además, el sistema implementó funciones de gestión eficientes mediante contratos inteligentes, mejorando así la seguridad y la gestión de los datos.

Machine Translated by Google

flexibilidad. Battah et al. [6] desarrolló un sistema que utilizaba autenticación multipartita (MPA), recifrado de proxy y contratos inteligentes en una cadena de bloques para el control de acceso descentralizado de datos cifrados almacenados en IPFS. Huang et al. [7] introdujo un proxy IPFS confiable para realizar control de acceso y administración de claves de grupo para datos cifrados almacenados en IPFS. Sol y cols. [8] propusieron un sistema que permitía solo a personas con atributos apropiados descifrar datos cifrados almacenados en IPFS utilizando un sistema de cifrado basado en atributos de política de texto cifrado, lo que facilitaba una gestión eficiente de la información médica. Kang et al. [9] permitió la distribución de datos gestionados utilizando IPFS privado y una cadena de bloques privada a usuarios externos utilizando una red de datos nombrada (NDN). Además, Uddin et al. [10] propusieron un sistema de intercambio de archivos que utilizaba IPFS y tecnología de infraestructura de clave pública (PKI) sin requerir un tercero confiable.

Varios estudios han utilizado ZKP para la distribución de datos. Por ejemplo, Li et al. [11] propuso un sistema de gestión de tráfico que preserva la privacidad y que combina pruebas de rango de conocimiento cero no interactivas con una cadena de bloques. Un prototipo que utiliza Hyperledger Fabric e Hyperledger Ursa cumplió con los requisitos de privacidad de datos para la gestión del tráfico en tiempo r

Este estudio propone un método para procesar y distribuir adecuadamente los datos gestionados dentro de IPFS privados a usuarios fuera de la red, ofreciendo así un enfoque diferente a los propuestos en estudios anteriores. Algunos estudios han adoptado el recifrado de proxy como un método apropiado para el almacenamiento y distribución de datos en IPFS [3,6]. Con este método, los datos distribuidos se pueden volver a cifrar para descifrarlos con la clave privada del destinatario. Además, al almacenar datos en IPFS, registrar el valor hash de los datos previamente cifrados en la cadena de bloques permite a los destinatarios verificar la exactitud de los datos recibidos después del descifrado. Sin embargo, este método no puede manejar casos en los que se procesan datos, como incrustar el nombre del destinatario en los datos descifrados, como en este estudio.

3. Prueba de conocimiento

cero ZKP es un protocolo criptográfico que permite a un probador demostrar la validez de una proposición a un verificador sin revelar ninguna información adicional aparte de la validez de la proposición. La propuesta de este estudio es que los datos proporcionados a una entidad externa se generen en base a un CID determinado. Nuestro objetivo es permitir que un miembro de IPFS privado (probador) pruebe esta proposición ante una entidad externa (verificador como destinatario de los datos) sin revelar ninguna otra información importante (como derechos de acceso de IPFS y claves de cifrado).

ZKP, específicamente el protocolo Groth16 de zk-SNARK utilizado en este estudio, comienza con una configuración confiable donde ambas partes establecen parámetros públicos que son cruciales para la generación segura y verificación de pruebas. En el esquema ZKP, primero generamos un circuito que describe el proceso para el cual se pretende realizar la prueba. El circuito incluye las condiciones a verificar como la existencia de un CID. A través del esquema ZKP, se crean claves criptográficas, específicamente una clave de prueba y una clave de verificación. Estas claves son cruciales para crear una prueba para el circuito y su verificación. Utilizando la clave de prueba y los datos de entrada, el probador genera una prueba que revela la validez de los datos de salida frente a las condiciones especificadas en el circuito. Luego, el verificador utiliza la clave de verificación para verificar la prueba y los datos de salida. Si la prueba es válida, confirma la integridad de los datos sin exponer ninguna información subyacente.

En este estudio, el procesamiento de Groth16 se realiza utilizando circom [12,13] y snarkjs [14]. El flujo del proceso se resume en la Figura 1.

zk-SNARKs se emplea debido a su naturaleza no interactiva y eficiencia, que son particularmente ventajosas para sistemas que emplean contratos inteligentes debido a los bajos costos computacionales para verificar la prueba. Además, zk-SNARKs es conocido por sus altos requisitos computacionales y la necesidad de especificaciones de PC avanzadas. Por ejemplo, en una de las aplicaciones representativas de zk-SNARK, Zcash [15], el proceso de generación de pruebas tarda más de medio minuto para una sola transacción anónima [16].

Machine Translated by Google

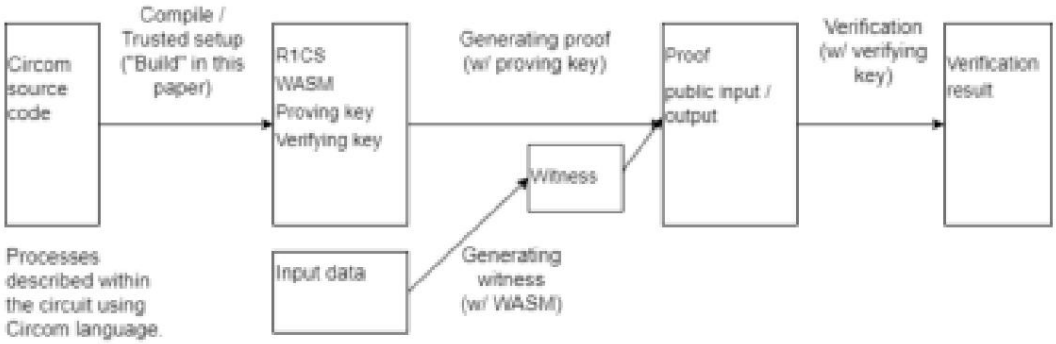


Figura 1. Prueba de conocimiento cero utilizando circom.

4. Sistema propuesto La

Figura 2 presenta una descripción general del sistema propuesto.

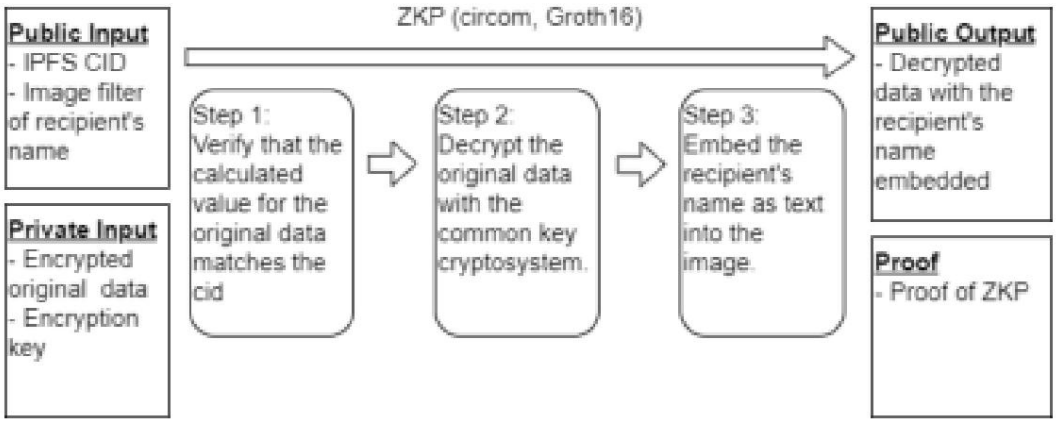


Figura 2. Flujo de proceso de ZKP: un ejemplo de procesamiento de datos de imágenes.

Aquí, hacemos las siguientes suposiciones: • IPFS

privado es operado por un número limitado de miembros. • Los datos se
almacenan en IPFS en un formato cifrado mediante criptografía de clave simétrica. • La clave de cifrado
está en manos exclusivas de un individuo entre los miembros, es decir, un
administrador.

El sistema propuesto facilita la creación de una prueba ZKP a través del circuito por parte del miembro poseedor de la clave de cifrado (equivalente a un administrador). Las entradas y salidas (distintas de las pruebas) de este proceso son las siguientes: • Entrada

pública: – CID de los

datos cifrados originales; – Un filtro para incrustar
el nombre del destinatario en los datos; • Entrada privada: – Datos

originales cifrados; -

Clave de encriptación; • Producción:

– Datos descifrados con el nombre del destinatario incrustado.

Tenga en cuenta que la implementación optimizada para ZK (Sección 6.1) agrega más información a la entrada pública. En particular, el proceso interno de ZKP implica los siguientes pasos:

1. Calcular el CID de los datos cifrados originales para verificar una coincidencia con el cifrado.
CID registrado.

Machine Translated by Google

2. Descifrar los datos originales mediante criptografía de clave simétrica.
3. Incrustar el nombre del destinatario en los datos sin procesar de la imagen descifrada según el filtro proporcionada en la opinión pública.

En el sistema propuesto, no nos centramos únicamente en los datos de imágenes, sino que los utilizamos como datos de ejemplo para verificar la aplicabilidad del esquema propuesto. Los filtros se utilizan para mejorar la eficiencia del procesamiento dentro del circuito. Como la incorporación de datos de nombres dentro del circuito requiere un gran esfuerzo computacional, una parte considerable del procesamiento de la imagen se realiza de antemano fuera del circuito y se crea un filtro. Utilizando información y pruebas públicas, el destinatario puede verificar que los datos descifrados (es decir, la salida) con su nombre incrustado se generan a partir de los datos originales (contenidos en la entrada privada) administrados con el CID. El destinatario puede consultar con al menos un miembro de la red para confirmar la existencia del CID en IPFS privado.

En resumen, el proceso antes mencionado permite al destinatario verificar la información recibida. datos realizando las siguientes tareas:

- verificar que los datos recibidos fueron generados a partir de los datos gestionados con el CID de IPFS privado,
- confirmar utilizando la prueba de que todo el proceso se realizó correctamente sin conocer directamente los datos cifrados o la clave de cifrado, y • verificar que el CID existe específicamente dentro del IPFS privado preguntando al menos a un miembro de la red.

La novedad del sistema propuesto es que permite verificar la autenticidad de los datos confiando en al menos un miembro de la red incluso si el destinatario no controla la clave de cifrado.
(Es natural que el receptor confíe en al menos un miembro de un sistema multimiembro en particular. Si no se puede confiar en ninguno de los miembros, habrá un incentivo marginal para recibir datos administrados por esa red).

5. Aplicaciones potenciales En la industria médica, los datos de diagnóstico de pacientes se gestionan en múltiples instituciones médicas. Utilizando el sistema propuesto, los pacientes pueden verificar si los datos que reciben realmente se administran en IPFS privado para garantizar la autenticidad. También se propone aquí una plataforma todo en uno para la investigación y el desarrollo de aprendizaje automático con imágenes médicas [17]. En esta plataforma, las imágenes médicas anónimas se gestionan en IPFS privados operados por un grupo de instituciones médicas. El sistema permite a los investigadores de aprendizaje automático, externos a la red, verificar si los datos de la imagen realmente se administran en el IPFS privado. Además, al incorporar información sobre los investigadores de aprendizaje automático en los datos de las imágenes, las instituciones médicas pueden mitigar el riesgo de distribución secundaria.

Si la aplicación no se limita a incorporar el nombre del destinatario, las aplicaciones potenciales del sistema propuesto se pueden ampliar aún más. Por ejemplo, considere un escenario en el que una empresa específica establece IPFS privados para compartir documentos confidenciales entre las empresas de su grupo. Si se incluyen datos de los empleados, ocultar datos privados y distribuirlos a entidades externas les permite a estas entidades confirmar la asociación de los empleados con la empresa y al mismo tiempo garantizar que su privacidad esté proteg
Además, supongamos que una universidad ha creado IPFS privados para permitir que sólo el personal académico acceda a los datos de rendimiento de los estudiantes. En este caso, los estudiantes pueden verificar que los datos de desempeño recibidos se administran genuinamente en el IPFS privado.
Por lo tanto, el sistema propuesto admite un caso híbrido: distribuir datos internos a entidades externas específicas según sea necesario, que prevalecen en entornos del mundo real.

6. Implementación El sistema propuesto se implementó para procesar datos de imágenes utilizando circom, una reconocida herramienta especializada en la construcción de circuitos zk-SNARK. Circom permite la descripción de procesos computacionales dentro de un circuito utilizando su lenguaje único, y la

Machine Translated by Google

El archivo ejecutable generado después de la compilación se puede invocar a través de la biblioteca JavaScript, snarkjs. Esta disposición permite describir los procesos del circuito en circom, y el procesamiento externo y las pruebas de corrección del circuito se realizan utilizando JavaScript. Para los zk-SNARK esquema, se utilizó Groth16; es conocido por su velocidad de ejecución relativamente más rápida que otros Esquema zk-SNARK.

En particular, trabajamos en dos tipos de implementaciones para datos de imágenes: un estándar implementación utilizando técnicas criptográficas generales y una implementación optimizada para ZK utilizando técnicas criptográficas compatibles con ZK para reducir el tiempo de cálculo del circuito. Estas implementaciones se utilizaron para comparar los tiempos de cálculo requeridos. Los circuitos ZKP requieren un tiempo de cálculo considerablemente largo, incluso para cálculos que pueden ser fácilmente manejado por software de computadora (esto es particularmente notable cuando se trata de datos de imagen). Por lo tanto, la eficiencia computacional es crucial para el uso práctico.

6.1. Implementación estándar

La sección 4 describe la entrada de datos en el circuito. Para simplificar el circuito procesamiento, los datos cifrados originales se formatearon como datos de imagen de mapa de bits compatibles con estándares OS/2. Los primeros 54 bytes de los datos de la imagen almacenan información como el ancho, alto y profundidad de color de las imágenes [18]. La profundidad del color es de 8 bits y cada color Al componente en RGB se le asigna un byte, lo que da como resultado una representación de 3 bytes por píxel.

Inicialmente, el sistema comprueba si los datos cifrados, introducidos como entrada privada, coincide con el CID proporcionado como entrada pública. Si no coinciden, el sistema indica un error y los datos de la imagen generados como salida son una secuencia de bytes donde todos los valores son 0x00. CID sirve como mecanismo crucial para identificar archivos de forma única y eficientemente Recuperar datos de IPFS. CID tiene dos versiones: V0 y V1 [19]. En este caso, cuanto más flexible Se utilizó la versión CID V1. CID incluye un hash de los datos respectivos, asegurando diferentes Los datos tendrán diferentes CID. Normalmente, el CID V1 se calcula utilizando el hash SHA256. función, y la implementación estándar utiliza SHA256 para calcular CID.

La estructura de datos de CID V1 se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Estructura de datos CID V1.

Posición del byte	Descripción	Valor en la implementación
Primer byte	Prefijo multibase	0x01
Segundo byte	de versión CID	0x55: datos sin procesar
Tercer byte	Identificador de función hash	0x12: SHA-256
Cuarto byte	Longitud del hash	0x20: 32 bytes
Desde el quinto byte	valor hash	Valor hash SHA-256 (32 bytes)

La codificación de CID se realiza utilizando Base32. Base32 codifica una secuencia de bytes construido en base a esta estructura para generar CID.

Dentro del circuito, el valor CID ingresado se decodifica desde Base32 y el sistema comprueba si el valor hash extraído coincide con el hash SHA256 calculado a partir del datos cifrados.

Posteriormente, los datos cifrados se descifran. AES-CTR se utiliza como cifrado algoritmo, que es un tipo de criptografía de clave simétrica. El cifrado AES-CTR y se utilizó el descifrado en circom-chacha20 [20] . Para descifrar el cifrado AES-CTR, Se requieren la clave de cifrado y el nonce utilizados durante el cifrado. Se introducen en el circuito como una clave de 256 bits y un nonce de 128 bits, respectivamente, como entradas privadas. Además, AES-CTR maneja volúmenes de datos en múltiplos de 16. Por lo tanto, si la longitud de la imagen Los datos antes del cifrado no son múltiplos de 16, se agregan ceros (0x00) al final de los datos. para alinearlo con este requisito.

Finalmente, se aplica un filtro a los datos descifrados para incrustar el nombre del destinatario. La implementación de texto incrustado directamente dentro del circuito puede aumentar sustancialmente la carga de cálculo; por lo tanto, se crea un filtro fuera del circuito que realiza una considerable

Machine Translated by Google

parte del procesamiento de la imagen por adelantado. La fuente utilizada para el texto que representa el nombre del destinatario es la fuente Misaki [21]. Luego, el filtro se utiliza para agilizar el procesamiento dentro del circuito. El filtro es una lista de números donde se utilizan valores del 0 al 255 para cambiar el color de cada píxel en caso de que difiera del de los píxeles de la imagen original; además, un valor de 300 indica que el color debe permanecer como en la imagen original. Este filtro representa la posición en la imagen donde se debe insertar el nombre del destinatario.

Dentro del circuito, los colores de píxeles especificados en los datos BMP descifrados se cambian según este filtro.

6.2. Implementación optimizada para ZK

La implementación optimizada para ZK cambia la función hash, la tecnología de cifrado y el procesamiento en circuito a la implementación de cifrado estándar compatible con ZK. Esta implementación mejora la eficiencia computacional y no evalúa la diferencia en las velocidades de cálculo entre el cifrado compatible con ZK y el cifrado general. Por lo tanto, también se modificó el procesamiento en circuito.

El hash Poseidon [22] se utilizó como función hash para calcular el CID. En particular, el uso del hash Poseidon para CID no está oficialmente soportado; por lo tanto, fue desarrollado específicamente para este estudio. Aunque SHA256 se usa comúnmente en cálculos generales, exige un tiempo de cálculo considerable dentro de los circuitos ZKP. El hash Poseidon se implementa en circom y JavaScript (circomlib [23] y circomlibjs [24], respectivamente). Se calcula sobre un campo finito con orden primo y puede aceptar hasta 16 variable El orden utilizado es menor que el máximo de 32 bytes pero mayor que el máximo de 31 bytes. Esto indica que cada una de las 16 entradas debe contener datos que no excedan este orden. En esta implementación, los datos destinados al cálculo hash se dividen en segmentos de 31 bytes como valores de entrada. Si la división excede los 16 segmentos, el hash de Poseidón se calcula para los primeros 16 segmentos. Este resultado se agrega a los siguientes 15 segmentos de datos para una entrada hash Poseidon posterior. El proceso se repite hasta que todos los datos de entrada se utilizan para el cálculo hash. Computacionalmente, si la entrada final no completa 16 segmentos, las entradas faltantes se establecen en cero para garantizar que el cálculo siempre involucre 16

Al generar CID a partir del valor hash de Poseidon, la secuencia de bytes debe seguir la estructura de datos CID V1 y estar codificada en Base32. Sin embargo, para reducir aún más el tiempo de cálculo, esta implementación omite la codificación Base32 y utiliza directamente el valor hash Poseidon como sustituto del CID. Dividir los datos de entrada en 16 segmentos dentro del circuito requiere una gran cantidad de cálculo; por lo tanto, esta división se realiza fuera del circuito y se da como entrada. En este caso, la secuencia de bytes de datos cifrados y la lista de valores para calcular el hash de Poseidón se proporcionan como entradas públicas, lo que permite verificar que ambos conjuntos de datos representan la misma información. Los destinatarios pueden confirmar que los datos que se calculan para el hash de Poseidón y los datos que se descifran en el circuito son idénticos al convertir y verificar mutuamente estos dos valores. En este caso, como los usuarios pueden obtener los datos descifrados, existe la preocupación de que se filtre la contraseña mediante ataques de fuerza bruta u otros medios.

Para la tecnología de cifrado, adoptamos el cifrado Poseidon [25] en lugar del cifrado AES- CTR. El cifrado Poseidon, implementado en circom y TypeScript (poseidon- cryption-circom2 [26]), implica recibir la clave pública del destinatario, generar una clave común y garantizar un cifrado y descifrado seguro por parte de ambas partes. En este caso, sin embargo, se genera directamente una clave común que se utiliza para el cifrado y descifrado. El circuito cuenta con dos valores que representan las coordenadas de una curva elíptica y un valor nonce como entradas privadas para el cifrado. Además, el filtro se implementa de la misma manera que en la implementación estándar.

7. Evaluación

Creamos un programa de muestra basado en las implementaciones antes mencionadas que usa circom para describir el circuito y usa snarkjs para ejecutar el circuito y verificar.

Machine Translated by Google

pruebas. Como bibliotecas criptográficas, circom-chacha20 [20], circomlib [23], circomlibjs [24], y se utilizaron poseidon-encryption-circom2 [26] .

Se implementaron las implementaciones estándar y optimizada para ZK para cada circuito, y sus tiempos de cómputo se compararon durante la ejecución. Imágenes de mapa de bits blancas fueron las imágenes objetivo, y los experimentos se realizaron utilizando la letra "A" como carácter incrustado. Como incrustar cualquier número de caracteres no altera el procesamiento por el filtro, incrustar un solo carácter permitió comparar los tiempos de cálculo. Además, variamos los tamaños de las imágenes para medir los tiempos de ejecución de cada circuito. Los tamaños utilizados fueron 10×10, 15×15, 30×15, 30×30, 60×30, 60×60, 120×60, 120×120, y 180 × 120 píxeles. El entorno de ejecución fue Windows 11 con un Ryzen 9 3950X CPU y 128 GB de RAM operando bajo Ubuntu 22.04 en un entorno WSL2.

La Figura 3 muestra una imagen de ejemplo generada por el circuito, específicamente para el 60 × 30 píxeles. tamaño utilizando la implementación optimizada para ZK. Se presentan los resultados para cada tamaño de imagen. en la Tabla 3, donde las restricciones no lineales indican el número de restricciones no lineales en el circuito, el tiempo de construcción es el tiempo necesario para compilar circom y generar el circuito, y la prueba El tiempo de generación es el tiempo necesario para generar pruebas utilizando el circuito. Como la implementación estándar utiliza cifrado AES-CTR, se añaden datos con 0x00 al final para garantizar que el El tamaño de entrada es múltiplo de 16.

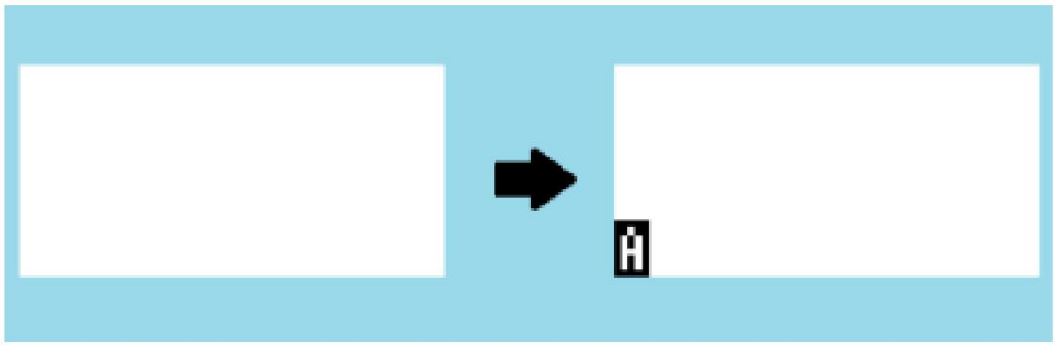


Figura 3. Una imagen generada por el circuito para un tamaño de imagen de 60 × 30 mediante una implementación optimizada para ZK.

Tabla 3. Comparación del tiempo de ejecución del circuito.

	Píxel	Tamaño de la imagen [Byte]	No lineal Restricciones	Tiempo de construcción [EM]	Generación de prueba Tiempo [ms]
Estándar					
	10 × 10	384	558.341	668.220	14.377
	15 × 15	784	1.095.292	1.316.666	25.545
	30 × 15	1440	1.980.688	1.696.370	35.161
	30 × 30	2816	3.867.989	3.657.578	65.785
	60 × 30	5456	7.453.300	7.864.583	126,262
optimizado para ZK					
	10 × 10	376	35.407	128.979	3076
	15 × 15	775	72.725	173.210	4032
	30 × 15	1435	134.663	275.630	5900
	30 × 30	2815	263.450	470.872	9733
	60 × 30	5455	509.375	850.612	17.571
	60 × 60	10.855	1.013.483	1.257.418	29.044
	120 × 120	43.255	4.036.913	6.754.928	96.580

En implementaciones estándar y optimizadas para ZK para 60 × 60 píxeles y 180 × 120 píxeles tamaños de imagen, el sistema se quedó sin memoria y no se pudo completar el cálculo. En la implementación optimizada para ZK, el número de restricciones no lineales se redujo a aproximadamente una décima parte de la implementación estándar para el mismo tamaño de imagen.

Machine Translated by Google

Esto redujo los tiempos de generación de compilación y prueba. Sin embargo, el tamaño máximo de imagen manejable seguía siendo sólo de 120 × 120 píxeles, lo que es considerablemente pequeño para aplicaciones prácticas.

8. Discusión

Aunque se utilizaron tecnologías criptográficas compatibles con ZK y se optimizaron los procesos en el circuito durante la implementación optimizada de ZK, el tamaño máximo de imagen manejable fue de aproximadamente 120 × 120 píxeles. Esto limita la utilidad práctica a tamaños de imagen considerablemente pequeños. Sin embargo, se están realizando investigaciones destinadas a mejorar el rendimiento de los ZKP y los avances tecnológicos futuros pueden permitir el manejo de tamaños de imágenes más grandes. Por ejemplo, Zhang et al. [27] lograron una aceleración diez veces mayor de los zk-SNARK utilizando ASIC. Ma et al. [16] utilizaron de manera similar unidades de procesamiento de gráficos para acelerar el tiempo de generación de pruebas, logrando un rendimiento hasta 48,1 veces más rápido en comparación con los métodos tradicionales. Además, se han propuesto métodos para simplificar los procesos computacionales, como el método del "plegado". Este método comprime las proposiciones que se prueban [28]. A medida que se vayan estudiando progresivamente las mejoras en la velocidad , es probable que también se optimice el consumo de memoria. Esto permitirá potencialmente el manejo de tamaños de imagen más grandes en el futuro.

Además, descubrimos que nuestro método de propuesta puede manejar tamaños de datos de aproximadamente 10 KB. Aunque aplicar directamente nuestra propuesta a datos de imágenes realistas (que van desde varios MB hasta docenas de MB) es un desafío, dividir los datos en fragmentos modificando el cifrado y las cadenas incrustadas podría hacer que la aplicación sea factible.

Además, nuestras implementaciones requieren un valor basado en el tamaño de los datos originales que se procesarán (cifrarán) como argumento durante la generación del circuito. Por lo tanto, se debe generar un circuito para cada dato. El tiempo de generación del circuito (tiempo de construcción) aumenta considerablemente con el tamaño de los datos de la imagen; por ejemplo, incluso en una implementación optimizada para ZK, generar un circuito para un tamaño de imagen de 120 × 120 requiere más de 112 minutos (6,754,9
Sin embargo, una vez generado el circuito, el tiempo de generación de la prueba en las mismas condiciones es corto, aproximadamente 97 s (96,580 ms). En otras palabras, una vez que se genera un circuito, la generación de pruebas no requiere mucho tiempo. Este hecho no plantea ningún problema práctico en los casos en que la misma imagen se distribuye a varias personas.

En las implementaciones compatibles con ZK, los datos cifrados se ingresan como entrada pública. El manejo de claves de cifrado para imágenes requiere una consideración cuidadosa. Los datos gestionados en IPFS privados están cifrados. Sin embargo, si se filtran las claves de cifrado, los datos cifrados podrían descifrarse. Por lo tanto, los usuarios específicos que administran IPFS privados deben convertirse en administradores para administrar cuidadosamente las claves o se podría establecer una cadena de bloques de tipo consorcio en la misma red para establecer y administrar los derechos de acceso de manera adecuada.

9. Conclusiones

En este documento se propuso un nuevo método para distribuir datos almacenados en IPFS privados a entidades externas y al mismo tiempo hacer verificable su autenticidad. El método aplicó un tipo de ZKP, zk-SNARKs, para verificar el CID de los datos e incrustar el nombre del destinatario. Este enfoque permite a entidades externas verificar que los datos recibidos se generan a partir de los datos originales en IPFS privado sin requerir detalles como derechos de acceso a IPFS y claves de cifrado.

Se implementó una implementación estándar que utiliza técnicas criptográficas convencionales y una implementación optimizada para ZK que utiliza esquemas criptográficos compatibles con ZK para mejorar la eficiencia computacional del método propuesto. Los experimentos con un programa de muestra confirmaron la eficacia del método propuesto para un tamaño de datos de imagen de hasta 120 × 120 píxeles.

Este método propuesto amplía la gama utilizable de sistemas de almacenamiento descentralizados a un caso híbrido: distribuye datos internos a entidades externas específicas según sea necesario. Este estudio allana una nueva forma de compartir información confidencial entre diferentes sectores dentro y fuera de un grupo. Sin embargo, para una amplia aplicabilidad práctica del método propuesto a tipos de datos más grandes y diversos, como imágenes y videos, la velocidad de procesamiento debe

Machine Translated by Google

Se deben mejorar y utilizar métodos de división de datos, que están dentro del alcance de nuestros estudios futuros.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, KS, CH, TTC y WO; escritura: preparación del borrador original , KS; redacción: revisión y edición, KS y KI; supervisión, GM; administración del proyecto, KS Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: esta investigación se llevó a cabo como un proyecto de investigación colaborativo entre la Universidad de Tokio y Callisto Inc., financiado por Callisto Inc. Este trabajo ha sido apoyado por la Cátedra Endowed for Blockchain Innovation y el Centro Mohammed bin Salman para la Ciencia y Tecnología Futuras de Arabia Saudita. -Japan Vision 2030 (MbSC2030) en la Universidad de Tokio.

Declaración de disponibilidad de datos: el código fuente utilizado para las simulaciones está disponible en GitHub. https://github.com/blockchaininnovation/circom_image_processing (consultado el 21 de marzo de 2024).

Conflictos de intereses: El autor Changhee Han, Tsz Tat Chu y Wataru Ozaki fueron empleados de la empresa Callisto Inc. Los autores restantes declaran que la investigación se realizó en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un posible conflicto de intereses. .

Referencias

1. Groth, J. Sobre el tamaño de los argumentos no interactivos basados en emparejamientos. En Actas de los avances en criptología – EUROCRYPT 2016: 35.ª Conferencia internacional anual sobre teoría y aplicaciones de técnicas criptográficas, Viena, Austria, 8 a 12 de mayo de 2016; Actas, Parte II 35; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2016; págs. 305–326.
2. Kumar, S.; Bharti, Alaska; Amin, R. Almacenamiento seguro descentralizado de registros médicos utilizando Blockchain e IPFS: una comparación análisis con direcciones futuras. Seguro. Priv. 2021, 4, e162. [Referencia cruzada]
3. Azbeg, K.; Ouchetto, O.; Andaloussi, SJ BlockMedCare: Un sistema sanitario basado en IoT, Blockchain e IPFS para datos seguridad de la gestión. Egipto. Informar. J. 2022, 23, 329–343. [Referencia cruzada]
4. Hossan, MS; Khatun, ML; Rahman, S.; Reno, S.; Ahmed, M. Asegurar el servicio de viajes compartidos utilizando IPFS e Hyperledger basado en blockchain privada. En actas de la 24.ª Conferencia Internacional sobre Informática y Tecnología de la Información (ICCIT) de 2021, Dhaka (Bangladesh), 18 a 20 de diciembre de 2021; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2021; págs. 1–6.
5. Lin, Y.; Zhang, C. Un método para proteger datos privados en IPFS. En actas de la 24.ª Conferencia internacional del IEEE de 2021 sobre trabajo cooperativo en diseño asistido por computadora (CSCWD), Dalian, China, 5 a 7 de mayo de 2021; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2021; págs. 404–409.
6. Battah, AA; Madine, MM; Alzaabi, H.; Yaqoob, I.; Salah, K.; Jayaraman, R. Autorización multipartita basada en Blockchain para acceder a datos cifrados IPFS. Acceso IEEE 2020, 8, 196813–196825. [Referencia cruzada]
7. Huang, HS; Chang, TS; Wu, JY Un sistema seguro para compartir archivos basado en IPFS y blockchain. En Actas de la 2.ª Conferencia Internacional sobre Comunicación Electrónica, Singapur, 8 a 10 de julio de 2020; págs. 96-100.
8. Sol, J.; Yao, X.; Wang, S.; Wu, Y. Esquema de acceso y almacenamiento seguro basado en blockchain para registros médicos electrónicos en IPFS. Acceso IEEE 2020, 8, 59389–59401. [Referencia cruzada]
9. Kang, P.; Yang, W.; Zheng, J. Método de intercambio de almacenamiento de archivos privado Blockchain basado en IPFS. Sensores 2022, 22, 5100. [CrossRef] [PubMed]
10. Uddin, Minnesota; Hasnat, AHMA; Nasrin, S.; Alam, MS; Yousuf, MA Sistema seguro para compartir archivos que utiliza tecnologías blockchain, ipfs y pki. En actas de la Quinta Conferencia Internacional sobre Tecnologías de la Información y las Comunicaciones Eléctricas (EICT) de 2021, Khulna, Bangladesh, 17 a 19 de diciembre de 2021; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2021; págs. 1 a 5.
11. Li, W.; Guo, H.; Nejad, M.; Shen, CC Gestión del tráfico que preserva la privacidad: un enfoque inspirado en blockchain y prueba de conocimiento cero . Acceso IEEE 2020, 8, 181733–181743. [Referencia cruzada]
12. Bellés-Muñoz, M.; Isabel, M.; Muñoz-Tapia, JL; Rubio, A.; Baylina, J. Circom: un lenguaje de descripción de circuitos para la construcción. Aplicaciones de conocimiento cero. Traducción IEEE. Seguridad confiable. Computadora. 2022, 20, 4733–4751. [Referencia cruzada]
13. Sitio web oficial de Circom. Disponible en línea: https://iden3.io/circom (consultado el 24 de marzo de 2024).
14. Repositorio Snarkjs Github. Disponible en línea: https://github.com/iden3/snarkjs (consultado el 4 de junio de 2024).
15. ZCash. Disponible en línea: https://z.cash/ (consultado el 12 de julio de 2024).
16. Ma, W.; Xiong, Q.; Shi, X.; Mamá, X.; Jin, H.; Kuang, H.; Gao, M.; Zhang, Y.; Shen, H.; Hu, W. Gzkp: Un sistema de prueba de conocimiento cero acelerado por GPU. En actas de la 28.ª Conferencia internacional de ACM sobre soporte arquitectónico para lenguajes de programación y sistemas operativos, volumen 2, Vancouver BC Canadá, 25 a 29 de marzo de 2023; págs. 340–353.
17. Han, C.; Shibano, K.; Ozaki, W.; Osaki, K.; Haraguchi, T.; Hirahara, D.; Kimura, S.; Kobayashi, Y.; Mogi, G. Plataforma todo en uno para I+D de IA en imágenes médicas, que abarca la recopilación, selección, anotación y preprocesamiento de datos. En Actas de Medical Imaging 2024: Imaging Informatics for Healthcare, Research and Applications, San Diego, CA, EE. UU., 18 a 23 de febrero de 2024; SPIE: Bellingham, WA, EE. UU., 2024; Volumen 12931, págs. 311–315.
18. Miano, J. Formatos de archivos de imágenes comprimidas: Jpeg, png, gif, xbm, bmp; Addison-Wesley Profesional: Boston, MA, EE. UU., 1999.

Machine Translated by Google

19. Identificadores de contenido (CID). Disponible en línea: https://docs.ipfs.tech/concepts/content-addressing/#cids-are-not-file-hashes (consultado el 24 de marzo de 2024). 20. circom-chacha20
Repositorio Github. Disponible en línea: https://github.com/reclaimprotocol/circom-chacha20 (consultado el 24 marzo de 2024).
21. La fuente japonesa de 8 × 8 puntos “Misaki Font”. Disponible en línea: https://littlelimit.net/misaki.htm (consultado el 11 de junio de 2024). (En japonés)
22. Grassi, L.; Khovratovich, D.; Rechberger, C.; Roy, A.; Schofnegger, M. Poseidon: Una nueva función hash para sistemas de prueba de {conocimiento cero} . En actas del 30.º Simposio de seguridad de USENIX (USENIX Security 21), Vancouver, BC, Canadá, 11 a 13 de agosto de 2021; págs. 519–535.

23. Repositorio Circomlib Github. Disponible en línea: https://github.com/iden3/circomlib (consultado el 21 de marzo de 2024).
24. Repositorio Github de Circomlibjs. Disponible en línea: https://github.com/iden3/circomlibjs (consultado el 21 de marzo de 2024).
25. Khovratovich, D. Cifrado con Poseidón. 2019. Disponible en línea: https://drive.google.com/file/d/1EVrP3DzoGbmzkRmYnyEDclQcXVU7GlOd/vista (consultado el 19 de julio de 2024).
26. Repositorio Github Poseidon-Encryption-Circom2. Disponible en línea: https://github.com/Shigoto-dev19/poseidon-encryption-c ircom2 (consultado el 21 de marzo de 2024).
27. Zhang, Y.; Wang, S.; Zhang, X.; Dong, J.; Mao, X.; Largo, F.; Wang, C.; Zhou, D.; Gao, M.; Sun, G. Pipezk: Acelerando la prueba de conocimiento cero con una arquitectura canalizada. En actas del 48.º Simposio internacional anual sobre arquitectura informática (ISCA) de ACM/IEEE de 2021, Valencia, España, 14 a 18 de junio de 2021; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2021; págs. 416–428.
28. Kothapalli, A.; Setty, S.; Tzialla, I. Nova: Argumentos recursivos de conocimiento cero a partir de esquemas plegables. En Actas de la Conferencia Anual Internacional de Criptología, Santa Bárbara, CA, EE. UU., 15 a 18 de agosto de 2022; Springer: Cham, Suiza, 2022; págs. 359–388.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Un enfoque de navegación cooperativa autónoma para Múltiples vehículos terrestres no tripulados en una variable Entorno de comunicación

Xudong Lin y Mengxing Huang *

Escuela de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones, Universidad de Hainan, Haikou 570228, China; linx424523604@163.com

* Correspondencia: huangmx09@163.com

Resumen: Los robots ayudan a los servicios de emergencia recopilando información crítica de forma remota. El despliegue de múltiples vehículos terrestres no tripulados (UGV) cooperativos para una respuesta puede reducir el tiempo de respuesta, mejorar el conocimiento de la situación y minimizar los costos. La comunicación confiable es fundamental para múltiples UGV para la respuesta ambiental porque varios robots necesitan compartir información para la navegación cooperativa y la recopilación de datos. En este trabajo, investigamos una política de control para una comunicación óptima entre múltiples UGV y estaciones base (BS). Se propone un algoritmo de gradiente de política determinista profundo de múltiples agentes (MADDPG) para actualizar la política de control para la relación señal-interferencia máxima. Los UGV se comunican tanto con las BS fijas como con una BS móvil. La política de control propuesta puede navegar por los UGV y las BS móviles para optimizar la comunicación y la intensidad de la señal. Finalmente, se propone un algoritmo genético (GA) para optimizar los hiperparámetros del entrenamiento basado en MADDPG. Los resultados de la simulación demuestran la eficiencia computacional y la solidez del algoritmo MADDPG basado en GA para el control de múltiples UG

Palabras clave: vehículos terrestres no tripulados (UGV); algoritmo genético (GA); gradiente de políticas determinista profundo de múltiples agentes (MADDPG); navegación autónoma

check for updates

Cita: Lin, X.; Huang, M. An Navegación Cooperativa Autónoma Enfoque para múltiples vehículos no tripulados Vehículos terrestres en una variable Entorno de comunicación. Electrónica 2024, 13 , 3028. https://doi.org/10.3390/electronics13153028

Editores académicos: Eric Matson y Joven Im Cho

Recibido: 18 de junio de 2024
Revisado: 25 de julio de 2024
Aceptado: 30 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Una red de vehículos terrestres no tripulados (UGV) distribuidos y un controlador central se conoce como sistema de control multi-UGV [1]. Este sistema permite la dominación autónoma, la navegación autónoma y la colaboración autónoma. Puede operar dentro de un área restringida o como parte de un sistema de transporte más amplio. Los sistemas de control Multi-UGV ofrecen un enfoque único de navegación que es altamente confiable, más económico y propicio para el ahorro de energía. En los últimos años, la demanda urgente de sistemas de navegación multi-UGV ha fomentado un debate cada vez mayor en el ámbito académico [2–5].

La navegación de UGV en un entorno de comunicación ha sido objeto de investigación [6], y los métodos de optimización tradicionales han dado buenos resultados [7]. Para crear un sistema de navegación autónomo, D. Chen et al. [8] desarrollaron un algoritmo heurístico de Monte Carlo que depende de una transformada de Hough discreta y una localización de Monte Carlo, lo que garantiza una baja complejidad para el procesamiento en tiempo real. A diferencia de la innovación de los algoritmos , para funcionar de manera robusta en entornos desconocidos y desordenados, HU Unlu et al. [9] crearon un enfoque sólido para la navegación inercial asistida por visión que puede soportar incertidumbres . A diferencia del uso de ayudas visuales, X. Lyu et al. [10] se inspiró en un punto de vista geométrico y diseñaron un nuevo esquema de tecnología de fusión de información de navegación integrada con factor de intercambio adaptativo que tiene navegación adaptativa en el caso de sistemas no lineales y utiliza una distribución no gaussiana. Estos métodos de optimización tradicionales mencionados anteriormente son fáciles de implementar. Sin embargo, estos métodos deben presentarse con condiciones previas, lo que los hace adecuados sólo para entornos estáticos. Además, en realidad, la mayoría de los escenarios implican la operación colaborativa de

Machine Translated by Google

En consecuencia, los sistemas multi-UGV encontrarán estos dos desafíos al manejar escenarios complejos, y es necesaria la incorporación de aprendizaje automático (ML) para abordarlos de manera efectiva [12-14].

Existe una sólida justificación para emplear técnicas de ML en la navegación de UGV, considerando los rápidos avances en el campo de ML. Para lograr un mejor rendimiento en el alcance, H. Lee et al. [15] proporcionó una técnica de ML para calcular la distancia entre la BS y los UGV, lo que permite la localización sin ninguna infraestructura adicional. En lugar de depender del alcance directo, HT Nguyen et al. desarrolló un sistema de coordinación entre vehículos aéreos no tripulados y UGV, que permite una navegación colaborativa eficaz [15].

Sin embargo, a medida que el entorno de simulación se vuelve más complejo, la eficacia de la solución propuesta disminuye rápidamente. Para abordar este desafío, emplear algoritmos de aprendizaje por refuerzo (RL) es una opción prometedora. RL enfatiza cómo los agentes pueden descubrir la mejor política para maximizar todas las recompensas al interactuar con el entorno, lo que lo hace muy adecuado para explorar y adaptarse a entornos cada vez más complejos [16].

La investigación ha sido impulsada recientemente por debates sobre el uso de RL para resolver el problema de la navegación cooperativa de múltiples UGV [17]. Para evitar colisiones con obstáculos, X. Huang et al. [18] propusieron un innovador sistema de navegación de planificación de rutas locales UGV basado en RL profundo que aprovecha la percepción multimodal para facilitar el aprendizaje de políticas para generar acciones de navegación flexibles. A diferencia de la navegación UGV única, para mejorar la eficiencia espectral promedio, S. Wu et al. [19] propusieron una tecnología de optimización de trayectoria basada en un gradiente de política determinista profundo de múltiples agentes conjunto (F-MADDPG), que hereda la capacidad de MADDPG para impulsar múltiples UGV de manera cooperativa y utiliza promedios conjuntos para eliminar el aislamiento de datos y acelerar la convergencia. Se han logrado avances significativos con estos métodos de navegación UGV basados en RL. Sin embargo, pasan por alto las limitaciones de los entornos de comunicación estáticos y los problemas de convergencia que surgen de la complejida
Es crucial tener en cuenta estos dos elementos al planificar la navegación cooperativa en un entorno de comunicación.

Teniendo en cuenta las limitaciones de la navegación de cobertura de comunicación cooperativa para UGV, hay tres desafíos principales que superar, como la dificultad del control simultáneo de UGV, la variación en la cobertura de comunicación y la complejidad del entorno de control cooperativo para UGV. En primer lugar, los métodos de control tradicionales como Q-learning [20], control proporcional-integral-derivado (PID) [21] y Q-network profundo [22] a menudo producen un rendimiento subóptimo en términos de cobertura de comunicación cuando múltiples agentes requieren simultáneamente control. En segundo lugar, considerando la variabilidad en el entorno de comunicación durante la navegación con múltiples UGV, es común encontrar áreas con mala comunicación, lo que dificulta la colaboración efectiva entre múltiples UGV.

Sin embargo, los algoritmos RL multiagente ofrecen una solución prometedora para abordar los desafíos del control cooperativo multiagente [23]. Estos algoritmos guían la colaboración entre múltiples agentes a través del paradigma de capacitación centralizada y ejecución descentralizada (CTDE) [24].

Además, en nuestro enfoque propuesto, introducimos un UGV BS móvil integrado con los UGV, lo que permite cambios dinámicos en el entorno de comunicación fijo. Esta colaboración apoya eficazmente las tareas de navegación de los UGV. Sin embargo, la mayor complejidad del entorno construido puede plantear desafíos para la eficacia y la convergencia de los algoritmos. Afortunadamente, mitigamos las dificultades de convergencia mediante la actualización adaptativa de hiperparámetros dinámicos utilizando un algoritmo genético (GA) [25]. Afortunadamente, se han realizado algunas investigaciones sobre la integración de GA para el ajuste de hiperparámetros en marcos de RL.

A. Sehgal y col. utilizó un GA para encontrar la repetición de la experiencia en retrospectiva (HER) utilizada en un gradiente de política determinista profundo (DDPG) en una tarea de manipulación de robots para ayudar al agente a acelerar el aprendizaje [26]. A diferencia de modificar un solo parámetro, para el problema de programación flexible del taller (FJSP), Chen R et al. propuso un método de ajuste de parámetros GA basado en Q-learning que cambia varios parámetros clave en Q-learning para obtener valores de recompensa más altos [27]. Sin embargo, este enfoque basado en recompensas tiende a caer en la optimización local. Además, estos métodos no son adecuados para escenarios en los que aumenta el número de agentes. Para abordar estas cuestiones, Alipour et al. propuso hibridar un GA co

Machine Translated by Google

una heurística RL de múltiples agentes para resolver el problema del viajante. De esta manera, un GA con un novedoso operador cruzado actúa como una heurística de mejora de viajes, mientras que MARL actúa como una heurística de construcción [28]. Aunque este enfoque evita el riesgo de optimización local, abandona el proceso de aprendizaje de MARL y solo lo usa como heurística, en lugar de usar GA para entrenamiento, lo que significa que el algoritmo no prestará demasiada atención al Colaboración entre agentes inteligentes. Liu y cols. utilizó un sistema descentralizado parcialmente observable Método de planificación de rutas multiagente basado en RL evolutivo (MAPPER) para aprender de manera efectiva. Estrategias de planificación local en entornos dinámicos mixtos. Basado en el entrenamiento de aprendizaje por refuerzo de múltiples agentes , utilizaron GA para extender iterativamente el algoritmo originalmente entrenado. a un modelo más complejo. Aunque este método evita la degradación del rendimiento en tareas a largo plazo, la GA iterativa no necesariamente se adapta bien a entornos más complejos [29].

En nuestra investigación, combinamos las ventajas de los artículos GA mencionados anteriormente y adoptamos el paradigma CTDE para realizar investigaciones en un marco de RL de múltiples agentes. La AG asigna diferentes pesos a las actualizaciones de algoritmos según la contribución de la transición, lo que significa que prestemos más atención a los hiperparámetros que contribuyen más a la actualización del modelo en lugar de aquellos que logran mayores valores de recompensa. Esto nos permite evitar caer en Optimidad local al tiempo que se aumenta el número de agentes.

Para abordar estos tres desafíos y lograr una navegación cooperativa en complejos En entornos ambientales, se propone un nuevo método de navegación de cobertura de comunicación multi-UGV , que se basa en un gradiente de política determinista profundo de múltiples agentes con GA (GA- MADDPG). A continuación se resumen las contribuciones clave del método de navegación con cobertura de comunicación multi-UGV:

- Un patrón integral de múltiples agentes se combina en la colaboración multi-UGV sistema de navegación y la coordinación óptima de múltiples UGV dentro del área de cobertura de comunicación se formula como un proceso de decisión de Markov de múltiples agentes en tiempo real. (MDP) modelo. Todos los UGV están configurados como agentes independientes con capacidades de autocontrol.
- Se propone un método de navegación colaborativa multiagente con cobertura de comunicación mejorada . Al introducir una estación base móvil, la cobertura de comunicación El entorno cambia dinámicamente. Los resultados de la simulación muestran que este método mejora eficazmente la calidad de la comunicación durante la navegación.
- Se presenta un enfoque adaptativo de hiperparámetros basado en GA para optimizar UGV Cobertura de comunicaciones y navegación. Asigna pesos a hiperparámetros. según el grado de actualización del algoritmo y realiza una elección basada en el tamaño del peso en la siguiente selección, que es diferente de la estrategia tradicional de hiperparámetro fijo y puede escapar de los óptimos locales.

El ensayo está organizado de la siguiente manera para las partes restantes. El modelado de sistemas de comunicación y navegación multi-UGV se explica detalladamente en la Sección 2. Los detalles del método RL que presentamos se describen en la Sección 3. Varias comparaciones experimentales en la Sección 4 sirven para verificar la eficacia de nuestro enfoque. Finalmente, discutimos el futuro. direcciones de investigación y resuma los puntos clave del artículo en la conclusión de la Sección 5.

2. MDP para Cobertura de Navegación y Comunicaciones para Multi-UGV en Entornos

Para emular la toma de decisiones de múltiples UGV en sistemas del mundo real, adoptamos un modelo MDP. Con el rápido avance de la RL multiagente, MDP se ha convertido en un modelo de decisión confiable [30]. En este estudio, construimos un entorno complejo. con tres UGV y una BS móvil colaborando y que incluye diversos obstáculos. Además, introducimos un concepto de comunicación mediante el cual la comunicación la cobertura está determinada por cuatro BS fijas y una BS móvil en conjunto.

2.1. Descripción del problema

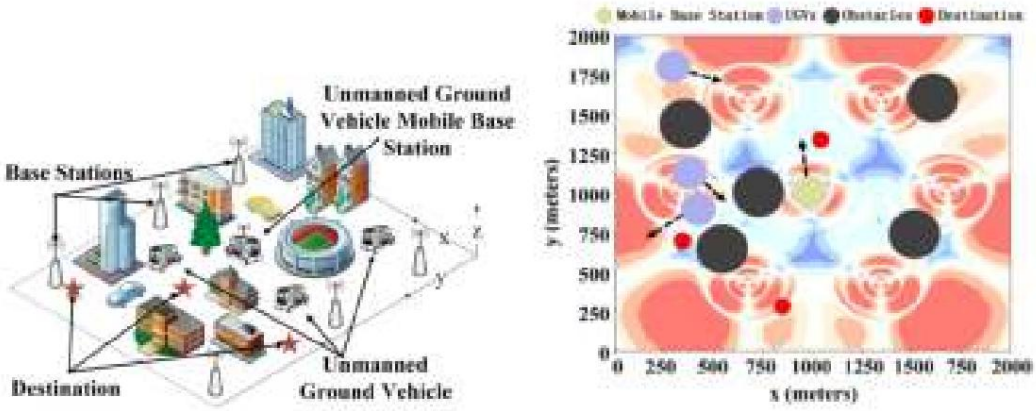
El objetivo principal de nuestro artículo es realizar tareas de navegación de múltiples agentes en un una amplia gama de entornos complejos, desconocidos y a gran escala lo más rápido posible. La tarea de navegación requiere que los UGV puedan colaborar según diferentes características ambientales, con capacidad de superar información ambiental externa.

Machine Translated by Google

interferencias, y con la capacidad de rastrear objetivos de manera eficiente y autónoma en tiempo real. Más específicamente, el alcance de la cobertura de comunicación lo establecen en colaboración tanto las BS fijas como las BS móviles. Dentro de esta área de cobertura de comunicación, las BS móviles y los UGV participan en una navegación cooperativa. Construimos un escenario de tareas con múltiples objetivos de optimización. El objetivo de los UGV es llegar con éxito al destino, mientras que la BS móvil tiene la tarea de ajustar dinámicamente la cobertura de comunicación en tiempo real, con el objetivo de optimizar la calidad de la comunicación de los UGV. Los UGV y las BS móviles realizan una navegación cooperativa óptima a nivel mundial para lograr sus respectivos y comunes objetivos.

2.2. Modelado del Medio Ambiente

Nuestro trabajo consiste en simular un entorno real donde varios UGV colaboran para alcanzar un punto objetivo. Además, este entorno incluye obstáculos que obstruyen el movimiento de los UGV, replicando escenarios del mundo real. Utilizamos un entorno de partículas multiagente (MPE) [24] como entorno base para nuestro desarrollo secundario, como se muestra en la Figura 1. En este entorno, utilizamos M UGV (donde M se define como tres), W BS móviles (donde W se define como uno), y un cierto número de obstáculos. El objetivo de los UGV es evitar colisiones de forma colaborativa y alcanzar sus respectivos puntos de destino óptimos teniendo en cuenta la comunicación en el estado global. En términos más s
Los UGV eligen una ruta para evitar obstáculos con mejor comunicación para coordinar sus movimiento hacia el punto objetivo (el modelo de comunicación se detallará en la Sección 2.3). La tarea de la BS móvil es mejorar la comunicación de las tres unidades móviles ajustando la cobertura de comunicación en el estado global, como se muestra en la Figura 1b.



(a) (b)

Figura 1. Diagrama esquemático de la colaboración de un enjambre de UGV en un entorno habilitado para la comunicación. (a) Entorno urbano 3D. (b) Vista superior del entorno de comunicación visualizado.

2.3. Modelado de la cobertura de comunicación

En nuestra simulación, integramos la comunicación en el entorno MPE y la utilizamos como criterio para evaluar la finalización de la tarea. En esta subsección, presentamos el modelo de canal de comunicación que adoptamos, junto con el modelo de comunicación que está influenciado por el movimiento de la BS móvil, como se muestra en la Figura 1b. El área de comunicación dentro del círculo rojo del medio varía según la ubicación de la BS móvil, como se ilustra en la Figura 2. Tenga en cuenta que las Figuras 2a-l representan diagramas que muestran cómo cambia el entorno de comunicación con el movimiento de la BS móvil en el paso t. La BS móvil se coloca inicialmente en el centro en la Figura 2a y gradualmente avanza hacia la esquina inferior derecha, como se muestra en la Figura 2l. Esta reubicación del BS móvil se debe a su observación del patrón de movimiento de los UGV. En consecuencia, la BS móvil se reubica desde el centro hacia la esquina inferior derecha para mejorar la calidad de la comunicación en esa área, expandiendo así la zona de cobertura roja como se muestra en la Figura 2. Por el contrario, la r

Machine Translated by Google

La BS móvil da como resultado una reducción en el área de cobertura con una calidad de comunicación superior en el cuadrante superior izquierdo. Además, para acentuar la evolución de la calidad de la comunicación y mejorar la claridad de los cambios en la comunicación, hemos delineado las variaciones entre cada diagrama y su contraparte anterior.

Hemos construido un total de M BS en el entorno, donde M se define como siete e incluye una BS móvil. La ganancia de potencia de señal obtenida por los UGV de BS m (m ≤ 7) se define como p el criterio principal para evaluar la comunicación de t^{metro}. Posteriormente, la relación señal-interferencia (SIR) se utiliza como los UGV. Este criterio se puede expresar como:

$$SIRt \quad p \frac{No}{\sum m \quad = It \; p_t^{metro}} \tag{1}$$

donde It {1, · · · , M} representa las BS que no están asociadas con los UGV en el paso t. Vale la pena señalar que, en aras de la simplicidad, hemos omitido los efectos del ruido, ya que es bien sabido que el rendimiento de la comunicación BS-UGV a menudo se ve limitado por la interferencia. Además, con la reutilización global de frecuencias, hemos tenido en cuenta la peor situación en la que todas estas BS no relacionadas contribuyen al término de interferencia en la Ecuación (1). En nuestro estudio, los UGV recibieron potencia de señal en el paso t dependiendo principalmente de sus posiciones relativas a las BS, y pt se puede escribir como:

$$pt = P^{-}\beta(qt)G(qt)\,\tilde{}ht \tag{2}$$

donde P^{-} representa la potencia de transmisión de las BS, mientras que β(qt) representa la ganancia del canal a gran escala ; la ganancia del canal a gran escala tiene en cuenta los efectos de la pérdida de trayectoria y el desvanecimiento de las sombras. Se puede expresar como:

$$\beta(qt) = \beta 0 \quad \frac{d0}{d(qt)}^{\gamma} \tag{3}$$

donde β0 es la pérdida de trayectoria en la distancia de referencia d0, d(qt) es la distancia entre el UGV y la BS, y γ es el exponente de pérdida de trayectoria. Y G(qt) denota la ganancia de la antena BS; la ganancia de la antena BS considera la ganancia direccional del UGV en relación con la antena BS. Puede representarse mediante el patrón de radiación de la antena, que normalmente se expresa como:

$$G(qt) = Gmáx \cdot A(\theta t , \varphi t) \tag{4}$$

donde Gmax es la ganancia máxima de la antena y A(θt , φt) es la función de ganancia de la posición del UGV con respecto a la dirección del lóbulo principal de la antena. Estos parámetros normalmente dependen de la ubicación qt del UGV. Además, la variable aleatoria ˜ht se utiliza para incorporar los efectos del desvanecimiento. Es importante señalar que cada UGV tiene un SIR independiente en cada paso t, que se utiliza para evaluar el rendimiento de comunicación de los UGV en ese momento específico. También cabe señalar que durante la inicialización del escenario, las posiciones iniciales de todas las estaciones base, incluida la estación base móvil, son fijas, es decir, todas están en una posición fija, y luego los tres UGV y la estación base móvil están capacitados para realizar diferentes acciones a través de la estrategia, en cuyo momento, según la acción seleccionada, la siguiente posición de la estación base móvil está determinada por la acción seleccionada, así como por la posición original juntas. El valor de qt se fija en este punto porque qt solo está relacionado con la variable de posición (x, y). Se puede observar que la posición inicial de la BS móvil está preestablecida, mientras que el qt posterior es la variable de decisión y está determinada por la acción de la BS móvil, cuyo objetivo es proporcionar un mejor entorno de comunicación al resto de UGV.

Machine Translated by Google

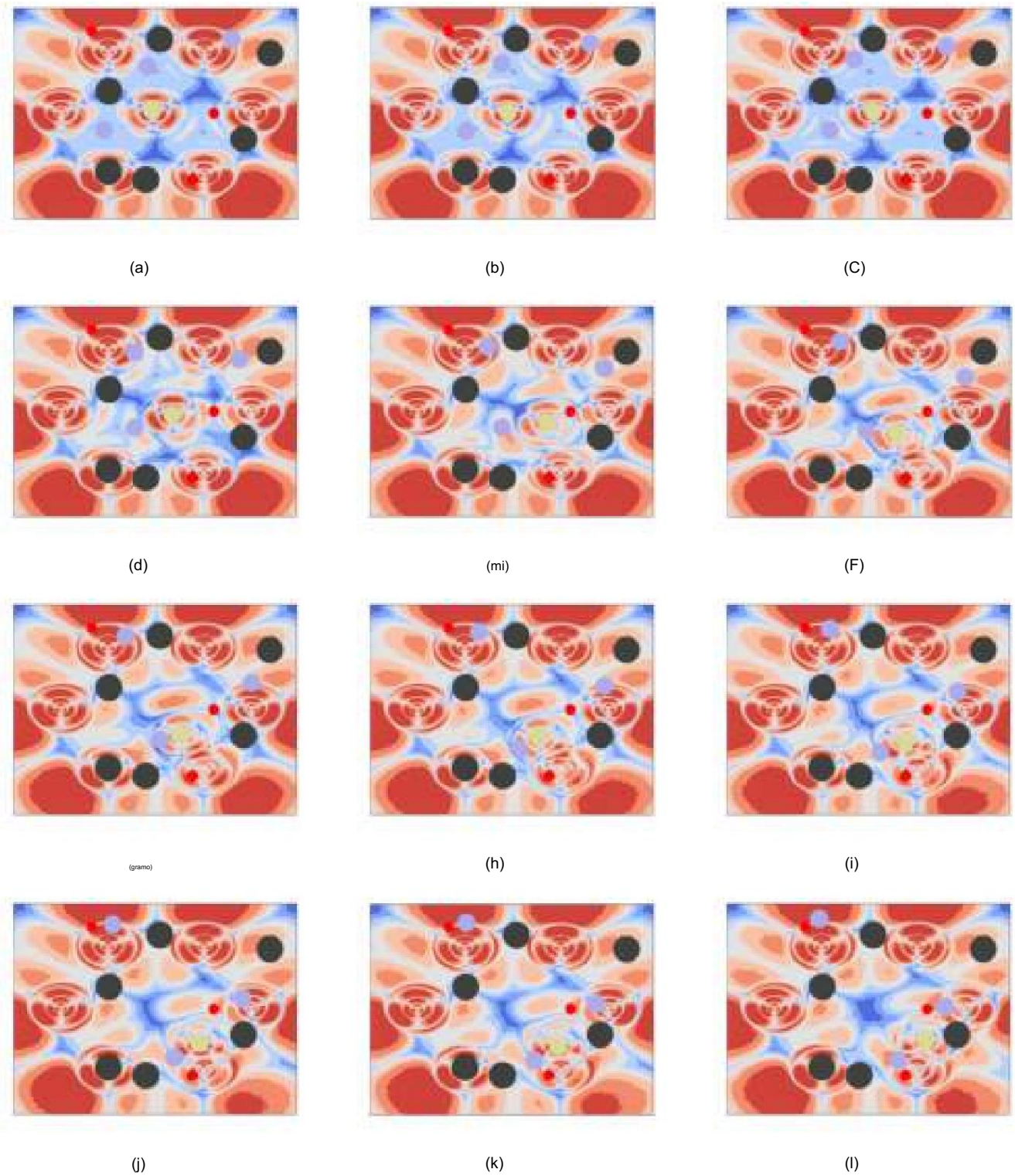


Figura 2. Los resultados de cambiar la comunicación en el entorno a medida que se mueve la EB móvil. El Las áreas rojas indican una mejor comunicación, mientras que las áreas azules indican una comunicación peor. Los círculos marrones representan el BS móvil, los círculos azules representan UGV, los círculos negros representan obstáculos, y los círculos rojos representan puntos objetivo. Este movimiento tiene como objetivo mejorar la calidad de la comunicación para los UGV.

Machine Translated by Google

2.4. El estado y la acción de los UGV

El estado de los UGV se denota como s = (s1,s2, ... ,sN). Para cada UGV u, el estado se define como su = (sPu,sEu), donde sPu = xu, yu, vxu, vyu, SIRu es una combinación de posición (xu, yu), velocidad (vxu, vyu) y SIRu. . Además, sEu = xug, yug, x0, y0, vox, voy representa los datos de que los UGV observan a otros UGV u obstáculos. El término su representa las posiciones del agente en un sistema de coordenadas. Sin embargo, en muchas situaciones reales, puede que no sea posible adquirir ubicaciones absolutas. Por lo tanto, el agente y las barreras se pueden modelar en un sistema de coordenadas polares para el movimiento. En nuestra formulación original, sEu = xug, yug, x0, y0, vox, voy pretende representar los datos observados para cada UGV u. Para aclarar, (xug, yug) representa la distancia desde la entidad g (incluidos los UGV y todos los obstáculos) hasta el UGV u. Y (x0, y0) representa la posición de coordenadas globales de UGV u.
A través de una serie de cálculos de transformación, también podemos obtener las posiciones globales de otras entidades observadas por UGV u. La combinación de estos componentes permite que cada UGV navegue hacia su objetivo considerando la presencia y el movimiento de obstáculos u otros UGV.

La acción de los UGV se denota como a = (a1, a2, ... , aN), que se define como una colección de acciones individuales para cada UGV en un sistema multiagente. En este artículo en particular, el movimiento de los UGV se simplifica asumiendo una velocidad inicial de 0 y una aceleración constante, que se representa mediante una formulación: vt = v0 + at, que se define como un vector de 2 dimensiones.

2.5. Función de recompensa

El objetivo principal es encontrar la estrategia de colaboración óptima para un estado específico con el fin de navegar de forma colaborativa durante el paso t y el siguiente paso t + 1 con una comunicación mejorada. En el paso t, el estado específico se denota como st . La recompensa de actuar en puede representarse por r(st , at). En consecuencia, la recompensa total por adoptar la política π se puede expresar como:

$$R(\pi) = L\sum\gamma^{t} r(st , \pi(st)) \mid s0 = s \quad (5)$$

Nuestro objetivo es determinar la estrategia óptima, denotada como π , que maximiza la recompensa general respetando todas las restricciones dadas. El objetivo principal del artículo es obtener la política que produzca la mayor recompensa posible, denotada como R(π), entre todas las políticas posibles π.

Cabe señalar que los principios de navegación de la BS móvil son similares a los de los UGV. Tanto los UGV como las BS móviles pueden utilizar principios similares para la planificación de rutas y la evitación de obstáculos en función de sus posiciones objetivo y de los datos ambientales actuales. Las tareas de los UGV son tres: en primer lugar, los UGV llegan a su destino a través de la navegación colaborativa. En segundo lugar, los UGV deberían intentar evitar colisiones. En tercer lugar, los UGV deben viajar en un entorno de comunicación de alta calidad. La BS móvil solo tiene dos tareas: una es trabajar con los UGV para ajustar la cobertura de comunicación ajustando la posición, asegurando así que los UGV se muevan dentro de un rango de comunicación de alta calidad. Uno es evitar colisiones en la medida de lo posible, similar al objetivo de los UGV. También es importante tener en cuenta que la posición inicial del BS móvil está en el centro de la escena en todos los escenarios que configuramos y que se mueve junto con los UGV sin adelantarse a ellos. Entonces, en este modelo de entrenamiento, la función de recompensa de los UGV consta principalmente de tres partes basadas en una base teórica. En primer lugar, está relacionado con la distancia entre los UGV y el punto objetivo. En segundo lugar, está relacionado con el número de colisiones, incluidas las colisiones entre UGV, las colisiones entre UGV y la BS móvil y las colisiones entre UGV y obstáculos. Finalmente, se relaciona con la SIR obtenida por los UGV en el paso t, que puede formularse como r(st , at).

$$r(st , at) = SIRt - D(UGV, objetivo) - coll \quad (6)$$

donde SIRt representa la calidad de comunicación integral obtenida por todos los UGV en cada paso t, y la definición de SIRt se introdujo en detalle en la Ecuación (1).
D(UGV, objetivo) representa la suma de las longitudes entre todos los UGV y sus respectivos

Machine Translated by Google

destinos en cada paso t; Cabe señalar que ningún UGV tiene un destino fijo al que llegar, lo que significa que todos los UGV asignarán de forma autónoma el destino a alcanzar en función de sus estrategias y observaciones. El término coll representa el número de colisiones que ocurrieron entre todos los UGV en cada paso t.

La fórmula de cálculo de SIRt en la Ecuación (6) se introdujo en la Sección 2.3.
La comunicación impacta directamente la función de recompensa de los UGV, donde una mayor comunicación da como resultado una recompensa mayor. En consecuencia, los UGV están incentivados a priorizar ubicaciones con mejor comunicación, animándolos a moverse ampliamente hacia esas áreas.

D(UGV, objetivo) se calcula mediante:

$$D(UGV, objetivo) = \sqrt{(xu - xobjetivo)^2 + (yu - yobjetivo)^2} \quad (7)$$

donde (xu, yu) contiene información de coordenadas para todos los puntos objetivo, lo que indica que la pérdida también disminuye a medida que la distancia entre los UGV y el destino se hace más pequeña.
En consecuencia, una pérdida menor corresponde a una recompensa mayor. En esencia, es más probable que los UGV reciban una mayor recompensa cuando están más cerca del punto objetivo.
El término coll se puede confirmar como:

$$col = \begin{matrix} 0, \text{ si } D(UGVs, tupla) > K \\ -1, \text{ si } D(UGVs, tupla) \le K \end{matrix} \quad (8)$$

donde D(UGV, tupla) representa distancias entre los UGV y diversas entidades, como otros UGV, la BS móvil y obstáculos en el escenario dado. Además, se utiliza una constante "K" para evaluar la posibilidad de una colisión. Si la distancia entre dos entidades cualesquiera es menor que el valor de K, se registra una colisión. En consecuencia, al emplear este enfoque, múltiples agentes colaboran para minimizar la aparición de colisiones.

3. Navegación de cobertura de comunicación multiagente de RL con GA En

esta sección, describimos un resumen conciso de la formulación de MDP para la navegación de cobertura de comunicación con cooperación entre la BS móvil y los UGV.
A continuación, presentamos el algoritmo DDPG [31], que está diseñado para un espacio de control continuo. Sobre la base de estos cimientos, desarrollamos un algoritmo RL innovador llamado GA-MADPPG para abordar los desafíos en la cobertura de comunicaciones y la navegación. El algoritmo GA-MADPPG consta de dos componentes principales. En primer lugar, adoptamos el algoritmo MADPPG, que extiende DDPG siguiendo el paradigma CTDE. Esto nos permite aprovechar los beneficios de MADPPG en el manejo de sistemas multiagente y problemas de control continuo.
En segundo lugar, integramos GA en el algoritmo MADPPG, lo que permite actualizaciones de hiperparámetros en tiempo real basadas en la función de pérdida durante el proceso de entrenamiento. La política propuesta destaca la capacidad del algoritmo GA-MADPPG para ajustar dinámicamente los hiperparámetros en función de la función de pérdida. Al combinar estos dos componentes, GA-MADPPG tiene como objetivo lograr una cobertura de comunicación y navegación eficiente en entornos complejos.

3.1. Modelo MDP

El juego de Markov multiagente, una expansión significativa del MDP en un escenario multiagente , es el tema de [32]. En este juego, el estado teórico de N agentes está representado por s. En cada época t, los agentes realizan un seguimiento del estado actual st y seleccionan una acción en . Después de esto, el estado ingresa al siguiente estado st + 1, y todos los agentes reciben una recompensa, r(st , at).

Para la evaluación de funciones de valor de acción y funciones de valor de mapeo de estado-acción, calcular la función de valor para políticas estocásticas implica:

$$V\pi(st) \models E \left[\sum_{l=0}^{\infty} \gamma^{l} r(st+l , en+l) \mid calle \right] \quad (9)$$

Machine Translated by Google

donde el factor de descuento es γ [0, 1). Y la función acción-valor se calcula de la siguiente manera:

$$Q\pi (st , en) = E \sum_{l=0}^{\infty} l\gamma\ r(st+l , en+l) \mid st , en \quad (10)$$

Aprender un π ideal de El objetivo es una estrategia que optimice el rendimiento general previsto. todos los agentes.

$$\pi = \arg \max_{\pi} E \sum_{t=0}^{\infty} t\gamma\ r(st , en) \quad (11)$$

3.2. Fundamentos del enfoque DDPG

DDPG es un algoritmo de gradiente de políticas determinista profundo desarrollado para abordar problemas de control de acciones continuas. Se basa en gradientes de políticas y ajusta directamente los parámetros de políticas θ para optimizar la función objetivo.

$$J(\theta) = Es \quad p\pi \mid ,a \quad \pi \theta \quad (12)$$

que es la idea central detrás del DDPG, ya que implica tomar el gradiente de política θ J(θ) en cada paso. El gradiente de políticas se puede expresar de la siguiente manera:

$$\theta J(\theta) = Es \quad p\pi ,a \quad \pi \theta [\quad \theta \log \pi \theta (a \mid s) Q \pi (s, a)] \quad (13)$$

donde Qπ (s, a) = E R | distribución . t t = s, un = a es una función acción-valor, y p π es el estado

Las políticas deterministas también pueden incorporarse al marco de gradiente de políticas y se denotan como μθ : S →A [1]. En concreto, bajo determinadas circunstancias, podemos escribir el gradiente del objetivo J(θ) = Es p μ [R(s, a)] de la siguiente manera:

$$\theta J(\theta) = Es \quad D \quad \theta\mu\theta (a \mid s) \quad aQ \mu (s, a)| a=\mu \theta (s) \quad (14)$$

El teorema requiere que el espacio de acción a sea continuo, ya que depende de aQμ (s, a).

Las redes neuronales profundas se utilizan en el método DDPG, que es una variación del algoritmo determinista de gradiente de políticas, para estimar la política μ y el crítico Qμ. Es un enfoque fuera de las políticas, lo que significa que aprende de las experiencias durante la capacitación. Además de la red en línea, DDPG también utiliza una red objetivo para estabilizar la formación. La red objetivo se revisa periódicamente para mitigar los efectos de las oscilaciones de políticas durante el aprendizaje.

3.3. Gradiente de política determinista profundo de múltiples agentes

La política DDPG demuestra la solidez inherente del agente y sus capacidades de generalización, lo que conduce a un rendimiento maximizado [31]. Este beneficio hace que DDPG sea particularmente adecuado para el aprendizaje en circunstancias desafiantes donde hay incógnitas e interferencias externas presentes. Ante esto, adoptamos un paradigma de capacitación para la navegación de cobertura de comunicaciones basado en el MADDPG. El agente en el entorno es autónomo e incapaz de interactuar con otros agentes, pero es perceptible. En cada paso t, el agente es incapaz de observar los esquemas de movilidad actuales de otros agentes. El beneficio de CTDE es que elimina la necesidad de abordar las compensaciones entre agentes y el objetivo de optimización es aumentar el rendimiento total de todos los agentes [33].

$$GRAMO = \quad s\hat{}, a, p,r, o, u \quad (15)$$

donde u representa el índice de cada agente y sˆ almacena los estados globales y las observaciones locales de cada agente . El término a es una representación de la actividad de todos los agentes, y la recompensa de cada agente es parte del tensor r. La función de observación se indica con o, y p representa la probabilidad de una transición del estado actual al siguiente.

Machine Translated by Google

Más específicamente, el juego tiene N agentes y estrategias parametrizados por θ = {θ1, . . . , θN}. El término π = {π 1, . . . , π N} representa la colección de todas las políticas de agentes. Para el agente i, el gradiente del rendimiento esperado, denotado como J(θi) = E[Ri], puede expresarse de la siguiente manera:

$$\theta_i J(\theta_i) = E_{s \sim p,\, a_i \sim \pi_i}\left[\theta_i \log \pi_i(a_i \mid o_i)\, q_i^{\pi}(x, a_1, \ldots, a_N)\right] \quad \text{(dieciséis)}$$

nuestro entorno, el total de acciones a1, . . . , aN se introducen en la función $_{i}$ (x, a1, . . . , aN), que es un En de valor de acción centralizada Qπ que produce el valor Q para el agente i junto con algunos datos de estado. En el escenario más simple, los estados podrían ser la suma de las observaciones realizadas por cada agente (o1, . . . , oN), pero si fuera accesible, también podríamos incorporar datos de estado adicionales.

A los agentes se les permite tener cualquier sistema de incentivos, incluso aquellos que proporcionen recompensas rivales en un entorno hostil. Sin embargo, en este artículo establecemos la función de recompensa como el total de recompensas para todos los agentes, ya que nuestra investigación se centra en situaciones en las que todos los agentes cooperan para lograr un objetivo común, lo que da como resultado recompensas cooperativas.

El concepto mencionado puede ampliarse para aplicarse a políticas deterministas. Ahora que tenemos N políticas continuas μθi parametrizadas por θi , podemos expresar el gradientede la siguiente manera:

$$\theta_i J(\mu_i) = E_{x,a \sim D}\left[\theta_i \mu_i(a_i \mid o_i)\, a_i Q_i^{\mu}(x, a_1, \ldots, a_N)\big|_{a_i=\mu_i(o_i)}\right] \quad (17)$$

donde las transiciones (x, x todas $'$, a1, . . . , aN,r1, . . . ,rN) se almacenan en el búfer de reproducción D, que almacena las experiencias del agente.

Las políticas de otros agentes deben actualizarse para que se aplique la Ecuación (17) . Conocer las observaciones y políticas de otros agentes no es una suposición particularmente restrictiva, ya que esta información generalmente está disponible para todos los actores si nuestro objetivo es educar a los agentes para que exhiban un comportamiento comunicativo sofisticado en la simulación.

3.4. El algoritmo genético

GA es un modelo computacional inspirado en la teoría de la evolución biológica de Darwin y se utiliza para buscar soluciones óptimas simulando la evolución natural. Opera directamente sobre objetos estructurales, evitando restricciones de diferenciación y continuidad de funciones [34-36]. Con un paralelismo implícito inherente y una fuerte capacidad de optimización global, emplea métodos de optimización probabilística para obtener y guiar automáticamente el espacio de búsqueda sin reglas estrictas, lo que permite ajustes adaptativos de la dirección de búsqueda. GA se dirige a todos los individuos de una población y explora de manera eficiente un espacio de parámetros codificados utilizando técnicas de aleatorización. Sus operaciones genéticas incluyen selección, cruce y mutación. Los componentes centrales de un AG son la codificación de parámetros, la configuración de la población inicial, el diseño de la función de aptitud, el diseño de la operación genética y la configuración de los parámetros de control. Para demostrar el funcionamiento de un GA, consideramos un problema de optimización sin restricciones. El objetivo es maximizar la siguiente función:

$$\text{Maximizar } f(k),\ k_{norte}^{l} \le k_n \le k_{norte}^{tu},\quad norte = 1, 2, \ldots, n. \quad (18)$$

La variable ki puede tomar valores dentro del rango de k ln . Aunque consideramos un problema de maximización, un AG también se puede utilizar para problemas de minimización. Para garantizar el correcto funcionamiento de la AG, se toman las siguientes medidas.

Las variables ki en la ecuación (18) se codifican inicialmente en estructuras de cadena específicas antes de usar GA para abordar el problema antes mencionado. Es fundamental mencionar que no siempre es necesario codificar las variables en esta etapa. En algunos estudios, los AG se aplican directamente a las variables, pero para discutir las ideas fundamentales de un AG simple, ignoraremos estas excepciones.

Machine Translated by Google

La función de aptitud se evalúa para cada individuo de la población inicial y posteriormente para cada nueva generación tras aplicar los operadores genéticos de selección, cruce y mutación. Dado que la aptitud de cada individuo es independiente de la de los demás, es factible el cálculo paralelo.

Estas transiciones pueden adoptar muchas formas diferentes. A continuación se muestran dos asignaciones de fitness de uso común.

$$F(k) = 1 \quad \frac{1}{+ f(k)} \tag{19}$$

Esta transformación convierte un problema de minimización en un problema de maximización equivalente sin cambiar la posición del mínimo. La función objetivo se puede transformar usando una función diferente para proporcionar el valor de idoneidad F(i), como se muestra a continuación:

$$F(i) = V - \sum_{i=1}^{PAG} \frac{O(i)P}{O(i)} \tag{20}$$

donde V es un valor grande para garantizar valores de aptitud no negativos, P es el tamaño de la población y O (i) es el valor de la función objetivo del enésimo individuo. Para este estudio, se elige V como el valor máximo del segundo término en la ecuación (20), lo que lleva a un valor de aptitud de cero, que es igual al valor máximo de la función objetivo. Esta transformación no altera la posición de la solución; simplemente convierte un problema de minimización en un problema de maximización equivalente. El término "fitness de la cuerda" se refiere al valor de la función de aptitud de una cuerda.

Los operadores genéticos como la selección, el cruce y la mutación se aplican a la población, produciendo una nueva generación basada en los individuos más aptos de la generación actual.
La operación de selección elige individuos con ventajas en la población actual. La operación de cruce o recombinación crea descendientes mediante el intercambio de una porción de cromosomas entre dos individuos seleccionados, lo que da como resultado dos nuevos cromosomas que representan la descendencia. La operación de mutación cambia aleatoriamente uno o más valores cromosómicos (genes) de cada individuo recién creado. Las mutaciones suelen ocurrir con una probabilidad muy baja.

3.5. GA-MADDPG para abordar la cobertura de comunicaciones y la navegación en su propia formulación abstracta

En la formulación abstracta de la Sección 3.1, la política de la función objetivo se puede expresar como π (st) = at(st). En cada episodio j, el objetivo es optimizar la función objetivo seleccionando la mejor coordinación y acción óptima (a) para cada estado (s). Se asignan diferentes agentes para que naveguen ellos mismos hasta llegar al punto objetivo, y cada agente adopta una estrategia independiente. Para abordar las limitaciones y explorar diversos escenarios, utilizamos métodos fuera de las políticas en lugar de métodos dentro de las políticas, ya que los métodos fuera de las políticas son más poderosos y generalizados. Garantiza que los datos sean completos y que todas las acciones estén cubiertas. Incluso puede provenir de diversas fuentes: autogenerada o externa [37]. La Figura 3 ilustra los aspectos más destacados del GA-MADDPG propuesto.

Todas las críticas se actualizarán simultáneamente para reducir la función de pérdida de regresión combinada para el episodio j:

$$L(\theta i) = \frac{1}{S} \sum_{j} \left(j - Q\, y_i^{\mu} \left(Xj , a_{1}^{j}, \ldots , a_{norte}^{j} \right) \right)^2 \tag{21}$$

El actor se actualiza utilizando el gradiente de política muestreado:

$$\nabla_{\theta i} J \approx \frac{1}{S} \sum_{j} \nabla_{\theta i} \mu i \left(o_i^{j} \right) \nabla_{ai} Q_i^{\mu} \left(xj , a_1^{ja} , \ldots , ai , \ldots , a_{norte}^{ja} \right) \Big|_{j\, ai = \mu i \left(o_i^{j} \right)} \tag{22}$$

Machine Translated by Google

Y la función acción-valor centralizada Q $^{\mu}_{i}$ se actualiza como:

$$L(\theta i) = Ex,a,r,x'[(Q^{\mu}_{i}(x, a1, \ldots, aN) - y)^{2}], \quad y = ri + \gamma Q^{\mu'}_{i}(X', a'_{1}, \ldots, a'_{N})|_{a'_{j}=\mu'_{j}(oj)} \tag{23}$$

dónde

$$\mu' = \mu\theta'_{1}, \ldots, \mu\theta'_{norte} \tag{24}$$

es el conjunto de políticas objetivo con parámetros pospuestos θi .

El proceso de entrenamiento del algoritmo GA-MADPPG se resume en el Algoritmo 1.

Utilizamos capacitación DDPG fuera de la política para maximizar la recompensa.

Algoritmo 1 Algoritmo GA-MADDPG

Requerir: estado de entrada s, factor de descuento γ y acción a
Inicialización: inicialice el entorno MPE con cuatro agentes (incluidos 3 UGV y 1 BS móvil); Inicialice la población de hiperparámetros.
Ecount = 0
para Episodio = 1 al episodio máximo
Reinicie los entornos, recopile observaciones iniciales de los agentes
para el paso = 1 al paso máximo
Elija At para cada agente i Los
agentes toman At y reciben las siguientes observaciones $_{i}'$
o Calcule la recompensa total en la Ecuación (6)
Almacene las transiciones de todos los agentes en D y almacene la L de transiciones en D.
Ecount = Ecount + 1
si Ecount ≥actualizar episodio entonces
para g = 1 a las actualizaciones críticas, los pasos a seguir
Lote de muestra B de D j
Establecer $y^{j}_{i} = r_{yo} + \gamma Q^{\mu'}_{i}(X'_{j}, a'_{1}, \ldots, a'_{norte})_{a'_{k}=\mu'_{k}(OK)}$
Minimizar la pérdida en la Ecuación (21) para actualizar el
crítico Actualizar al actor utilizando el gradiente de política muestreado según la Ecuación (22)
Evaluar la aptitud de la población de hiperparámetros según la ecuación (19)
Población de hiperparámetros cruzados Operación de mutación
Establecer una nueva población
de hiperparámetros según D. fin de Actualizar parámetros objetivo: θ i

$$\theta'_{i} \leftarrow \tau\theta i + (1 - \tau)\theta'_{i}$$

Ecount = 0
fin si fin
para fin
para

Machine Translated by Google

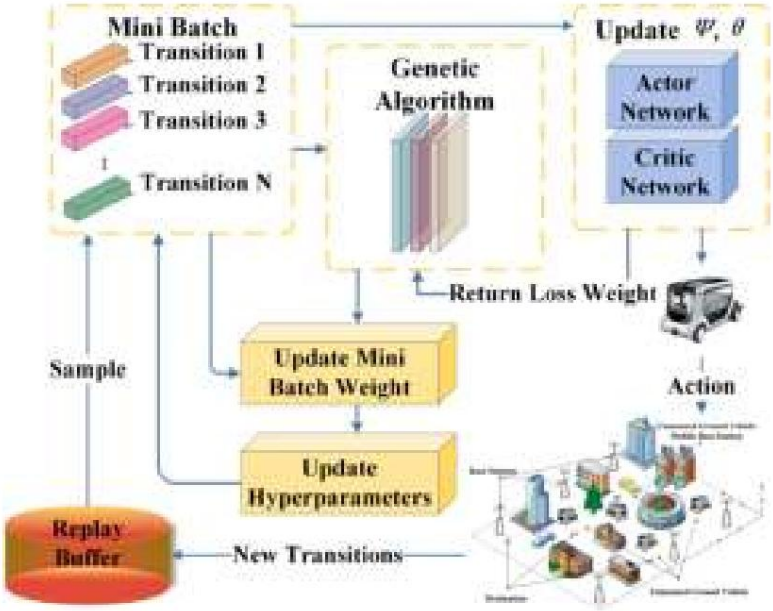


Figura 3. Diagrama detallado del algoritmo GA-MADDPG.

4. Resultados de la simulación

En esta sección, presentamos ejemplos ilustrativos para representar la configuración experimental de este artículo. Con base en estos ejemplos, proponemos varias métricas para evaluar la efectividad del algoritmo y realizar un análisis cuantitativo para aclarar las ventajas de nuestro enfoque y política de modelado representado. Posteriormente, presentamos resultados de simulación numérica para mostrar la efectividad y eficiencia de los algoritmos. Además, proporcionamos comentarios interesantes sobre los resultados.

4.1. Configuración de los experimentos

En esta subsección, presentamos la configuración precisa de los coeficientes experimentales. El área simulada es una densa región urbana de 2 ×2 km² con siete sitios de BS celulares. En la Figura 4, se muestra una vista superior del modelo de canal en este documento, donde siete estaciones base terrestres están representadas por estrellas azules de cinco puntas, y la estrella azul de cinco puntas en el medio representa la estación base móvil. Cada estación base tiene tres grupos de unidades. Dado que hay siete estaciones base en total, el número de unidades es 21. La potencia de transmisión de la celda unitaria se establece en Pm = 20 dBm, el umbral de interrupción de la comunicación se establece en γth = 0 dB y la potencia de ruido se define como σ^2= −65 dBm. Este documento adopta el modelo de antena de estación base requerido por la especificación 3GPP. Para simplificar, asumimos que la altura operativa de los UGV se establece en 0 m, sin tener en cuenta la influencia de las subidas y bajadas del terreno. Los valores específicos de los parámetros involucrados en el entorno simulado son los siguientes: el número de UGV se establece en cuatro (incluido un BS móvil), el número de obstáculos se establece en cinco en las áreas principales y hay tres puntos objetivo. Las posiciones de estos elementos son aleatorias cada vez que aparecen. Como empleamos un mecanismo de actualización dinámica para hiperparámetros, enumeramos los parámetros comunes del algoritmo de referencia y el algoritmo GA-MADDPG en la Tabla 1, y también enumeramos la población de hiperparámetros inicial del algoritmo GA-MADDPG en la Tabla 2.

En este estudio, es importante señalar que el entorno de comunicación está determinado únicamente por el posicionamiento de cada UGV. La calidad de la comunicación entre múltiples UGV no influye en su navegación colaborativa. Esto se debe a que el proceso de navegación colaborativa se basa exclusivamente en un algoritmo de múltiples agentes para coordinar los UGV en la exploración ambiental.

Machine Translated by Google

Tabla 1. Configuración de parámetros GA-MADDPG.

Definición	Valor	Definición	Valor
episodios máximos	60.000	Tamaño del minilote	512
Búfer de reproducción capacidad	1.000.000	Factor de descuento	0,99
Pasos por actualización	100	Tasa de aprendizaje	0.0001
Pasos máximos por episodio	25	Actualizar tasa de población 100	
Longitud del paso de tiempo	1	Dimensión oculta	64

Tabla 2. Población inicial de hiperparámetros del algoritmo GA-MADDPG.

Factor de descuento	Tasa de aprendizaje	Capacidad del búfer de reproducción	Tamaño del minibatch
0,9	0,01	10.000	512
0,95	0.001	100.000	1024
0,99	0.0005	1.000.000	2048

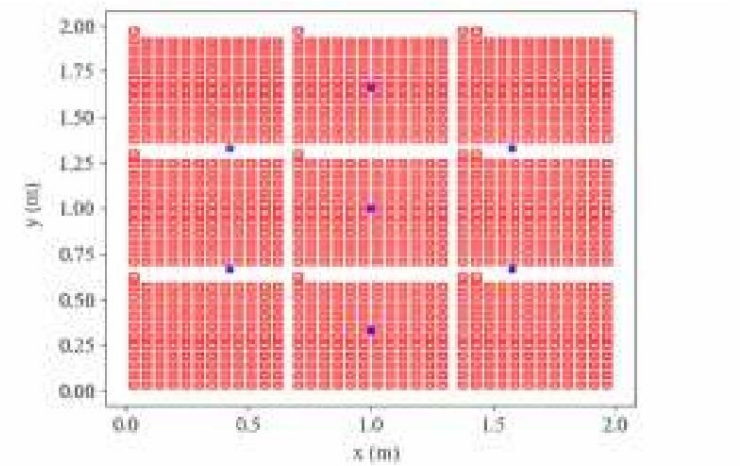


Figura 4. Vista en planta de la distribución del modelo de estación base.

4.2. Indicadores de Evaluación para la Navegación UGV

Para medir objetivamente la seguridad de la navegación, la eficacia, la robustez y la conexión de las comunicaciones de los UGV, hemos desarrollado indicadores de evaluación específicos, que son detallado abajo. También registramos el estado cambiante de las métricas de evaluación, como se muestra en Figura 5.

- Retorno de comunicación. El retorno de comunicación es el promedio de comunicación. calidad por episodio para los UGV y se calcula con base en la Ecuación (1). Los retornos de comunicación convergen rápidamente desde el −800 inicial hasta el −300, como se muestra en la Figura 5a. lo que indica que la calidad de la comunicación ha mejorado y se ha estabilizado en un intervalo.
- Tiempos de colisión: Los tiempos de colisión son la suma de las colisiones entre UGV y obstáculos y entre drones y drones en una ronda promedio. El indicador de colisión converge de 540 a menos de 480, como se muestra en la Figura 5b, lo que indica que el número de colisiones también se ha reducido un poco, y dado que este estudio permite Los UGV tienen un cierto número de colisiones, el indicador de colisión no es el principal. objetivo de optimización.
- Horarios exteriores: Los horarios exteriores son el número de veces que los UGV salen de los límites. y quedarnos sin el entorno que establecimos. De la Figura 5c, la rápida reducción en el El número de veces que se sale de los límites indica que nuestra investigación ha mejorado significativamente violaciones limitadas de límites ineficaces, lo que demuestra que nuestro estudio efectivamente opera dentro del área designada.

Machine Translated by Google

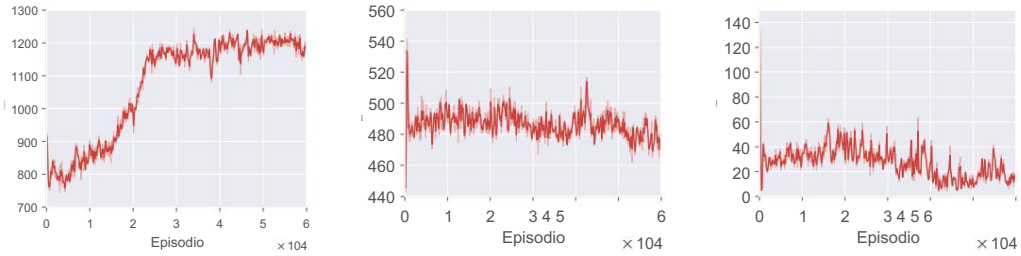


Figura 5. Tres indicadores de evaluación de la navegación UGV. a) Devolución de la comunicación. (b) Colisión número. (c) Horarios exteriores.

4.3. Experimentación comparativa GA-MADDPG

Comparar con el algoritmo sugerido y determinar si el algoritmo funciona mejor, proporcionamos siete enfoques de RL que se consideran líneas de base. El Los métodos son MADDPG [24]: un clásico gradiente de políticas determinista profundo de múltiples agentes, R-MADDPG [38]: un actor-crítico multiagente profundamente recurrente, MAPPO [39]: multiagente optimización de la política proximal, RMAPPO [39]: una política proximal profunda y recurrente de múltiples agentes optimización, MQMIX [40]: factorización de la función de valor monótono suave-máximo para profundidad multiagente, MASAC [41]: un clásico actor-crítico suave multiagente, MAD3PG [42]: un gradiente de política determinista distribucional profundo multiagente, MATD3 [43]: el gemelo retrasado gradiente de política determinista profundo, y RMATD3 [44]: el gemelo determinista profundo retrasado gradiente político con un profundo recurrente. En particular, replicamos estas líneas de base utilizando el mismo entorno de simulación para garantizar que el experimento sea justo.

El retorno acumulado del GA-MADDPG y otros algoritmos, que se muestra en la Figura 6, indica los hallazgos de la comparación experimental y resalta la potencia de Algoritmos GA-MADDPG. GA-MADDPG supera a los otros algoritmos al lograr un retorno de recompensa considerablemente mayor de alrededor de -1200 con 60.000 episodios, alcanzando su punto de convergencia. Además, como se muestra en la Figura 6, tanto MADDPG como R-MADDPG lograr recompensas más bajas de alrededor de −1600 en comparación con GA-MADDPG, lo que proporciona una sólida evidencia de la efectividad de nuestra contribución: el uso de hiperparámetros adaptativos GA permite mejores saltos fuera del óptimo local y mayores recompensas. Como se muestra en la Figura 6, en el entorno específico que configuramos, ni el algoritmo MADDPG original ni su variante que incorpora redes recurrentes profundas supera a GA-MADDPG en áreas de velocidad de convergencia y resultados finales de convergencia: GA-MADDPG converge en aproximadamente 2000 episodios, mientras que R-MADDPG converge en unos 5000 episodios, y el algoritmo original MADDPG converge aún peor. De mayor importancia, nuestros hallazgos experimentales revelan que MASAC, MAPPO, MAD3PG, MQMIX y RMAPPO enfrentan desafíos en lograr un estado de convergencia deseable dentro del entorno cooperativo multiagente construimos. MASAC requirió aproximadamente 25.000 episodios para converger, finalmente estabilizándose en un valor de recompensa de aproximadamente −1800. MAPPO y RMAPPO expuestos convergencia menos estable, con recompensas que fluctúan entre −2000 y −2500. Mientras tanto, La recompensa de MAD3PG convergió a aproximadamente −2100. Respecto a MQMIX, su recompensa demostró una oscilación inicial durante los primeros 25.000 episodios, seguida de una disminución constante a partir de entonces. Esto enfatiza aún más la superioridad de GA-MADDPG en términos de rendimiento y eficacia.

Además, ciertos algoritmos tienden a converger a óptimos locales, lo que refuerza aún más la efectividad de nuestra decisión de adoptar el algoritmo MADDPG y mejorar él. Como se muestra en la Figura 6, en los 25.000 episodios iniciales, GA-MADDPG puede sucumbir a Optimidad local. Sin embargo, la incorporación del mecanismo GA permite que GA-MADDPG para lograr recompensas elevadas más allá de este umbral. En particular, MAPPO y MQMIX demuestran un rendimiento inferior, posiblemente debido a la falta de actualizaciones de hiperparámetros adaptativos. obstaculizando su cooperación efectiva dentro del entorno de múltiples agentes y liderando

Machine Translated by Google

a los desafíos de la convergencia. Por lo tanto, esta observación demuestra naturalmente la alta eficacia de incorporar GA en algoritmos RL multiagente. Al introducir GA, los algoritmos multiagente pueden evitar de manera más efectiva caer en óptimos locales, lo que resulta en una mejor velocidad de convergencia y resultados. Y la variación de la pérdida calculada por la Ecuación (21) está representada en la Figura 7, en la que podemos ver la convergencia constante de la pérdida cerca de 1800, lo que puede probar la convergencia del algoritmo. Durante el proceso de validación, la Figura 8 muestra varias rutas simuladas de UGV. En condiciones óptimas de comunicación, el BS UGV podría permanecer estacionario para evitar posibles pérdidas debido a colisiones. Sin embargo, en situaciones en las que la comunicación no es excelente, el BS UGV actúa de forma proactiva para compensar las limitaciones de comunicación. Además, las estadísticas para los tres indicadores de evaluación (Figura 5) muestran la mejora en el retorno de la comunicación, la reducción en el número de colisiones y la disminución en el número externo a medida que el algoritmo converge. El rendimiento de las comunicaciones mostró una mejora desde un valor inicial de −800 a −300 hacia la conclusión del experimento. Al mismo tiempo, la frecuencia de colisiones disminuyó de 540 a 470, y la ocurrencia de eventos externos disminuyó de 100 a casi cero. Esto sugiere que a medida que el algoritmo converge, las tres métricas de evaluación también alcanzan el nivel óptimo.

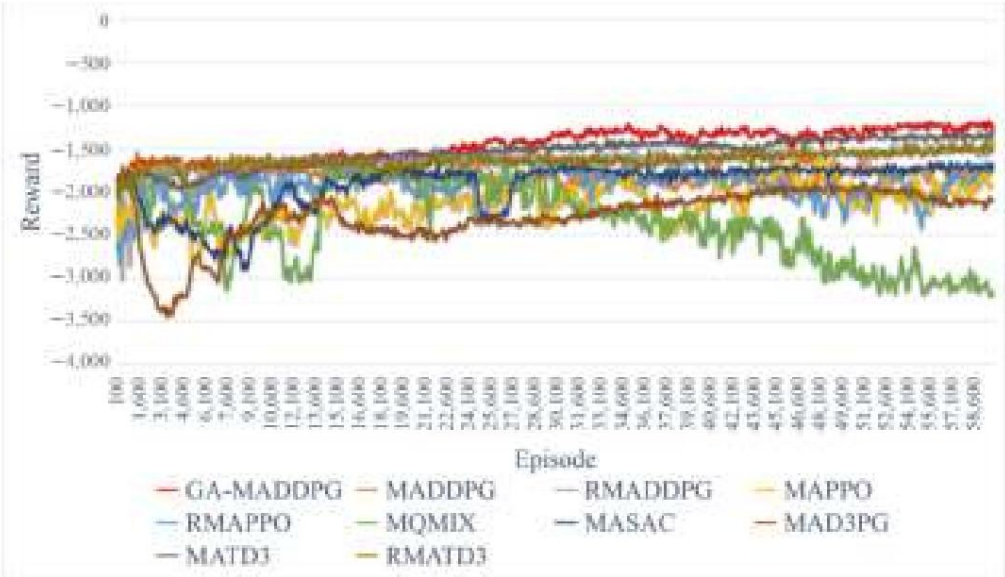


Figura 6. Costo promedio del GA-MADDPG y otros algoritmos avanzados.

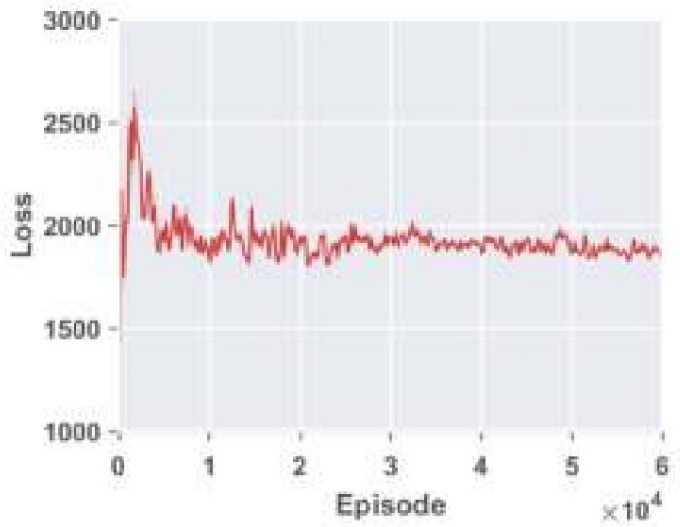
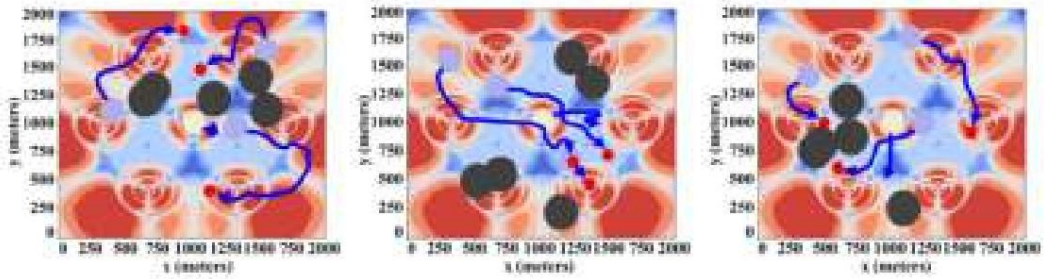


Figura 7. Evolución de la función de pérdida.

Machine Translated by Google



(a) (b) (C)

Figura 8. Algunos mapas de ruta UGV basados en GA-MADDPG.

4.4. Experimento de Generalización de GA-MADDPG 4.4.1.
Simulación con diferentes números de UGV

Para demostrar aún más la universalidad del algoritmo GA-MADDPG propuesto en el entorno establecido, este estudio también diseñó otros dos experimentos de generalización para la escena. El experimento estableció diferentes números de UGV, puntos objetivo y obstáculos en la escena para determinar si el algoritmo GA-MADDPG puede seguir funcionando de manera superior.
Cabe señalar que, dado que algunos algoritmos de referencia en la Sección 4.3 han tenido un desempeño deficiente o incluso tienen dificultades para converger, el experimento de generalización utiliza cuatro algoritmos de referencia que son relativamente estables en la Sección 4.3, incluidos MASAC, MAD3PG, MADDPG y su variante, RMADDPG. Entorno de generalización 1: la cantidad de UGV aumenta a cuatro, la cantidad de estaciones base móviles es una, la cantidad de puntos objetivo aumenta a cuatro y la cantidad de obstáculos aumenta a siete. La importancia de configurar el entorno de esta manera es aumentar la severidad del entorno aumentando la cantidad de UGV y la cantidad de obstáculos.

En la Figura 9, podemos ver que a pesar de la mayor complejidad del entorno, el algoritmo GA-MADDPG siempre tiene un valor de convergencia más alto en entornos hostiles y puede converger bien a un valor alto. El algoritmo GA-MADDPG puede mantener la convergencia hasta un valor de recompensa de −3000, mientras que los otros algoritmos de referencia no funcionan bien o incluso les resulta difícil converger en entornos complejos, y el valor de recompensa más alto es solo de alrededor de −3300. Esto demuestra plenamente que el algoritmo GA-MADDPG aún tiene un mejor rendimiento que otros algoritmos después de que aumenta la complejidad ambiental.

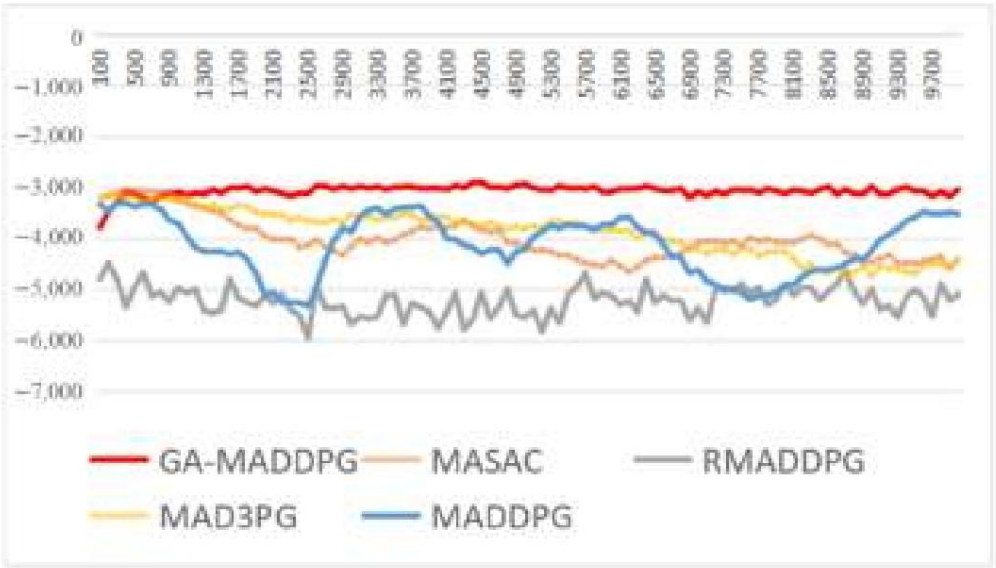


Figura 9. Comparación de costos promedio del entorno de generalización 1.

Machine Translated by Google

Entorno generalizado 2: el número de UGV se reduce a dos, el número de estaciones base móviles es una, el número de puntos objetivo se reduce a dos y el número de obstáculos se reduce a tres. La importancia de configurar el entorno de esta manera es mejorar la simplicidad del entorno al simplificar la cantidad de UGV y obstáculos para que el UGV pueda completar la meta con una mayor recompensa.

Como puede verse en la Figura 10, las recompensas de la mayoría de los algoritmos muestran una buena tendencia ascendente. Esto se debe a que el entorno generalizado utiliza tres UGV más simples (incluida una estación base UGV), tres obstáculos y dos puntos de destino. El algoritmo funciona mejor en un entorno simple y la convergencia es más fácil que en un entorno generalizado. A medida que disminuye el número de vehículos, también disminuye el número de colisiones y salidas de los límites . Cabe señalar que, dado que los parámetros del entorno de comunicación permanecen sin cambios, el valor de recompensa del algoritmo general es positivo, lo cual es En la Figura 10, se puede ver que en este entorno generalizado, la recompensa del algoritmo GA-MADDPG siempre está por delante, tanto en términos de velocidad de convergencia como de valor de convergencia final, que son mucho más altos que para los otros algoritmos, y el resultado final. El valor de recompensa puede converger a aproximadamente 200. Como algoritmo básico, MADDPG también tiene un valor de convergencia más alto de aproximadamente 150. Esto demuestra completamente que el algoritmo GA-MADDPG también puede funcionar bien en un entorno simple.

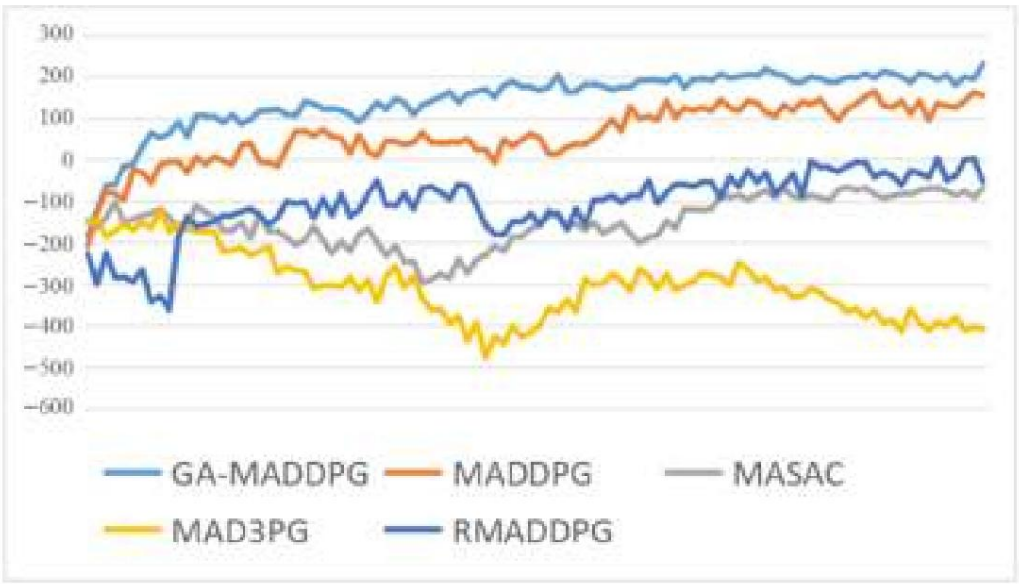


Figura 10. Comparación de costos promedio del entorno de generalización 2.

Se puede ver en las Figuras 9 y 10 que en los entornos experimentales con dos configuraciones de parámetros diferentes, a pesar de los cambios en la cantidad de UGV, la cantidad de puntos objetivo y la cantidad de obstáculos, el algoritmo GA-MADDPG aún puede funcionar mejor que los otros algoritmos, lo que demuestra plenamente la solidez del algoritmo GA-MADDPG y su universalidad para escenarios ambientales.

4.4.2. Experimentos sobre la eficacia de la BS móvil

Las subsecciones anteriores prueban la estabilidad y convergencia de nuestro algoritmo propuesto . Además, la última sección demuestra que nuestro algoritmo propuesto es superior en el mismo escenario. Para demostrar mejor la efectividad de la estación base móvil propuesta en este artículo, agregamos un experimento adicional: solo cambiamos la BS móvil a una BS fija pero usando el mismo algoritmo.

Utilizamos el retorno de la comunicación como métrica de evaluación, y el retorno de la comunicación con una estación base móvil es mejor que el de la estación base fija desde el comienzo del entrenamiento, como se muestra en la Figura 11. El retorno de la comunicación de un solo UGV

Machine Translated by Google

eventualmente puede converger a alrededor de 300, mientras que el de la estación base fija ronda los 200 pies, lo que demuestra plenamente la efectividad de nuestra estación base móvil propuesta.

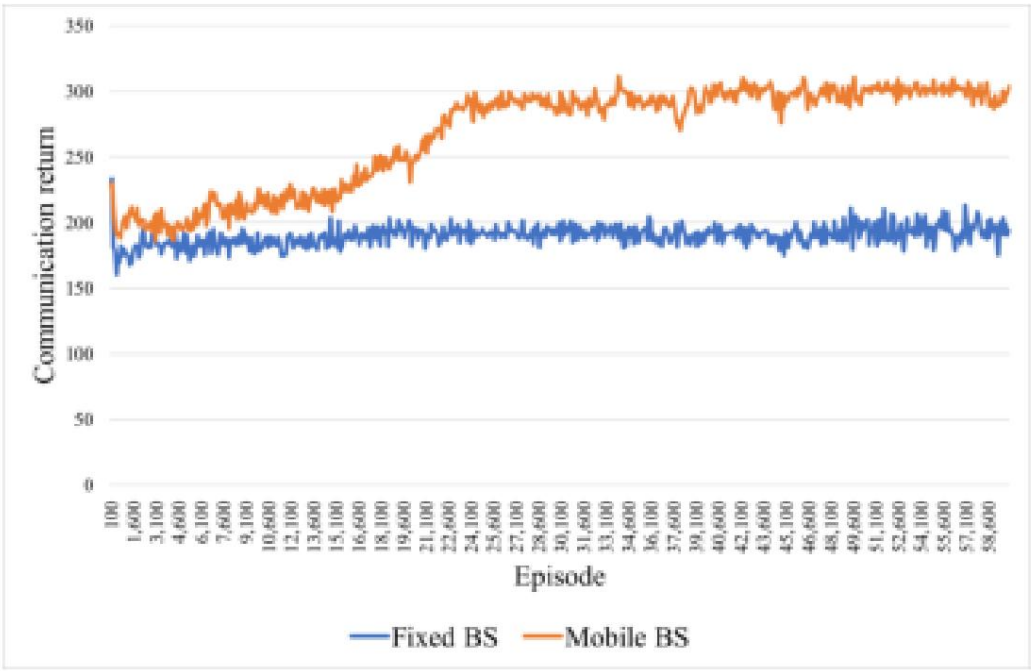


Figura 11. Comparación de retornos de comunicación entre BS móviles y BS fijas.

5. Conclusiones

En este artículo se propone un sistema cooperativo para la navegación cooperativa multi-UGV dentro de un área de cobertura de comunicaciones. El sistema está formulado como un MDP para determinar una política de navegación óptima para los UGV, con el objetivo de maximizar la recompensa total. A diferencia de estudios anteriores centrados en la navegación fija con reconocimiento de cobertura, este artículo presenta un enfoque novedoso al incorporar una BS móvil en el algoritmo de cuerpos múltiples inteligentes . Esta innovación tiene como objetivo mejorar la cobertura de comunicación y ampliar el espacio de soluciones disponible para agentes inteligentes. Para mitigar el riesgo de óptimos locales, este estudio introduce un mecanismo de actualización adaptativa de hiperparámetros GA para abordar el problema de navegación multi-UGV. Acuñamos el término GA-MADDPG para referirnos a este novedoso algoritmo RL. Los resultados de la simulación demuestran que GA-MADDPG exhibe un rendimiento, tasas de convergencia y efectividad favorables en comparación con ot

En nuestra investigación futura, nos gustaría abordar los siguientes puntos: (1) Para mejorar el realismo del modelo, se puede combinar un control PID tradicional con RL multiagente y optimizar aún más la política de navegación tomando el control de la operación de la máquina. (2) Se puede intentar utilizar una nueva arquitectura para aprender políticas, como mediante el uso de LSTM (memoria a corto plazo) y la arquitectura transformadora. LSTM puede resolver el problema de la desaparición y explosión del gradiente durante el entrenamiento de secuencias largas; La ventaja de la arquitectura transformadora es que su capa de atención puede aprender muy bien una secuencia de acciones.

Contribuciones de los autores: Diseño de investigación, XL y MH; adquisición de datos, XL; escritura: preparación del borrador original, XL; redacción: revisión y edición, XL y MH; supervisión, MH; adquisición de financiación , MH Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Este trabajo fue apoyado por el Proyecto Especial de la Plataforma de Innovación Académica de la Provincia de Hainan (YSPTZX202209).

Declaración de disponibilidad de datos: las contribuciones originales presentadas en el estudio se incluyen en el artículo; más consultas pueden dirigirse al autor correspondiente.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Machine Translated by Google

Referencias

1. Afzali, SR; Shoaran, M.; Karimian, G. Un algoritmo DDPG de convergencia modificado para manipulación robótica. Proceso neuronal. Letón. 2023, 55, 11637–11652. [Referencia cruzada]
2. Silla.; Niu, H.; Carrasco, J.; Álvaro, F.; Yin, H.; Lennox, B. Diseño y validación experimental de la planificación y el control de trayectorias rápidas basadas en el aprendizaje por refuerzo profundo para robots móviles en un entorno desconocido. Traducción IEEE. Red neuronal. Aprender. Sistema. 2022, 35, 5778–5792. [Referencia cruzada]
3. Dong, X.; Wang, Q.; Yu, J.; Lü, J.; Ren, Z. Seguimiento de la formación de resultados neuroadaptativos para sistemas multiagentes no lineales heterogéneos con múltiples líderes no idénticos. Traducción IEEE. Red neuronal. Aprender. Sistema. 2022, 35, 3702–3712. [Referencia cruzada]
4. Wang, Y.; Zhao, C.; Liang, J.; Wen, M.; Yue, Y.; Wang, D. Localización y planificación integradas para el control de crucero de pelotones de UGV en entornos libres de infraestructura. Traducción IEEE. Intel. Transp. Sistema. 2023, 24, 10804–10817. [Referencia cruzada]
5. Tran, vicepresidente; Perera, A.; Garratt, MA; Kasmarik, K.; Anavatti, SG Planificación de la ruta de cobertura con restricciones presupuestarias para múltiples vehículos terrestres no tripulados. Traducción IEEE. Intel. Transp. Sistema. 2023, 24, 12506–12522. [Referencia cruzada]
6. Wu, Y.; Li, Y.; Li, W.; Li, H.; Lu, R. Esquema de localización robusto basado en Lidar para vehículos terrestres no tripulados mediante multisensor Fusión. Traducción IEEE. Red neuronal. Aprender. Sistema. 2021, 32, 5633–5643. [Referencia cruzada]
7. Zhang, W.; Zuo, Z.; Wang, Y. Sistemas multiagente en red: interacción antagónica, restricción y su aplicación. IEEE Trans. Red neuronal. Aprender. Sistema. 2021, 33, 3690–3699. [Referencia cruzada] [PubMed]
8. Chen, D.; Weng, J.; Huang, F.; Zhou, J.; Mao, Y.; Liu, X. Algoritmo heurístico de Monte Carlo para vehículos terrestres no tripulados en tiempo real localización y mapeo. Traducción IEEE. Veh. Tecnología. 2020, 69, 10642–10655. [Referencia cruzada]
9. Unlu, HU; Patel, N.; Krishnamurthy, P.; Khorrami, F. Sistema de aprendizaje profundo basado en atención temporal de ventana deslizante para una robusta Fusión de modalidades de sensores para navegación UGV. Robot IEEE. Automático. Letón. 2019, 4, 4216–4223. [Referencia cruzada]
10. Lyu, X.; Centro.; Wang, Z.; Gao, D.; Li, K.; Chang, L. Un mecanismo de navegación integrado tolerante a fallas SINS/GNSS/VDM basado en un factor de intercambio de información adaptativo. Traducción IEEE. Instrumento. Medidas. 2022, 71, 1–13. [Referencia cruzada]
11. Sol, C.; Sí, M.; Hu, G. Optimización distribuida para dos tipos de sistemas multiagente heterogéneos. Traducción IEEE. Red neuronal. Aprender. Sistema. 2020, 32, 1314–1324. [Referencia cruzada]
12. Shan, Y.; Fu, Y.; Chen, X.; Lin, H.; Lin, J.; Huang, K. Método de identificación de regiones transitables basado en LiDAR para conducción de UGV todoterreno . Traducción IEEE. Intel. Veh. 2023, 9, 3544–3557. [Referencia cruzada]
13. Garaffa, LC; Basso, M.; Konzen, AA; de Freitas, EP Aprendizaje reforzado para la exploración de robótica móvil: una encuesta. Traducción IEEE . Red neuronal. Aprender. Sistema. 2021, 34, 3796–3810. [Referencia cruzada]
14. Huang, CQ; Jiang, F.; Huang, QH; Wang, XZ; Han, ZM; Huang, WY Red de convolución de atención de gráfico dual para clasificación de nubes de puntos tridimensionales . Traducción IEEE. Red neuronal. Aprender. Sistema. 2022, 35, 4813–4825. [Referencia cruzada]
15. Nguyen, HT; Garratt, M.; Construido; Abbass, H. Supervisó una red de actores profundos para el aprendizaje por imitación en una tarea de coordinación tierra-aire entre UAV y UGV . En Actas de la Serie de Simposios IEEE sobre Inteligencia Computacional (SSCI) de 2017, Honolulu, Hawaii, EE. UU., 27 de noviembre a 1 de diciembre de 2017; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2017; págs. 1–8.
16. Han, Z.; Yang, Y.; Wang, W.; Zhou, L.; Gadekallu, TR; Alazab, M.; Gope, P.; Su, C. Diseño de trayectoria basado en mapas RSSI para UGV contra radios maliciosas Fuente: Un enfoque de aprendizaje por refuerzo. Traducción IEEE. Intel. Transp. Sistema. 2022, 24, 4641–4650. [Referencia cruzada]
17. Feng, Z.; Huang, M.; Wu, Y.; Wu, D.; Cao, J.; Korovin, I.; Gorbachov, S.; Gorbacheva, N. Aproximación del equilibrio de Nash para el juego de Markov de interferencia anti-UAV utilizando un novedoso aprendizaje de refuerzo de múltiples agentes activado por eventos. Red neuronal. 2023, 161, 330–342. [Referencia cruzada]
18. Huang, X.; Deng, H.; Zhang, W.; Canción, R.; Li, Y. Hacia una navegación multimodal basada en la percepción: un refuerzo profundo método de aprendizaje. Robot IEEE. Automático. Letón. 2021, 6, 4986–4993. [Referencia cruzada]
19. Wu, S.; Xu, W.; Wang, F.; Li, G.; Pan, M. Optimización de trayectoria basada en aprendizaje de refuerzo profundo federado distribuido para Redes cooperativas de emergencia aire-tierra. Traducción IEEE. Veh. Tecnología. 2022, 71, 9107–9112. [Referencia cruzada]
20. Watkins, CJ; Dayan, P. Q-aprendizaje. Mach. Aprender. 1992, 8, 279–292. [Referencia cruzada]
21. Tran, TH; Nguyen, MT; Kwok, Nuevo México; Ja, QP; Fang, G. Enfoque PID de modo deslizante para un control robusto de bajo nivel de un UGV. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE 2006 sobre Ciencia e Ingeniería de Automatización, Shanghai, China, 8 a 10 de octubre de 2006; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2006; págs. 672–677.
22. Schaul, T.; Quan, J.; Antonoglou, I.; Silver, D. Repetición de experiencia priorizada. arXiv 2015, arXiv:1511.05952.
23. Sutton, RS; Barto, AG Aprendizaje por refuerzo: una introducción. Traducción IEEE. Red neuronal. 1998, 9, 1054. [Referencia cruzada]
24. Lowe, R.; Wu, YI; Tamar, A.; Harb, J.; Pieter Abbeel, O.; Mordatch, I. Actor-crítico multiagente para una economía mixta cooperativa-competitiva ambientes. arXiv 2017, arXiv:1706.02275.
25. Mirjalili, S.; Mirjalili, S. Algoritmo genético. Algoritmos evolutivos y redes neuronales: teoría y aplicaciones; Saltador: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2019; págs. 43–55.
26. Sehgal, A.; La, H.; Luis, S.; Nguyen, H. Aprendizaje por refuerzo profundo utilizando algoritmo genético para la optimización de parámetros. En Actas de la Tercera Conferencia Internacional IEEE sobre Computación Robótica (IRC) de 2019, Nápoles, Italia, 25 a 27 de febrero de 2019; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2019; págs. 596–601.
27. Chen, R.; Yang, B.; Li, S.; Wang, S. Un algoritmo genético de autoaprendizaje basado en el aprendizaje por refuerzo para un taller de trabajo flexible problema de programación. Computadora. Ing. de Indiana. 2020, 149, 106778. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

28. Alipour, MM; Razaví, SN; Feizi Derakhshi, señor; Balafar, MA Un algoritmo híbrido que utiliza un algoritmo genético y una heurística de aprendizaje por refuerzo multiagente para resolver el problema del viajante. Computación neuronal. Aplica. 2018, 30, 2935–2951. [Referencia cruzada]
29. Liu, Z.; Chen, B.; Zhou, H.; Koushik, G.; Hebert, M.; Zhao, D. Mapper: Planificación de rutas multiagente con aprendizaje por refuerzo evolutivo en entornos dinámicos mixtos. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE/RSJ de 2020 sobre Robots y Sistemas Inteligentes (IROS), Las Vegas, NV, EE. UU., 25 a 29 de octubre de 2020; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2020; págs. 11748-11754.
30. Huang, M.; Lin, X.; Feng, Z.; Wu, D.; Shi, Z. Un enfoque de decisión de múltiples agentes para la asignación óptima de energía en un sistema de microrred. eléctrico. Sistema de energía. Res. 2023, 221, 109399. [Referencia cruzada]
31. Qiu, C.; Hu, Y.; Chen, Y.; Zeng, B. Comunicaciones inalámbricas de recolección de energía basadas en gradiente de política determinista profunda (DDPG). IEEE Internet Things J. 2019, 6, 8577–8588. [Referencia cruzada]
32. Littman, ML Juegos de Markov como marco para el aprendizaje por refuerzo de múltiples agentes. En actas de Proc International Conferencia sobre aprendizaje automático, New Brunswick, Nueva Jersey, EE. UU., 10 a 13 de julio de 1994; págs. 157-163.
33. Feng, Z.; Huang, M.; Wu, D.; Wu, ecualizador; Yuen, C. Aprendizaje reforzado con múltiples agentes con recorte de políticas y evaluación promedio para el juego de Markov de comunicación asistida por UAV. Traducción IEEE. Intel. Transp. Sistema. 2023, 24, 14281–14293. [Referencia cruzada]
34. Liu, H.; Zong, Z.; Li, Y.; Jin, D. NeuroCrossover: un esquema de selección de locus genético inteligente para algoritmos genéticos que utilizan aprendizaje reforzado. Aplica. Computación suave. 2023, 146, 110680. [Referencia cruzada]
35. Köksal Ahmed, E.; Li, Z.; Veeravalli, B.; Ren, S. Algoritmo genético habilitado para el aprendizaje por refuerzo para la programación de autobuses escolares. J. Intel. Transp. Sistema. 2022, 26, 269–283. [Referencia cruzada]
36. Chen, Q.; Huang, M.; Xu, Q.; Wang, H.; Wang, J. Algoritmo genético basado en el aprendizaje por refuerzo en la optimización multidimensional Esquema nacional de discretización de datos. Matemáticas. Problema. Ing. 2020, 2020, 1698323. [Referencia cruzada]
37. Yang, J.; Sol, Z.; Hu, W.; Steinmeister, L. Control conjunto de la fabricación y el sistema de microrred in situ a través de una nueva red neuronal Algoritmos integrados de aprendizaje por refuerzo. Aplica. Energía 2022, 315, 118982. [CrossRef]
38. Shi, H.; Liu, G.; Zhang, K.; Zhou, Z.; Wang, J. MARL Sim2real Transfer: fusionando la realidad física con la virtualidad digital en Metaverso. Traducción IEEE. Sistema. Hombre Cibernético. Sistema. 2023, 53, 2107–2117. [Referencia cruzada]
39. Yu, C.; Velu, A.; Vinitsky, E.; Gao, J.; Wang, Y.; Bayen, A.; Wu, Y. La sorprendente eficacia de ppo en juegos cooperativos de múltiples agentes . Adv. Inf. neuronal. Proceso. Sistema. 2022, 35, 24611–24624.
40. Rashid, T.; Farquhar, G.; Peng, B.; Whiteson, S. Qmix ponderado: factorización de función de valor monótono en expansión para profundidad Aprendizaje por refuerzo multiagente. Adv. Inf. neuronal. Proceso. Sistema. 2020, 33, 10199–10210.
41. Wu, T.; Wang, J.; Lu, X.; Du, Y. Reconfiguración de la red de distribución híbrida AC/DC con formación de microredes utilizando actor-crítico suave multiagente . Aplica. Energía 2022, 307, 118189. [CrossRef]
42. Yan, C.; Xiang, X.; Wang, C.; Li, F.; Wang, X.; Xu, X.; Shen, L. PASCAL: MADRL basado en un plan de estudios específico para una población para agrupaciones sin colisiones con enjambres de vehículos aéreos no tripulados de ala fija a gran escala. Aerosp. Ciencia. Tecnología. 2023, 133, 108091. [Referencia cruzada]
43. Ackermann, JJ; Gabler, V.; Osa, T.; Sugiyama, M. Reducción del sesgo de sobreestimación en dominios de múltiples agentes utilizando Double Críticas centralizadas. arXiv 2019, arXiv:1910.01465.
44. Xing, X.; Zhou, Z.; Li, Y.; Xiao, B.; Xun, Y. Planificación de trayectoria de formación cooperativa adaptativa de múltiples UAV basada en un algoritmo MATD3 mejorado de aprendizaje por refuerzo profundo. Traducción IEEE. Veh. Tecnología. 2024. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Aprendizaje automático híbrido para la inspección automatizada de seguridad vial del puente del puerto de Auckland

Munish Rathee 1,* , Boris Ba˘ ci´c 1,* y Maryam Doborjeh 1,2

1 Escuela de Ingeniería, Ciencias Informáticas y Matemáticas, Universidad Tecnológica de Auckland, Auckland 1010, Nueva Zelanda; mgholami@aut.ac.nz o maryam.gholami.doborjeh@aut.ac.nz
2 Ingeniería del conocimiento y descubrimiento de innovación en investigación, Universidad Tecnológica de Auckland, Auckland 1010, Nueva Zelanda

* Correspondencia: munishonthenet@gmail.com o munish.rathee@aut.ac.nz (MR); boris.bacic@aut.ac.nz (BB)

Resumen: El Puente del Puerto de Auckland (AHB) utiliza una barrera de hormigón móvil (MCB) para regular el flujo bidireccional desigual del tráfico diario. Además del riesgo de error humano durante las inspecciones visuales periódicas, los miembros del personal que inspeccionan el MCB trabajan en diversas condiciones climáticas y de iluminación, esforzándose en posturas de inspección ergonómicamente insalubres con el peso adicional del equipo de protección para mitigar los riesgos, por ejemplo, escombros voladores. Para aumentar las inspecciones visuales de un MCB utilizando tecnología de visión por computadora, este estudio presenta una solución híbrida de aprendizaje profundo que combina la manipulación del núcleo con estrategias personalizadas de aprendizaje por transferencia. Las grabaciones de datos de video se capturaron en diversas condiciones climáticas y de luz (bajo la supervisión de seguridad de expertos de la industria) involucrando un sistema de cámara de alta velocidad (120 fps) conectado a un vehículo de transferencia MCB. Antes de identificar un peligro para la seguridad, por ejemplo, la posición insegura de un pasador que conecta dos segmentos de hormigón de 750 kg del MCB, un preprocesamiento de varias etapas de la región espaciotemporal de interés (ROI) implica una ventana móvil antes de identificar los fotogramas de vídeo que contienen información de diagnóstico. . Este estudio utiliza la arquitectura ResNet-50, mejorada con convoluciones 3D, dentro del marco STENet para capturar y analizar datos espaciotemporales, facilitando la vigilancia en tiempo real del Puente del Puerto de Auckland (AHB). Teniendo en cuenta la naturaleza escasa de las anomalías de seguridad, los resultados iniciales de clasificación binaria revisados por pares (82,6%) para escenarios seguros e inseguros (que requieren intervención) mejoraron al 93,6% incorporando datos sintéticos, comentarios de expertos y reentrenamiento del modelo. Esta adaptación permitió la detección optimizada de falsos positivos y falsos negativos. En el futuro, nuestro objetivo es ampliar los métodos de detección de anomalías a diversas inspecciones de infraestructura, mejorando la resiliencia urbana, la eficiencia del transporte y la seguridad.

Palabras clave: detección de anomalías; detección de daños estructurales; seguridad de Trafico; visión por computador; aprendizaje automático ; aprendizaje profundo; transferir aprendizaje; ARDAD

check for updates

Cita: Rathee, M.; Ba˘ ci´c, B.; Doborjeh, M. Aprendizaje automático híbrido para la inspección automatizada de seguridad vial del puente del puerto de Auckland. Electrónica 2024, 13, 3030. https://doi.org/10.3390/electrónica13153030

Editores académicos: Jiwei Zhang y Shaozhang Niu

Recibido: 15 de junio de 2024
Revisado: 24 de julio de 2024
Aceptado: 29 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.
Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

El puente del puerto de Auckland, que se extiende a lo largo de 1,2 km a través del puerto de Waitemata, se inauguró el 30 de mayo de 1959. Inicialmente transitaba 11.205 vehículos diarios, actualmente el puente recibe alrededor de 154.000 vehículos diarios, con picos de más de 200.000 debido a los turnos del transporte público [1]. El puente apoya el rápido desarrollo regional, con una población de North Shore cuadruplicada en los últimos 50 años. La Autoridad de Transporte de Nueva Zelanda (NZTA), también conocida como Waka Kotahi, invierte anualmente hasta NZD 4 millones en su mantenimiento y emplea a unas 160 personas para las actualizaciones y el mantenimiento continuos. Como toda infraestructura de transporte crucial en Nueva Zelanda, el Puente del Puerto de Auckland (AHB) enfrenta importantes desafíos de mantenimiento debido a factores ambientales y externos. Estos desafíos contribuyen a los elevados costes generales de mantenimiento de la infraestructura vial del país, que ascienden hasta el 1,1% del PIB de Nueva Zelanda [2].

Este artículo está organizado de la siguiente manera:

Machine Translated by Google

La Sección 1 presenta una visión general del problema y la pregunta de investigación; La Sección 2 incluye una revisión exhaustiva de la literatura sobre la detección automatizada de defectos y anomalías en las carreteras; y la Sección 3 propone una nueva metodología basada en una solución híbrida de aprendizaje profundo para aumentar las inspecciones visuales utilizando tecnología de visión por computadora.

1.1. Fondo

Instalada en 1990, la barrera móvil de hormigón (MCB) en la AHB ha mejorado el flujo de tráfico y la seguridad en las horas pico. Todos los días de la semana, el AHB utiliza dos máquinas de transferencia de barrera (BTM) para ajustar la configuración de los carriles, mejorando el flujo de tráfico durante las horas pico moviendo bloques de concreto de 750 kg. Los BTM, esenciales para gestionar las mareas diarias, se introdujeron en 2009 por 1,4 millones de dólares neozelandeses cada uno. A pesar del alto costo, los BTM no cuentan con un sistema de vigilancia automatizado que garantice la integridad de las barreras móviles de concreto (MCB). En ausencia de un sistema de inspección de seguridad de barreras MCB, el personal de la NZTA debe caminar más de una milla en condiciones peligrosas y en medio de tráfico peligroso para inspeccionar manualmente y garantizar la integridad de la MCB [3].

La confiabilidad del sistema MCB depende de la integridad de los pasadores metálicos que conectan los segmentos de la barrera (Figura 1). La función crítica de los pasadores es asegurar segmentos de barrera que regulan la división de carriles en función del flujo de tráfico [3]. Los pasadores que funcionan mal o se desalojan plantean riesgos para la seguridad del tráfico e impiden la eficiencia del sistema, lo que genera posibles interrupciones del tráfico y mayores riesgos de accidentes.

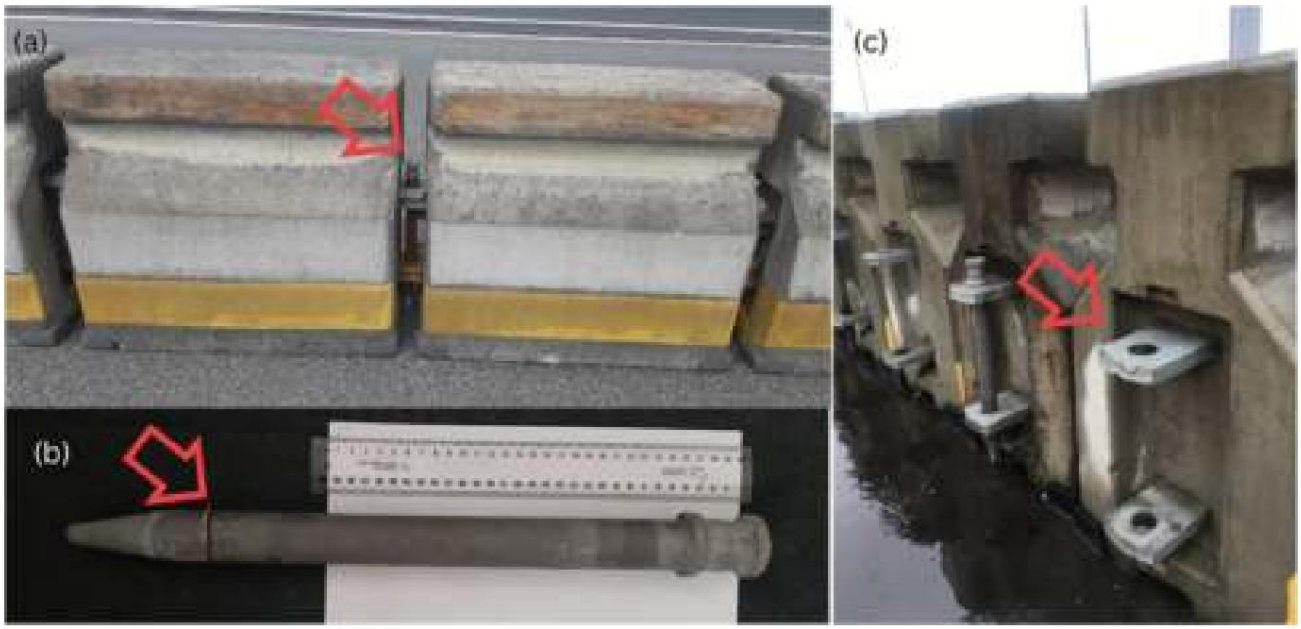


Figura 1. Un sistema de barrera de hormigón móvil y sus desafíos de seguridad. (a) Posición del pasador que requiere fijación, (b) pasador metálico con anillo de seguridad desmontable y (c) juntas de barrera de hormigón móviles sin pasadores metálicos.

Los trabajos anteriores en inspección automatizada de infraestructuras a menudo resultan insuficientes en entornos dinámicos y complejos como el AHB [4–6]. Esta investigación tiene como objetivo avanzar en el campo incorporando un novedoso aprendizaje profundo híbrido y análisis de datos espaciotemporales, que permite una detección más precisa y confiable de anomalías de seguridad en entornos complejos como el AHB. Este estudio emplea análisis espaciotemporal, algoritmos de IA desplegables y generación de datos sintéticos semiautomáticos para mejorar el monitoreo de barreras de tráfico, transformando la investigación en soluciones prácticas de detección de anomalías en tiempo real. El objetivo es reducir los riesgos relacionados con las inspecciones manuales, mejorar la seguridad del tráfico (Figura 2) y aumentar la eficiencia de los sistemas de barreras. Sobre la base de la prueba de concepto desarrollada en 2019-2020 [7], esta investigación utiliza visión por computadora y técnicas de aprendizaje profundo para autenticar

Machine Translated by Google

tomate la detección de pasadores metálicos en barreras móviles de hormigón (MCB) en el puente del puerto de Auckland (AHB) .

Figura 2. La escala de los desafíos para la inspección manual y la fijación del pasador de metal: (a) varias ubicaciones de barreras de concreto móviles en el Puente del Puerto de Auckland y sus alrededores; (b) encontrar un pasador inseguro y fijarlo manualmente.

Los modelos híbridos de aprendizaje automático, que integran CNN con otras técnicas de aprendizaje automático, pueden revolucionar las inspecciones al mejorar la precisión y confiabilidad de la detección y clasificación de condiciones anómalas [8,9]. Los modelos de aprendizaje profundo entrenados por ffi en el conjunto de datos mejorados sintéticamente utilizan un enfoque de detección basado en características para analizar cuadros de video en busca de signos de desplazamiento de pines. La capacidad de monitoreo en tiempo real es crucial para una gestión eficaz del tráfico, especialmente durante las horas pico. Las alertas inmediatas a los operadores de puentes facilitan las intervenciones oportunas, evitando que posibles problemas de seguridad se conviertan en incidentes más graves. El desarrollo de un sistema de vigilancia automatizado de este tipo hace avanzar la ingeniería civil y la seguridad del tráfico, ofreciendo una solución escalable y eficiente a un desafío de seguridad de larga data y sentando un precedente para aplicaciones similares en todo el mundo, lo que potencialmente conducirá a una adopción más amplia de soluciones inteligentes de gestión del tráfico en entornos urbanos globales [10].

Este estudio desarrolló un sistema híbrido de aprendizaje automático para la detección de anomalías en tiempo real y preservando la privacidad en las inspecciones de seguridad vial. Las contribuciones de esta investigación se enumeran a continuación:

- Produce un artefacto de análisis de seguridad vial escalable a escenarios en más de 20 países y cientos de escenas de tráfico similares [10] que emplean barreras de concreto móviles.
- Introduce un método de generación de datos sintéticos semiautomático utilizando una novedosa técnica de clonación en segundo plano. El novedoso enfoque aborda la escasez de datos y mejora el entrenamiento de modelos, con valor de repetibilidad para otros estudios de casos de visión por computadora que enfrentan problemas de equilibrio de conjuntos de datos.
- Refina los métodos de clasificación para equilibrar los falsos positivos y negativos, mejorando la precisión de la detección del 82,6% (informado en una investigación anterior revisada por pares [11]) al 93,6%.

  Lograr este aumento del 11% en la precisión dentro de escenas de tráfico complejas caracterizadas por fondos y condiciones de iluminación caóticas subraya la viabilidad del artefacto para aplicaciones del mundo real.
- Navega con éxito en escenas de tráfico peligroso para la recopilación de datos siguiendo los protocolos de seguridad de la industria. Este enfoque repetible proporciona un plan integral para gestionar escenarios similares, garantizar la satisfacción de las partes interesadas y lograr datos suficientes.

Machine Translated by Google

1.2. Preguntas de investigación y conceptos de modelado

Este artículo presenta el desarrollo de soluciones automatizadas que aprovechan la visión por computadora y el aprendizaje profundo para mejorar la seguridad del tráfico y la eficiencia operativa mediante la automatización de la inspección de pasadores metálicos en barreras móviles de concreto. Esta investigación explora el potencial de los sensores visuales para detectar anomalías en la actividad del transporte manteniendo la privacidad. Centrada en la barrera móvil del Puente del Puerto de Auckland, nuestra investigación automatiza la detección de seguridad y mejora la detección de anomalías para clases críticas pero subrepresentadas, como posiciones de pasadores inseguras. Además, se perfeccionaron las técnicas de clasificación para equilibrar los falsos positivos y negativos, mejorando así la confiabilidad y eficacia del sistema de s

1. ¿Se puede extraer información relevante de los sensores visuales para la detección de anomalías en actividad de transporte preservando al mismo tiempo la privacidad? (a) ¿Cuáles son los métodos óptimos para extraer información vital de medios visuales para detectar anomalías en la actividad del transporte sin comprometer la privacidad?
   (b) ¿Hasta qué punto se puede automatizar el control de seguridad de la barrera móvil del Puente del Puerto de Auckland y las áreas circundantes utilizando métodos AI, CV y DL?
2. ¿Cómo se puede optimizar la generación de datos sintéticos para representar las clases minoritarias, como las posiciones inseguras de los pines, en las tareas de detección de anomalías dentro de la seguridad vial?
3. ¿Cómo se puede perfeccionar el rendimiento de la clasificación para optimizar un equilibrio entre falsos positivos y negativos de la prueba de concepto (PoC) inicial [7] al tiempo que se consideran los escenarios de datos presentes y previstos?

2. Revisión de la literatura

La detección automatizada de anomalías y defectos en las carreteras (ARDAD) utiliza visión por computadora y combina métodos tradicionales y de aprendizaje profundo con aprendizaje no supervisado [12,13]. Los métodos tradicionales no supervisados, que se basan en conjuntos de datos de condiciones normales, a menudo producen altas tasas de falsas alarmas en entornos complejos [14]. Esta investigación emplea la red espacial-temporal mejorada (STENet) para abordar el problema de las escenas de tráfico complejas, que aprovecha los datos temporales y espaciales para una mejor generalización y una detección sólida de anomalías.

2.1. Puente del puerto de Auckland

La Agencia de Transporte de Nueva Zelanda (NZTA) gestiona el Puente del Puerto de Auckland (AHB), una autopista de ocho carriles por la que circulan más de 200.000 vehículos al día. Instalada en la década de 1990, la barrera móvil de hormigón para carril (MCB) es esencial para prevenir accidentes y optimizar el flujo de tráfico durante las horas pico. El sistema MCB, que consta de bloques de hormigón de 750 kg conectados por pasadores metálicos, es propenso a desplazarse debido al tráfico y las vibraciones ambientales, lo que plantea riesgos importantes [1,3,15]. Las máquinas de transferencia de barrera (BTM) facilitan el movimiento del MCB y, por lo general, ajustan los carriles cuatro veces al día para gestionar el flujo de tráfico de forma eficaz.

La inspección manual de los pasadores requiere mucha mano de obra y se realiza en condiciones ergonómicas deficientes, lo que la hace susceptible a errores humanos. A pesar de la eficiencia del sistema para cambiar rápidamente los carriles de tránsito (aproximadamente 10 minutos para una sección de un kilómetro), la falta de mecanismos automatizados de inspección de pasadores dentro de los BTM existentes de NZD 1,4 millones puede verse como un descuido importante y una oportunidad para aplicar CV. en protocolos de mantenimiento y seguridad [1,15,16]. Si bien es eficaz para gestionar el contraflujo y los carriles de alta ocupación, el sistema de barrera de hormigón móvil (MCB) requiere un monitoreo manual continuo para garantizar su integridad estructural y confiabilidad operativa.

2.2. Revisión de encuestas sobre ARDAD

La aplicación de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje profundo en la detección de anomalías de infraestructura vial y de objetos ha logrado avances significativos en la última década [5,12,13]. Los avances de la IA han impactado ámbitos como la conducción autónoma,

Machine Translated by Google

reconocimiento facial y atención médica personalizada [17,18]. Las técnicas de aprendizaje profundo, en particular las redes neuronales convolucionales (CNN), han revolucionado el procesamiento de imágenes al automatizar tareas de segmentación, reconocimiento y reconstrucción [6]. Las CNN procesan y clasifican de manera eficiente datos de imágenes mediante agrupación y convolución, extrayendo características y reduciendo la dimensionalidad [19-22]. A diferencia de los métodos tradicionales que se basan en funciones diseñadas manualmente , los modelos de aprendizaje profundo aprenden representaciones de funciones directamente a partir de los datos. Arquitecturas como R-CNN y sus variantes sobresalen en la detección de objetos utilizando métodos de propuesta de región para áreas de interés preseleccionadas [23].

Además, el aprendizaje por transferencia mejora la generalización del modelo al aplicar modelos entrenados en una tarea a tareas relacionadas pero diferentes [24]. El aprendizaje por transferencia aprovecha modelos previamente entrenados para mejorar el rendimiento en nuevos conjuntos de datos, a menudo ajustando las capas finales de redes como ResNet-50, que demostró un éxito notable en el Visual Recognition Challenge [25]. El enfoque subraya la versatilidad y la capacidad de adaptación de los modelos de aprendizaje profundo para manejar entornos de datos visuales diversos y complejos.

2.3. Técnicas de optimización de imágenes y vídeo en ARDAD

Seleccionar un espacio de color apropiado en la segmentación de imágenes es crucial y, a menudo, específico de la aplicación, sin consenso sobre la mejor opción. Los espacios de color comunes incluyen RGB, LAB, CMY, XYZ, HSV, YCbCr, YIQ, YUV y DHT [26,27]. Por ejemplo, RGB es eficaz para los cambios en la concentración de bilirrubina (Ecuación (1)), mientras que CMY y HSV destacan en otras tareas [28]. Para optimizar el proceso se han desarrollado métodos avanzados como histogramas unidimensionales para la selección automática del espacio de color [29] e histogramas bidimensionales para una segmentación mejorada [30] . Aplicaciones específicas, como YCbCr para detección de rostros [31] y YIQ para imágenes satelitales [32], demuestran enfoques personalizados. Para monitorear el Puente del Puerto de Auckland (AHB), el componente Y (Ecuación (1)) de la transformación RGB a YCbCr puede mejorar la detección de anomalías estructurales al centrarse en la luminancia y minimizar las variaciones de color debido a la iluminación o las condiciones climáticas.

$$Y = 0{,}299R + 0{,}587G + 0{,}114B \quad (1)$$

También se han aplicado técnicas como el umbral de histograma y la agrupación basada en SVM para mejorar la segmentación estructurando los datos de píxeles en grupos de colores coherentes [33,34].

2.4. Técnicas avanzadas en análisis de imágenes y videos para

ARDAD En visión por computadora, la detección de objetos en videos implica reconocer el movimiento de objetos en múltiples fotogramas, utilizando técnicas como sustracción de fondo, diferenciación de fotogramas y flujo óptico. El modelo de mezcla gaussiana (GMM) es un método frecuente para la separación de fondos, que mejora la distinción entre primer plano y fondo mediante el modelado de distribuciones de píxeles con mezclas gaussianas [35–37]. La coincidencia de plantillas, otro enfoque práctico, utiliza funciones de MATLAB 2022a como normxcorr2 y regionprops para rastrear objetos en fotogramas sucesivos identificando el pico de correlación cruzada normalizada [38]. La coincidencia de plantillas , representada por la Ecuación (2), calcula el centroide ponderado por intensidad de un objeto usando la siguiente expresión:

$$xc = \frac{\sum_{i=1}^{N} xi \cdot wi}{norte \sum i=1 \; wi} \quad (2)$$

donde xc es la ubicación del centroide, xi es la ubicación del píxel y wi es la intensidad del píxel. Multiplicar xi por wi en el numerador garantiza que la ubicación de cada píxel esté ponderada por su intensidad, dando más importancia a los píxeles con intensidades más altas en el cálculo del centroide.

Las técnicas de separación de primer plano y fondo dividen un vídeo en fondos estáticos y primeros planos dinámicos, utilizando modelos que se adaptan a los cambios en la escena para detectar movimiento y reconocer objetos [39,40]. Los avances recientes en el GMM han introducido métodos que manejan escenas complejas como el tráfico, mejorando la detección de movimientos lentos.

Machine Translated by Google

o vehículos de gran tamaño [41]. Cada píxel de la secuencia de vídeo se modela como una mezcla de distribuciones K Gaussianas. La probabilidad de observar un valor de píxel X en el momento t viene dada por la ecuación (3).

$$P(Xt) = \sum_{k=1}^{k} \omega k,t \cdot N\ Xt\ \mu k,t,\ \Sigma k,t \quad (3)$$

Aquí, ωk,t es el peso del k^{th} Componente gaussiana en el tiempo t, N es la distribución gaussiana, μk,t es la media de la k gaussiana y $\sum k,t$ es la matriz de covarianza de la k-ésima gaussiana. Por otro lado, los métodos de diferencia de fotogramas detectan el movimiento comparando las diferencias de píxeles de un fotograma al siguiente, una técnica sencilla pero eficaz para identificar objetos en movimiento [42]. Las técnicas de flujo óptico evalúan el movimiento analizando el patrón de movimiento aparente de objetos, superficies y bordes en una escena visual causado por el movimiento relativo entre un observador y la escena [43]. Por ejemplo, la ecuación (4) sintetiza la detección de movimiento utilizando diferencias de fotogramas | Pie - Pie - 1 | identificar cambios y flujo óptico, representado por $It \cdot vt$, analizar patrones de movimiento y velocidades, con α ajustando sus contribuciones relativas.

$$\Delta Mt = | Pie - Pie - 1 | + \alpha \cdot \quad It \cdot vt \quad (4)$$

El seguimiento de objetos en visión por computadora sigue la detección de objetos, utilizando color, textura, forma, tamaño y orientación para rastrear objetos como vehículos o peatones a través de cuadros de video. Un seguimiento sólido es esencial en todas las ubicaciones de las cámaras, las condiciones de iluminación y las escenas abarrotadas [44]. Técnicas como el filtro de Kalman y el filtro de partículas son estándar para rastrear movimientos lineales y no lineales [45]. El análisis de blobs rastrea objetos en imágenes binarizadas en función de características como el área y las dimensiones del cuadro delimitador [46]. El patrón de filtro de Bayer calcula la distancia entre los centroides de los objetos, lo que ayuda a rastrear y medir la velocidad del vehículo.
El filtro de Kalman refina las predicciones de trayectoria combinando ubicaciones reales y predichas [47,48]. Para escenarios no lineales, el filtro de Kalman extendido utiliza la matriz jacobiana para las matrices de transición (Ecuación (5)).

$$\hat{x}k|k = \hat{x}k|k-1 + Kk\ zk - Hk\hat{x}k|k-1 \quad (5)$$

En la ecuación (5), $\hat{x}k|k$ es la estimación del estado actualizada en el momento k; $\hat{x}k|k-1$ es la estimación del estado predicho en el momento k, basada en la estimación del momento k − 1; Kk es la ganancia de Kalman, que dicta la combinación de predicción con observación; zk es la medición real en el momento k; y Hk es la matriz de medición que mapea el espacio de estados en el espacio de medición.

El filtro de partículas mejora el seguimiento en escenarios complejos al muestrear y volver a muestrear las características del objeto a través de cuadros, demostrando ser más efectivo en entornos no lineales y desordenados que otros métodos [49,50]. Utiliza un filtro de partículas de correlación para gestionar las variaciones de escala y las interdependencias de funciones.

El algoritmo de cambio medio, que utiliza un modelo de color estadístico para el seguimiento, converge iterativamente a áreas de alta densidad en el espacio de color con conectividad de 8 puntos para localizar objetos [51]. El Modelo de Movimiento Local Adaptativo (ALMM) aborda el movimiento centrándose en parches regionales en lugar de en el objeto completo, lo que demuestra ser eficaz contra oclusiones y movimientos rápidos [52].

La recopilación de datos y el etiquetado manual en los sistemas ARDAD pueden consumir mucho tiempo y recursos. Si bien los enfoques de aprendizaje profundo ofrecen ventajas significativas en el procesamiento de imágenes y videos debido a su capacidad para superar a los métodos tradicionales, requieren conjuntos de datos sustanciales y potencia computacional [53]. Alternativamente, la extracción de características impulsada por expertos con enfoques tradicionales de aprendizaje automático (ML) puede ser efectiva con conjuntos de datos más pequeños y menos demanda computacional, lo que los hace adecuados para diseños iniciales de sistemas de destino [54]. Los modelos de aprendizaje profundo previamente entrenados facilitan la extracción automática de características y permiten el aprendizaje por transferencia, que adapta los modelos a nuevas funciones sin grandes recursos computacionales [55] y olvidos catastróficos. La fusión del aprendizaje por transferencia con el aprendizaje automático tradicional mejora la clasificación espaciotemporal al aprovechar modelos previamente entrenados para la extracción eficiente de características y aplicar modelos tradicionales para el análisis de secuencias, lo que presenta una oportunidad para mejorar la precisión de la clasificación (Figura 3).

Machine Translated by Google

La combinación del aprendizaje profundo con el aprendizaje automático tradicional se ha aplicado en varios ámbitos, como la predicción del flujo de tráfico y el seguimiento de la salud de los cultivos [56,57].

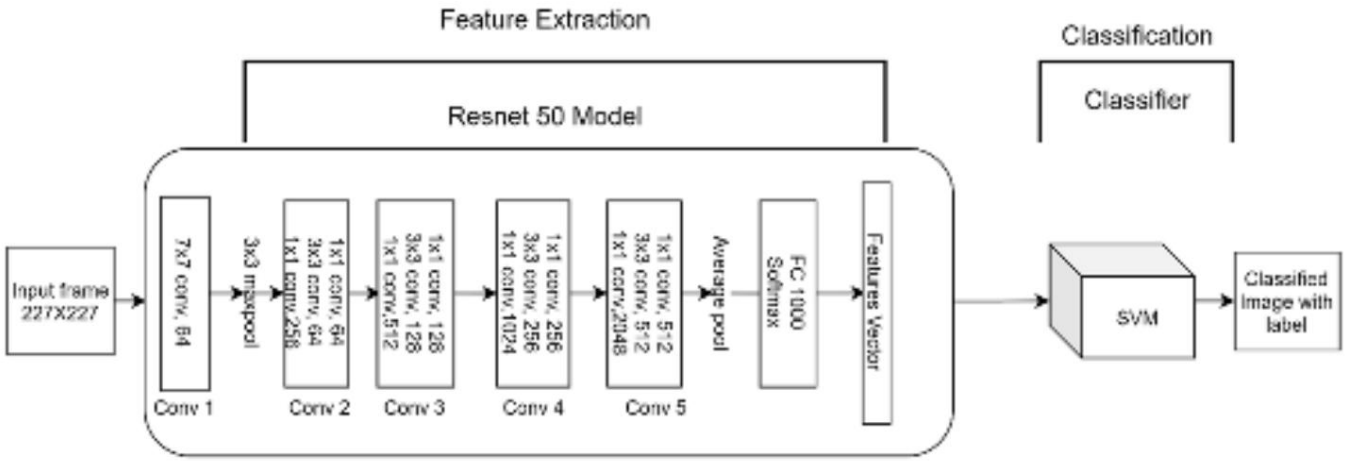


Figura 3. Integración del aprendizaje por transferencia con el aprendizaje automático tradicional: ResNet 50 extrae características de las imágenes de entrada, que una SVM clasifica. La integración de las capacidades de aprendizaje profundo de ResNet 50 para generar espacio de características sin depender del conocimiento experto combinado con un clasificador tradicional (por ejemplo, SVM) presenta la oportunidad de mejorar el rendimiento de la clasificación de imágenes.

La fusión del aprendizaje por transferencia con el aprendizaje automático tradicional (Figura 3) para tareas de clasificación espaciotemporal tiene como objetivo reemplazar la función softmax() (6), que se usa comúnmente como la última capa de una red neuronal para convertir características de alta dimensión. vectores (R) típicamente en una probabilidad de posibles resultados, es decir, normalizados para la distribución de clases de salida prevista.

$$y = \text{softmax}(W_{ff}(X) + b) \quad \hat{y} = \text{softmax}(W_{fRNN}(f_{CNN}(X)) + b) \tag{6}$$

donde la función de pérdida utilizada en el aprendizaje por transferencia es

$$L(\theta) = \ell(y, f(X; \theta)) \quad L(\theta) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \ell(y_i, f(X_i; \theta)) \tag{7}$$

Aquí, L(θ) es la pérdida promedio sobre N muestras de entrenamiento, X_i y y_i son la muestra de entrada y etiqueta, para el i^{th} f es el modelo con parámetros θ inicializados a partir de un modelo previamente entrenado y ℓ es la función de pérdida, como la función cruzada. pérdida de entropía para la clasificación. En aplicaciones prácticas, este enfoque híbrido mejora la eficiencia y precisión de los modelos espaciotemporales en aplicaciones prácticas [56,57].

Las consideraciones clave desde el punto de vista de la metodología del proyecto incluyen la disponibilidad y el equilibrio de los conjuntos de datos, las limitaciones computacionales de las plataformas de destino previstas y la integración de técnicas tradicionales de aprendizaje automático para mejorar el conocimiento de los datos. Las metodologías adoptadas abarcan el aprendizaje por transferencia para mejorar la detección y clasificación de objetos, aprovechar el aprendizaje profundo para la generación de características y utilizar clasificadores de ML tradicionales para extraer más información, lo que garantiza un enfoque integral para el desarrollo de soluciones ARDAD.

3. Materiales y métodos

Este artículo documenta una fase crítica en el proceso de desarrollo, la transición de la prueba de concepto (PoC) inicial [7] a un producto mínimo viable (MVP) para la barrera de hormigón móvil (MCB) del puente del puerto de Auckland, abordando problemas de investigación adicionales. relacionado con la detección de anomalías en un escenario espaciotemporal ruidoso.

Al abordar los desafíos del mundo real y producir soluciones tecnológicas, la metodología de investigación tuvo que adaptarse significativamente para cumplir con las reglas de seguridad de NZTA Waka Kotahi asociadas con la grabación de videos que muestran pines colocados deliberadamente en la temperatura

Machine Translated by Google

Posiciones temporales inseguras (en los segmentos cortos de barrera ubicados en el área de trabajo segura antes del Harbour Bridge). El equipo de recopilación de datos está conectado de forma segura a un BTM utilizando artilugios improvisados (Figura 4 y Tabla 1). Sin embargo, aprovechar múltiples operaciones de Barrier Transfer Machine (BTM) para recopilar datos escasos de clases minoritarias no fue viable, lo que llevó al desarrollo de un enfoque de clonación en segundo plano para producir marcos sintéticos que representan posiciones inseguras de los pines (Tabla 2). Este enfoque metodológico está alineado con la resolución de problemas multidimensionales para proyectos donde es necesaria una adaptación continua a factores externos [58,59].

Figura 4. Configuración de recopilación de datos: iPhone 13 Pro (para LiDAR), Samsung A7 Mobile, Apple iPad 6, banco de energía externo, cámaras GoPro y equipo de montaje, y montaje de cámara y iPhone en un BTM.

Tabla 1. Descripción general de la recopilación de datos. Equipo, especificaciones de la cámara, condiciones climáticas, desafíos encontrados y progresión del avance tecnológico en tres sesiones de recopilación de datos.

Sesión No.	Equipo	Especificaciones de la cámara	Clima Condiciones	Desafíos	Tecnología. Integración
1er	GoPro 8, GoPro 5, Samsung A7 Mobile, Apple iPad 6, cinta adhesiva, banco de energía y tiras de montaje en el BTM. Máquina de transferencia de barrera (BTM) utilizada para mantener ángulos de cámara óptimos durante las sesiones de grabación	Resolución: 720p, Velocidad de fotogramas: 240 fps, Campo de visión: estrecho, Audio: solo viento, Protune: habilitado, Balance de blancos: automático, Color: Plano, Contraventana: Automático, Límite ISO: 6400, Nitidez: alta, Protuna de audio: Medio, Rotación automática: Auto	Lluvia ocasional y nublado	vibraciones, calefacción de cámara, Montaje Comprobaciones de integridad	Sesión inicial: trabajo preliminar para la recopilación incremental de datos
2do	GoPro 8 y 5 en los brazos delanteros y traseros de BTM, el resto del equipo igual que el primero	Igual que la primera sesión. especificaciones	Soleado	calefacción de cámara, impermeabilización, Batería Autonomía en Marco alto Tarifas	La sesión se centró en condiciones de iluminación ideales y soleadas.

Machine Translated by Google

Tabla 1. Cont.

Sesión No.	Equipo	Especificaciones de la cámara	Clima Condiciones	Desafíos	Tecnología. Integración
3er	GoPro 9 y iPhone 13 Pro en estuche rígido con 3D Aplicación de nube de puntos en el brazo frontal de BTM, GPS habilitado en ambos dispositivos. iPhone 13 Pro utilizado con una aplicación especializada para crear datos de nubes de puntos 3D, mejorando la profundidad y la calidad del análisis espacial	GoPro 9: resolución 1080p, 240 fps, Especificaciones mejoradas para condiciones difíciles iPhone 13 Pro: Cámara con capacidad Lidar para captura de datos de nubes de puntos en 3D y GPS para seguimiento de ubicación	Temprano en la mañana oscuridad y lluvia	Asegurar la cámara impermeabilización, mantenimiento Batería Autonomía, Estabilidad del dispositivo en situaciones difíciles Condiciones	Integración de Lidar y GPS para avanzados captura de datos espaciales; utilizó 5G en tiempo real transmisión de datos. Usar Se consideró que la tecnología 5G mejoraría captura y transmisión de datos en tiempo real, lo que garantiza que grandes conjuntos de datos puedan gestionarse de forma eficaz

3.1. Paso 1: recopilación de datos y generación de datos sintéticos

La recopilación incremental de datos comenzó con la primera sesión bajo lluvia ocasional y condiciones nubladas, sentando un precedente para la resiliencia del proceso. Durante la segunda sesión, realizada en un clima soleado, se montaron dos cámaras GoPro en los brazos de la Barrier Transfer Machine (BTM), con desafíos técnicos como vibraciones, sobrecalentamiento de la cámara, la necesidad de impermeabilización y mantenimiento de la duración de la batería a altas velocidades de cuadro. haciéndose evidente. La tercera sesión se llevó a cabo bajo una intensa lluvia, lo que provocó nuevas mejoras en el protocolo y el diseño del sistema. Al mismo tiempo, se consideró que la integración de tecnologías avanzadas como Lidar, GPS y redes 5G aumentaría la solidez y la capacidad de los ciclos de recopilación de datos (Tabla 1).

Las inspecciones manuales preventivas de las barreras móviles de concreto (MCB) antes de cualquier operación BTM para modificación de carril eliminaron la posibilidad de capturar naturalmente las posiciones inseguras requeridas de los pasadores (Figura 5). La medida cautelar es comprensible dado el riesgo sustancial que representan los bloques de concreto potencialmente sueltos durante el proceso de transferencia del MCB, lo que podría comprometer la integridad del BTM y la seguridad de los usuarios de la vía.

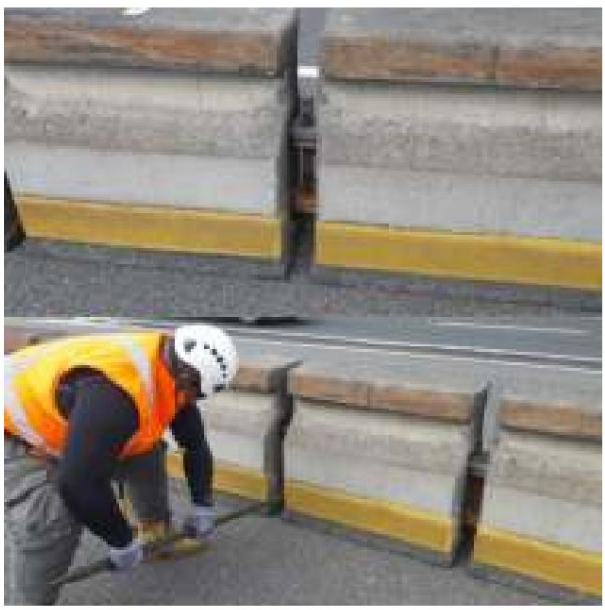


Figura 5. Pin empujado manualmente fuera de su lugar por el personal de la NZTA a petición del autor. el pr ff

Figura 5. Pin empujado manualmente fuera de su lugar por el personal de la NZTA a petición del autor. El proceso fue desafiante y requirió mucha mano de obra, y el miembro del personal necesitaba varios minutos por pin para realizar ajustes. Nota: Esta opción no era viable ya que no representa el entorno natural del ROI donde es necesario resolver problemas del mundo real.

Machine Translated by Google

Tabla 2. Proceso semiautomático para generar un conjunto de datos diverso de posiciones de pines sintéticos (basado en el método de clonación manual ilustrado en la Figura 6).

Algoritmo: Generación de imágenes sintéticas semiautomáticas para la posición del pin
Entrada: Serie de imágenes Pin_OK, imagen de plantilla Pin_OUT
Parámetros:
-Método de normalización de alineación
-Método de segmentación
-Método de cálculo de desplazamiento
-Método de transformación
-Método de reconstrucción de fondo
-Método de refinamiento de bordes
Salida: Conjunto de datos sintéticos con cuadros Pin_Out variados y colocados con precisión 1: Cargar
imágenes 1.1: Cargar
la serie de imágenes Pin_OK 1.2: Cargar la imagen
de plantilla Pin_OUT 2: Normalizar la alineación 2.1:
Normalizar la alineación del pin
en la serie de imágenes Pin_OK a un posición de referencia estándar 3: Procese cada imagen Pin_OK normalizada 3.1: Segmente el pin
usando un método de segmentación basado en regiones
3.2: Calcule el desplazamiento necesario según la plantilla Pin_OUT 3.3: Aplique el
desplazamiento calculado para ajustar la posición del pin y cree una imagen Pin_Out sintética 3.4:
Reconstruir el fondo donde se colocó inicialmente el pin 3.5: Refinar los bordes del pin movido para garantizar una integración perfecta 3.6:
Validar visualmente la calidad de la imagen sintética 3.7: Si la calidad es aceptable,
agregar la imagen sintética al conjunto de datos 3.8: Si se necesitan ajustes, refine los
parámetros y repita el proceso 4: Repita para todas las imágenes 4.1:
Continúe el proceso para todas las imágenes Pin_OK de la serie para crear un conjunto de
datos completo con posiciones Pin_Out variadas

Ante la escasez de posiciones inseguras de los pines, se introdujo un novedoso método de creación de datos sintéticos que implica la clonación de fondo a partir de fotogramas de vídeo originales (Figura 6). La clonación permite generar representaciones variadas de la clase minoritaria, abordando así la distribución sesgada de los datos. Los intentos iniciales produjeron marcos imperfectos con bordes irregulares, pero el proceso se perfeccionó mediante un refinamiento iterativo, lo que dio como resultado marcos sintéticos de alta fidelidad que reforzaron significativamente el conjunto de datos. La adición de marcos sintéticos facilitó el ajuste de la precisión y la recuperación del modelo, lo cual es crucial para la eficacia de los sistemas de inspección automatizados y garantiza una mayor sensibilidad hacia los falsos negativos, una prioridad para los sistemas de seguridad del tráfico. El enfoque de clonación resultó fundamental para sortear las limitaciones impuestas por los métodos manuales de recopilación de datos, allanando el camino para un medio más seguro y eficiente de entrenar modelos de detección robustos.

Como se muestra en la Figura 6, la creación de fotogramas sintéticos utilizando un editor de imágenes lleva al menos 20 minutos por fotograma, lo que destaca la necesidad de una solución más eficiente y automatizada (Tabla 2). El proceso comienza cargando una serie de imágenes donde el pin está en una posición segura (Pin_OK) y una imagen de plantilla donde el pin está en una posición insegura (Pin_OUT). El método implica varios pasos clave: normalizar la alineación de los pines en cada imagen Pin_OK a una posición de referencia estándar, segmentar los pines usando un método de segmentación basado en regiones y calcular el desplazamiento necesario para replicar la plantilla Pin_OUT.

Machine Translated by Google

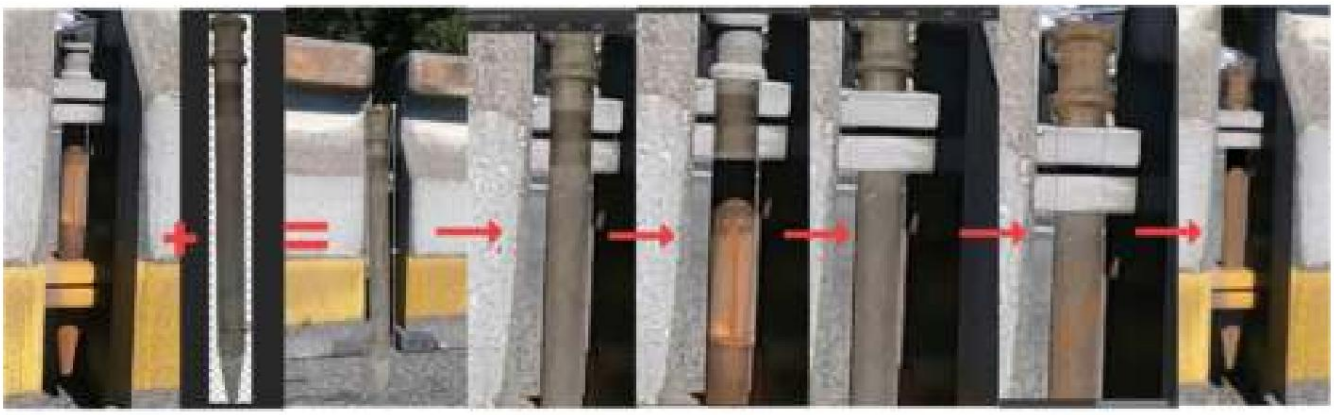


Figura 6. Generación de datos sintéticos: la imagen ilustra las diversas etapas de manipulación de un cuadro de video para crear imágenes sintéticas que representan un alfiler de metal en posiciones inseguras. Comenzando con una imagen independiente del pasador de metal, el proceso implica ajustar su orientación, posición y contexto ambiental para generar escenarios realistas e inseguros.

3.2. Paso 2: aumento de datos

El aumento de datos era necesario para trabajar con conjuntos de datos escasos y desequilibrados. También consideramos enfoques comúnmente utilizados para mejorar la solidez del entrenamiento de las redes neuronales generando datos de entrenamiento adicionales a partir de conjuntos de datos existentes y ayudando a prevenir el sobreajuste [60]. Las técnicas de aumento aplicadas incluyeron transformaciones geométricas y afines donde se utilizaron rotación, cambio de tamaño, reflexión, traslación y corte para modificar la estructura de la imagen sin alterar su contenido [37] (Figura 7). Las transformaciones se implementaron utilizando Image Processing Toolbox de MATLAB, lo que facilitó la aplicación eficiente de dichas técnicas. Además, esta investigación incorporó métodos para introducir variaciones realistas en el conjunto de datos agregando fluido y efectos de desenfoque, específicamente utilizando patrones de ruido gaussiano y de sal y pimienta. Estos efectos se aplican utilizando la función imnoise de MATLAB para agregar ruido y imgaussfilt para desenfoque gaussiano. Dichas modificaciones simularon posibles imperfecciones en los datos del mundo real, lo que ayudó a la red a aprender a manejar tales irregularidades de manera efectiva.

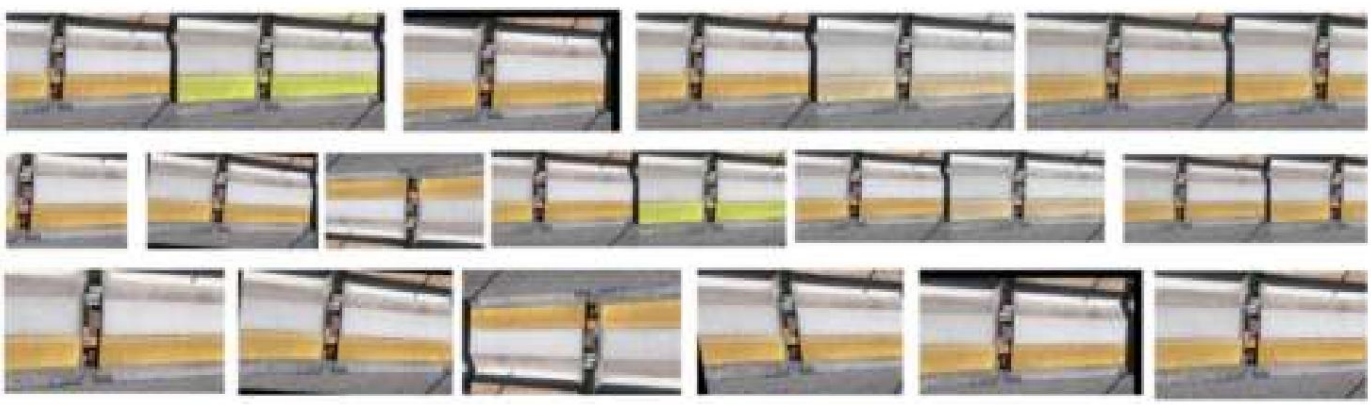


Figura 7. Los resultados ilustrativos de las técnicas de aumento de datos muestran la variedad de transformaciones de imágenes aplicadas para mejorar el entrenamiento del modelo. Incluye transformaciones geométricas como rotación y escalado , transformaciones afines con varias traslaciones y cortes, y efectos visuales como desenfoque gaussiano, adición de ruido y ajustes de color sofisticados. Las modificaciones son fundamentales para preparar la red neuronal para manejar escenarios diversos y realistas encontrados en aplicaciones prácticas, Xu, Yoon [61].

Otras innovaciones incluyen la adopción de técnicas avanzadas de transformación del color . Utilizando la función jitterColorHSV de MATLAB, las imágenes se sometieron a ajustes aleatorios.

Machine Translated by Google

cambios en brillo, contraste, tono y saturación, ampliando la gama de datos visuales
a las que estuvo expuesto el modelo durante el entrenamiento. Además, una novedosa transformación de color.
Se permite un enfoque que combina métodos de búsqueda de tablas e interpolación de espacios de color 3D.
para procesamiento de color de alta calidad en tiempo real.

El enfoque integral para el aumento de datos diversifica el conjunto de entrenamiento, mejorando las capacidades de generalización del modelo, que son importantes para aplicaciones similares.
incluyendo contextos de ciudades inteligentes y la aplicación de tecnología para mejorar la usabilidad de
espacios donde pueda ocurrir actividad humana.

3.3. Paso 3: Análisis de la distribución de datos después del impulso de las minorías

Los marcos sintéticos equilibraron el conjunto de datos, mejorando la precisión de la clasificación de manera relativamente pequeño conjunto de datos etiquetado manualmente (Figura 8). Este enfoque fue ventajoso bajo
condiciones restrictivas que restringen la recopilación de datos de clases minoritarias. Además, los datos sintéticos
facilitó el ajuste de las métricas de rendimiento del modelo, como precisión y recuperación, centrándose
en minimizar los falsos negativos debido a su importancia para la seguridad.

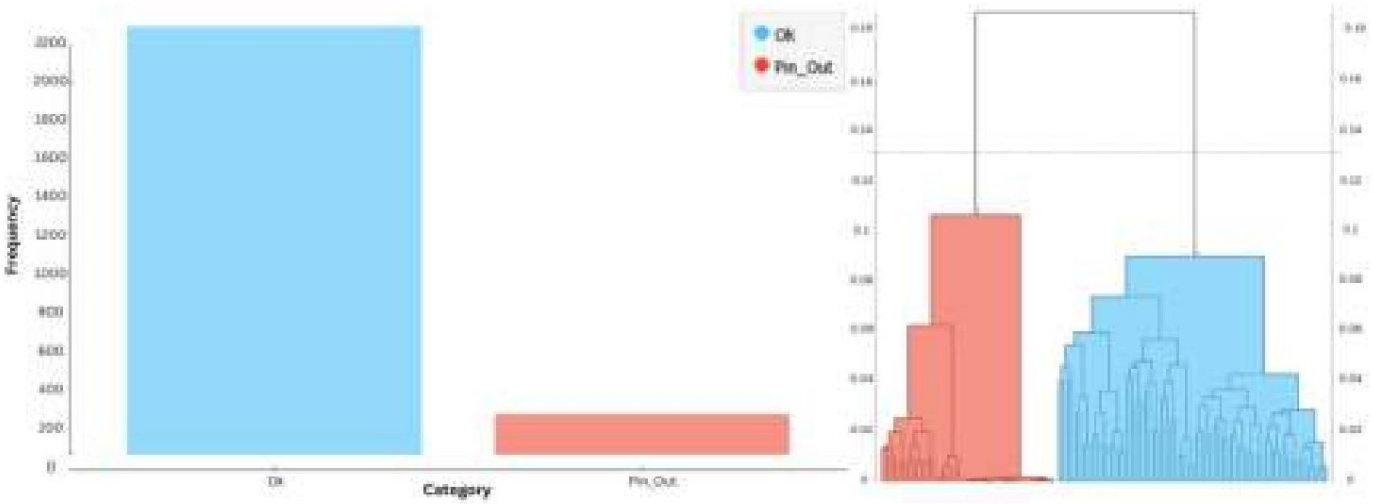


Figura 8. El gráfico de dendrograma, derivado de los datos mostrados por el gráfico de barras, muestra dos clusters (Pin_OK (rojo) y Pin_Out (azul)) y una separación visual de los multidimensionales generados.
espacio de características.

De aproximadamente 30.000 fotogramas, se obtuvieron 2.300 imágenes que mostraban posiciones seguras de los pines.
curado. Para abordar el desafío de las ocurrencias limitadas de condiciones inseguras en los pasadores, se
problema común en el entrenamiento de sistemas de detección robustos: 210 imágenes sintéticas que simulan
Se generaron posiciones de pines inseguras y se agregaron al conjunto de datos (Tabla 3).

Tabla 3. Distribución de datos: descripción general del número de imágenes Pin_OK y Pin_Out utilizadas para el entrenamiento y validación en diferentes sesiones de grabación de vídeo.

Vídeo de entrenamiento Sesión No. (Tabla 1)	Datos de entrenamiento		Datos de validación	
	Pin_OK Imágenes	Pin_Out Imágenes	Pin_OK Imágenes	Pin_Out Imágenes
1	155	32	40	5
2	725	80	180	20
2	800	40	200	10
3	400	decidió	100	5

Machine Translated by Google

La creación de distintos grados de posiciones 'Pin_Out' ayudó a optimizar el equilibrio entre falsos positivos y negativos, lo cual es crucial para perfeccionar la precisión y solidez del modelo (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados de clasificación inicial obtenidos a partir de grupos de datos de la Figura 8. Adoptado de Ba˘ ci´c, Rathée [7].

Tabla de confusión				
Modelo			Actual	
			PIN_OK	PIN_OUT
Regresión logística	PAG r mi d i C t mi d	PIN_OK	[98,5%	1,5%
		PIN_OUT	0	100%]
Red neuronal		PIN_OK	[98,9%	1,1%
		PIN_OUT	0	100%]
SVM		PIN_OK	[98,1%	1,9%
		PIN_OUT	0	100%]

Los marcos sintéticos que varían en las posiciones de Pin_Out mejoraron la sintonización de falsos positivos. (FP) y proporciones de falsos negativos (FN). El objetivo es lograr FP > FN utilizando un conjunto de datos con posiciones límite de pines inseguras, lo que mejora la precisión de la clasificación. Se midió la precisión usando la siguiente fórmula:

$$\text{Precisión} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (8)$$

TP representa los verdaderos positivos o cuadros Pin_Out correctamente identificados, y TN representa los verdaderos negativos o cuadros Pin_OK correctamente identificados. Precisión, la relación de observaciones positivas pronosticadas correctamente al total de positivas pronosticadas, se define como sigue:

$$\text{Precisión} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (9)$$

El enfoque integral implicó una meticulosa validación cruzada estratificada triple. proceso, como se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de la prueba de validación cruzada y de la puntuación actualizados a partir de la investigación inicial.

Validación cruzada estratificada triple		
Modelo	Precisión	Recordar
Parámetros de regresión logística: Regularización: Cresta (L2), C = 1	0,995	0,995
Perceptrón multicapa (MLP)- Parámetros: Capas ocultas: 2 Neuronas: Función de activación: ReLu Solucionador: Adán Alfa: 0,02 Máx. iteraciones: 200 Algoritmo de retropropagación	0,995	0,995
Parámetros de la máquina de vectores de soporte (SVM): C = 1,0, ε = 0,1 Núcleo: lineal Tolerancia numérica: 0,001 Máx. iteración: 100	0.985	0.984

Machine Translated by Google

3.4. Paso 4: Detección de la región de interés (ROI)

Nuestro equipo de investigación investigó exhaustivamente varias metodologías de detección de regiones de interés (ROI) en el desarrollo de un sistema automatizado de detección de pines para aplicaciones de gestión de tráfico. Cada método fue examinado por su capacidad para identificar con precisión las ubicaciones de los pines dentro de los fotogramas de vídeo en diversas condiciones ambientales. La exploración de diferentes metodologías iluminó los desafíos y el potencial de cada enfoque, lo que culminó en que encontráramos una solución particularmente efectiva. Inicialmente, nuestra exploración utilizó métodos de propuesta de región, que calculan cuadros delimitadores alrededor de posibles retornos Si bien inicialmente fue prometedor, el enfoque requirió ajustes manuales frecuentes para garantizar la precisión en la detección y el conteo, lo que lo hizo menos factible para aplicaciones dinámicas del mundo real donde la automatización es primordial. Se empleó un modelo de mezcla gaussiana (GMM) para el modelado de fondo adaptativo (Figura 9B). El GMM era experto en segmentar pines móviles de fondos estáticos modelando la distribución de densidad de probabilidad de las intensidades de píxeles. A pesar de su eficacia en la diferenciación de primer plano, el GMM requirió un posprocesamiento extenso para localizar cada pin con precisión, lo que limita su utilidad independiente en la detección precisa de ROI. También exploramos la segmentación basada en el color utilizando la agrupación K-Means dentro de los espacios de color RGB, LAB y HSV, el último de los cuales se ve particularmente favorecido debido a su resistencia a las variaciones en la iluminación (Figura 9A). El método explotó las firmas de color únicas de los pines, pero enfrentó limitaciones en la especificidad, capturando a menudo objetos no relacionados que compartían perfiles de color similares.

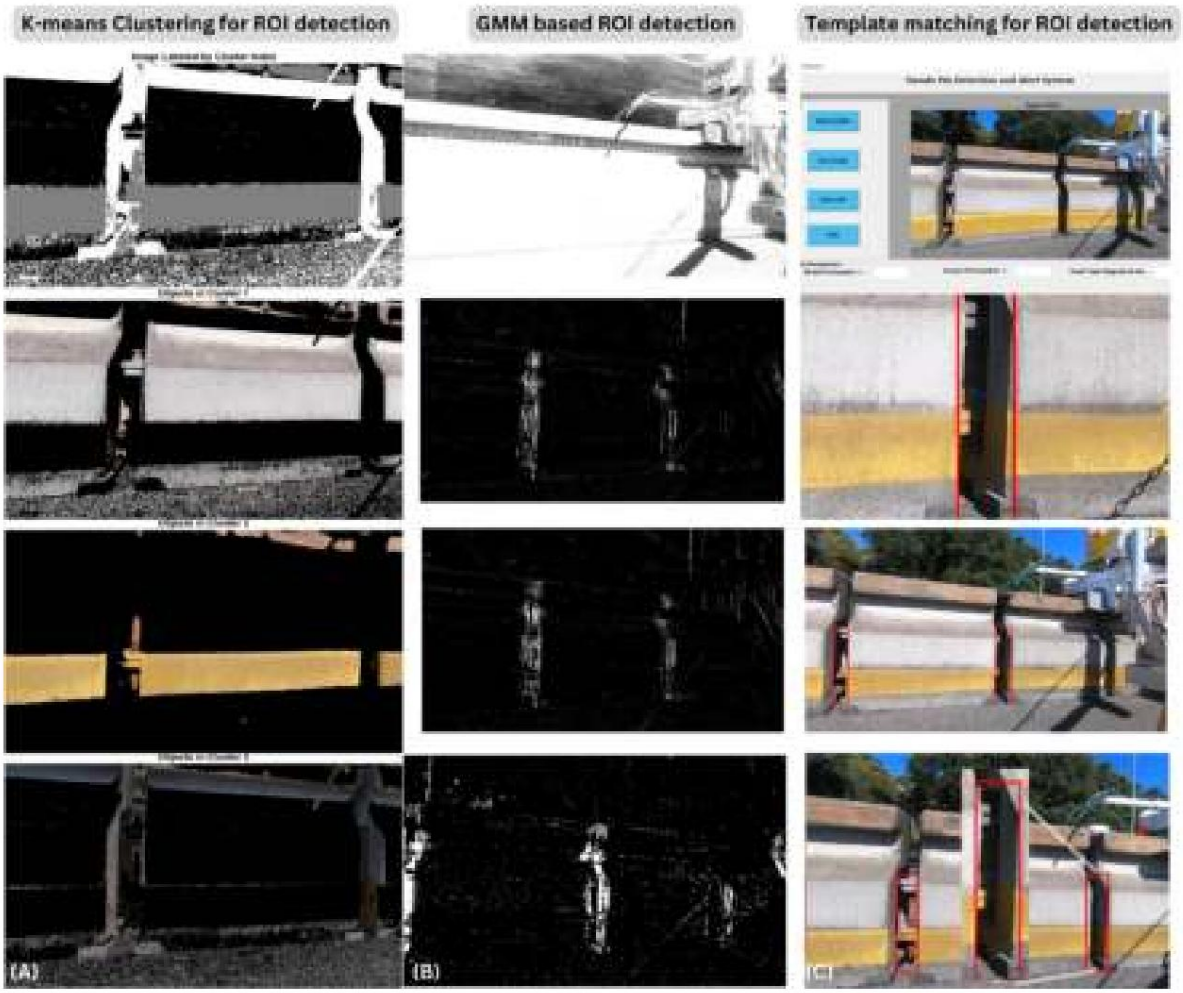


Figura 9. Análisis comparativo de técnicas prometedoras de detección de ROI en la detección automatizada de pines: (1) segmentación basada en colores utilizando agrupamiento K-Means en el espacio de color HSV, destacando el

Machine Translated by Google

firmas de color de pines y al mismo tiempo aborda desafíos en especificidad. (2) La detección basada en el modelo de mezcla gaussiana (GMM) ilustra la segmentación de primer plano y fondo y el seguimiento del movimiento de los pasadores entre bloques de concreto. (3) Aplicación Regionprops, que muestra la coincidencia de plantillas y la detección automatizada de cuadros delimitadores para una localización precisa y una intervención manual reducida en la detección y el etiquetado del ROI de los pines.

Los métodos probados en la Figura 9 nos llevaron a adoptar la función regionprops de MATLAB , que demostró ser superior para abordar los desafíos de automatización y precisión de los métodos anteriores. Regionprops analiza cada componente conectado en cuadros de video binarios, cuantificando efectivamente el área y las coordenadas del cuadro delimitador para cada ROI detectado. La función mejoró la precisión de la detección de pines y facilitó una reducción significativa en la intervención manual al automatizar el proceso de detección de ROI.

Los conceptos matemáticos subyacentes de la función regionprops son parte integral de su desempeño (Ecuaciones (8) a (13)).

Área: el área de una región se calcula como el número de píxeles que contiene.

$$\text{Área} = \sum(i,j) \quad R\ 1 \tag{10}$$

En esta ecuación, el área representa el número total de píxeles en la región R. Cada píxel dentro de la región aporta un valor de 1 al área total, contando efectivamente los píxeles.

Centroide: el centroide se determina promediando las posiciones de todos los píxeles de la región, de la siguiente manera:

$$\text{Centroidex} = \frac{1}{\text{norte}} \sum(i,j) \quad R\ i, \text{ Centroidía} = \frac{1}{\text{norte}} \sum(i,j) \quad R\ j \tag{11}$$

Cuadro delimitador: El cuadro delimitador, que encierra la región, está definido por las coordenadas xey mínima y máxima de los píxeles.

$$\text{Caja delimitadora} = [\text{xmin}, \text{ymin}, \text{xmax} - \text{xmin} + 1, \text{ymax} - \text{ymin} + 1] \tag{12}$$

Longitud de los ejes mayor y menor: para regiones aproximadas por elipses, las longitudes de los ejes mayor y menor se derivan de los valores propios de la matriz de covarianza del píxel. coordenadas.

$$\text{Longitud del eje mayor} = 2 \quad \frac{\overline{\lambda 1}}{\text{norte}}, \text{ Longitud del eje menor} = 2 \quad \frac{\overline{\lambda 2}}{\text{norte}} \tag{13}$$

Orientación: la orientación de dicha elipse, que indica el ángulo entre el eje x y el eje mayor, se calcula utilizando los segundos momentos de la región.

$$\text{Orientación} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\mu\ 11}{\mu 20 - \mu 02} \right) \tag{14}$$

Perímetro: el perímetro se mide sumando las distancias entre píxeles de límite consecutivos.

$$\text{Perímetro} = \sum \text{boundrypixels distancia entre píxeles de límite consecutivos} \tag{15}$$

La integración de regionprops en nuestro método avanza significativamente en la automatización de la detección de pines. La mejora ofrece alta precisión y eficiencia, que son fundamentales para los sistemas de gestión del tráfico que requieren confiabilidad y procesamiento rápido.

Nuestra implementación exitosa enfatiza la importancia de un enfoque metódico en la investigación de ingeniería, demostrando cómo las pruebas iterativas y la integración de varias técnicas pueden abordar problemas complejos del mundo real. Este estudio destaca la eficacia de combinar métodos tradicionales de procesamiento de imágenes con herramientas analíticas avanzadas y establece un nuevo estándar para futuras investigaciones en sistemas automatizados de gestión y seguridad

Machine Translated by Google

Los hallazgos proporcionan un marco sólido para que investigadores y profesionales mejoren sistemas de detección automatizados en todos los dominios de ingeniería.

3.5. Paso 5: Capacitación y validación del modelo

El sistema informático (Tabla 6) proporcionó suficientes capacidades de hardware para entrenar al modelo en el núcleo del sistema desarrollado 'Sistema de alerta y detección de pines inseguros'.

Tabla 6. Un sistema de desarrollo que utiliza la arquitectura de procesamiento paralelo de GPU NVIDIA.

Configuración del sistema	
Procesador	Procesador Intel Core i7
Memoria	32 GB de RAM
Disco duro	Unidad de estado sólido de 512 GB
Gráficos	NVIDIA GeForce RTX2070 Super 8 GB GFX
Sistema operativo	ventanas 10

ResNet-50, mejorado con convoluciones 3D dentro del marco STENet, fue seleccionado después de una extensa comparación con otros modelos como Squeezenet, GoogLeNet, InceptionV3 y Mobilenetv2. ResNet-50 se ve favorecido debido a su equilibrio óptimo entre eficiencia y rendimiento computacional, confirmados por evaluaciones satisfactorias de RAM de GPU durante los experimentos iniciales (Tabla 7).

Tabla 7. Comparación de redes neuronales profundas previamente entrenadas según la resolución de la imagen de entrada, número de parámetros, profundidad y tamaño del modelo.

Redes neuronales profundas previamente entrenadas				
Modelo	Imagen de entrada Resolución	Parámetros (1.000.000)	Profundidad	Tamaño
alexnet	227 ×227	61		227
ApretarNet	227 ×227	1,24	8	4.6
GoogleNet	224 ×224	7	18 22	27
Inicio v3	299 ×299	23,9	23,9	48
MobileNet v2	224 ×224	3,5	3,6	53
Renet 50	224 ×224	25.6	50	96

Varios elementos ambientales, como el follaje de color óxido, coincidían estrechamente con el apariencia de pasadores de metal oxidados, lo que dificulta la diferenciación visual. Similarmente, Los pasadores de metal no oxidados compartían el mismo color que la superficie de la carretera y los neumáticos de los vehículos que pasaban. vehículos, lo que complica aún más el proceso de identificación. Las barreras metálicas del fondo a menudo tenían formas que se asemejaban al perfil horizontal de los pasadores metálicos, mientras que las Los colores dinámicos de los vehículos que pasaban introdujeron intensas variaciones de fondo. Además Para etiquetar los estados de los pines, se definieron regiones de interés (ROI) en cada imagen utilizando el método regionprops para distinguir entre características relevantes y antecedentes potenciales ruido. Este método, que analiza cada componente conectado en fotogramas de vídeo binarios. para cuantificar el área y las coordenadas del cuadro delimitador para cada ROI detectado, significativamente mejoró la precisión de la detección de pines y redujo la intervención manual. El combinado La consideración de la homogeneidad de la forma y el color fue un factor importante en el entrenamiento del AHB. modelo de detección de pines (Figura 10).

Además, ciertas partes del sistema de barrera de hormigón móvil (MCB) están estrechamente se parecía a la forma de los pasadores de metal, creando mayor confusión (Figura 11(3)). Estos factores dificultaron la tarea de detección, ya que el sistema tenía que diferenciar entre múltiples elementos visualmente similares en diferentes condiciones. El conjunto de datos luego se sometió una serie de procesos de aumento de imágenes para simular diversas condiciones operativas no cubierto por la captura de video inicial. Los procesos incluyeron transformaciones geométricas.

Machine Translated by Google

como rotaciones, escalado, traslaciones y adición de perturbaciones de la imagen como desenfoque y ruido gaussianos, que son cruciales para que los modelos de entrenamiento funcionen bien en condiciones de implementación prácticas.

Figura 10. Ilustración de los desafíos de fondo en la detección de ROI.

Figura 11. Los ejemplos de detección de pines combinados con detección de falsos positivos (3) ilustran un alto nivel de ruido de fondo que parece similar a las características del ROI.

Un componente crítico del proceso de capacitación fue el ajuste de la tasa de aprendizaje, parámetro que impacta significativamente la convergencia y el desempeño final del modelo.

Machine Translated by Google

Se probaron tasas de aprendizaje que oscilaron entre 0,01 y 0,00001 utilizando ResNet-50 (Figura 12). La tasa óptima se determinó mediante una serie de pruebas que evaluaron la precisión del modelo y las métricas de pérdida. Los experimentos utilizaron curvas ROC para representar visualmente las compensaciones entre tasas de verdaderos positivos y falsos positivos en varias configuraciones de umbral, lo que permitió una selección informada del modelo de mejor rendimiento en las condiciones de entrenamiento dadas. Los resultados mostraron consistentemente que una tasa de aprendizaje de 0,0001 proporcionaba el mejor equilibrio entre la velocidad de entrenamiento y la precisión del modelo.

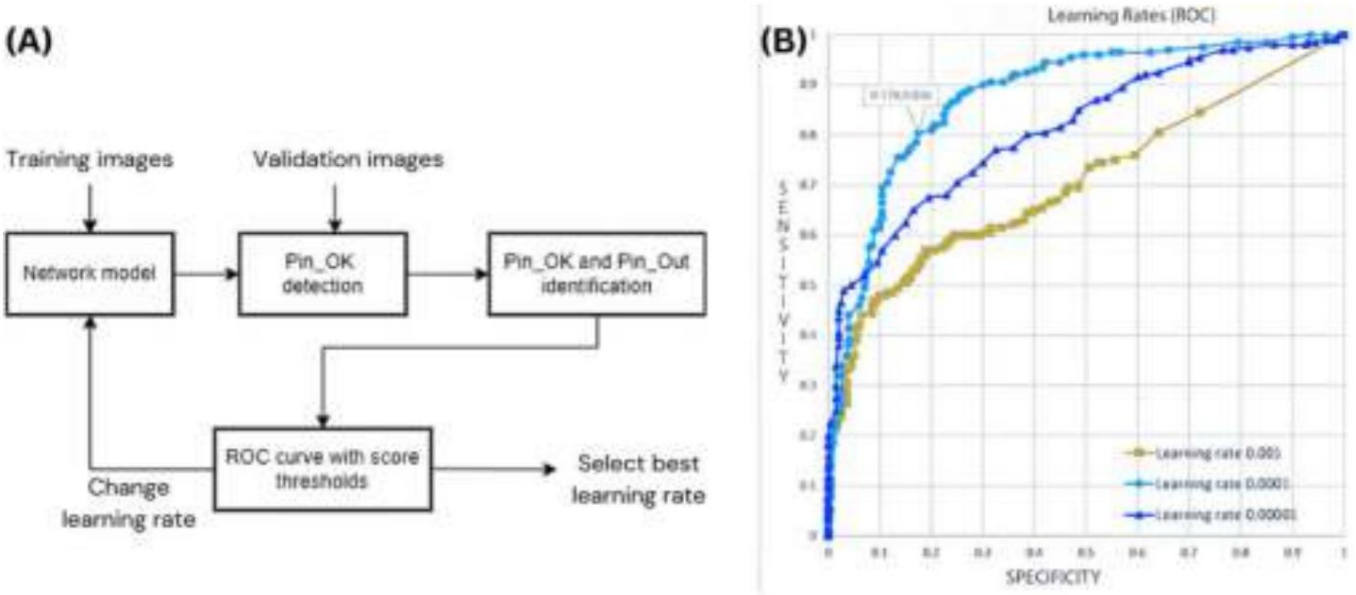


Figura 12. El proceso de capacitación para encontrar el mejor modelo de red según la tasa de aprendizaje: (A) flujo del proceso de capacitación ff y (B) curvas ROC para diferentes tasas de aprendizaje que muestran el rendimiento de las tasas de aprendizaje. Se eligió la tasa de aprendizaje de 0,0001 porque equilibra la velocidad y la precisión del entrenamiento, proporcionando un mejor rendimiento y evitando el alto costo y tiempo computacional.

En conclusión, esta investigación detalló la selección, preparación y entrenamiento de un modelo de aprendizaje profundo capaz de detectar y clasificar estados de pasadores metálicos en barreras móviles de concreto. El enfoque metodológico, que enfatiza la creación de un conjunto de datos de capacitación integral y diverso a través de imágenes reales y sintéticas y protocolos de capacitación modelo rigurosos, demuestra una solución escalable y eficiente para mejorar la seguridad de la infraestructura pública a través de técnicas avanzadas de IA.

3.6. Paso 6: Análisis y prueba del modelo

La arquitectura STENet, inspirada y construida sobre el robusto marco de ResNet-50, exhibe un potencial considerable para tareas de detección de anomalías espaciotemporales, como las necesarias para monitorear el Puente del Puerto de Auckland (AHB). Si bien ResNet-50 se desarrolló inicialmente para la clasificación de imágenes, sus sólidas capacidades de extracción de características espaciales lo convierten en una base sólida para futuras mejoras en el análisis de videos y datos de transmisión en vivo.

STENet integra componentes de ResNet-50 con convoluciones 3D para capturar información espacial y temporal, facilitando el análisis directo de movimiento y cambios dinámicos dentro de secuencias de video. Otras mejoras implican aprovechar las capacidades de extracción de características espaciales de ResNet-50 y las redes neuronales recurrentes (RNN) para rastrear secuencias temporales o emplear métodos de agrupación temporal para resumir segmentos de video de manera eficiente.

Al adoptar estrategias para la simplificación de modelos, la informática de punta y el aprendizaje incremental, STENet mejora la eficiencia del sistema y la capacidad de respuesta a nuevas anomalías. Esto hace que STENet sea particularmente adecuado para aplicaciones de vigilancia continua y monitoreo de tráfico . La Tabla 8 destaca las métricas de desempeño de STENet en comparación con otros modelo
Al incorporar adaptaciones de las características principales de ResNet-50, STENet reconoce efectivamente

Machine Translated by Google

desviaciones de apariencia y patrones de comportamiento a lo largo del tiempo, proporcionando un marco sólido para la detección de anomalías en tiempo real en diversos entornos operativos (Figura 13).

Tabla 8. La red espacial-temporal mejorada (STENet) logra una precisión excepcional del 95,2 % puntuación y una puntuación F1 del 94,8%, lo que muestra su capacidad excepcional para navegar a través de los desafíos del ruido de fondo y pequeños retornos de la inversión, con un notable ROC-AUC del 98,5%, solidificando su Robustez en la diferenciación de clases en tareas espacio-temporales.

Modelo	Exactitud	Precisión	Recordar	Puntuación F1	ROC-AUC	Capacitación Tiempo	Inferencia Tiempo	Número de Parámetros
STENet	95,2%	94,5%	95,2%	94,8%	98,5%	4 horas	80 ms	25 millones
VGG-19	88,0%	88,5%	89,0%	88,7%	94,0%	6,5 horas	90 ms	142 millones
ResNet-50	90,0%	90,3%	91,0%	90,6%	95,8%	4 horas	70 ms	25,6 millones
InicioV3	91,0%	91,2%	91,5%	91,3%	96,0%	3,5 horas	65 ms	23,8 millones
ApretarNet	85,0%	85,5%	86,0%	85,7%	92,0%	2,5 horas	35 ms	1,25M

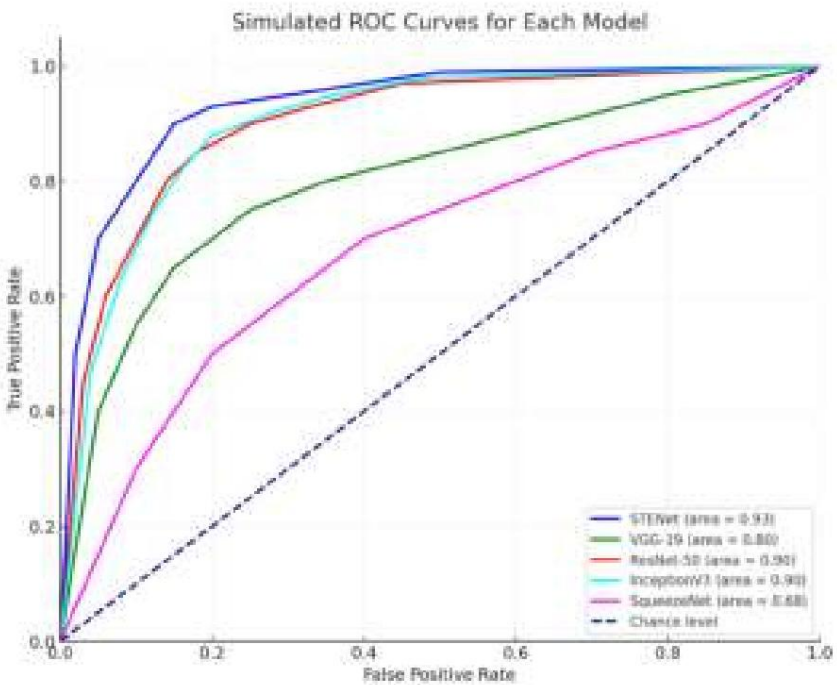


Figura 13. Comparación de curvas ROC de la Tabla 8.

4. Resultados y discusión

La eficacia del sistema de alerta y detección de pin, que abarca tanto la región de pin Se evaluó críticamente la detección y el seguimiento de los puntos de interés (ROI), junto con la detección del estado del PIN y las funciones de alerta . Las evaluaciones se basaron en métodos previamente detallados, con especial atención a las condiciones operativas que influyen en el rendimiento del sistema.

4.1. Preparativos, protocolo de registro de datos, hallazgos y conocimientos

El rendimiento del sistema se evaluó examinando vídeos grabados cuadro por marco, centrándose en el seguimiento del ROI del pin. Varios factores ambientales y operativos fueron identificados que podrían afectar negativamente los resultados.

- Condiciones de iluminación: Las condiciones nubladas obstaculizaron significativamente la visibilidad, lo que dificultó la detección de pines entre bloques de concreto y dificultó la detección y Los procesos de conteo no son confiables.

Machine Translated by Google

• Movimientos de fondo: los vehículos en movimiento introdujeron un ruido significativo en el fondo , lo que dificultó gravemente la precisión de la detección. Si bien el tono grisáceo de la carretera y los bloques de hormigón ayudaron a simplificar el fondo, los grandes vehículos que pasaban interrumpieron la claridad visual. Además, los colores óxido y el amarillo de las barreras móviles de hormigón (MCB) y los fragmentos de barreras de hormigón rotas y barreras metálicas a menudo se mezclaban con las regiones de interés (ROI) de los pines, lo que disminuía aún más la precisión del seguimiento. • Sombras e iluminación: las sombras proyectadas en las regiones de interés de los pines a veces se malinterpretaban como objetos en movimiento. Las sombras más oscuras podrían comprometer los sistemas de detección y seguimiento, especialmente bajo la luz del sol.
• Distorsiones vibratorias: las velocidades operativas superiores a 6 km/h inducían una vibración excesiva, lo que desenfocaba las imágenes e introducía ruido de fondo, lo que complicaba aún más los procesos de detección.

Para mitigar las variabilidades relacionadas con el clima, se analizaron múltiples videos grabados en condiciones soleadas. El primer video, que captura un campo más amplio desde el brazo frontal de la Barrier Transfer Machine (BTM), mostró aproximadamente dos ROI por cuadro, tomado durante una tarde despejada. El segundo video, tomado desde el brazo trasero del BTM, mostró un campo de visión más estrecho con, a veces, solo una visibilidad parcial de un ROI de un solo pin.

4.2. Crear marcos sintéticos

El concepto de crear marcos sintéticos encontró importantes desafíos. Las técnicas de clonación iniciales fueron insuficientes y dieron como resultado un conjunto de datos minoritario no viable, lo que requirió un cambio de técnicas de clasificación a enfoques matemáticos tradicionales.
Consultas posteriores con expertos gráficos llevaron a la adopción de métodos avanzados que utilizan Photoshop y Gimp para generar marcos sintéticos (Figura 14).

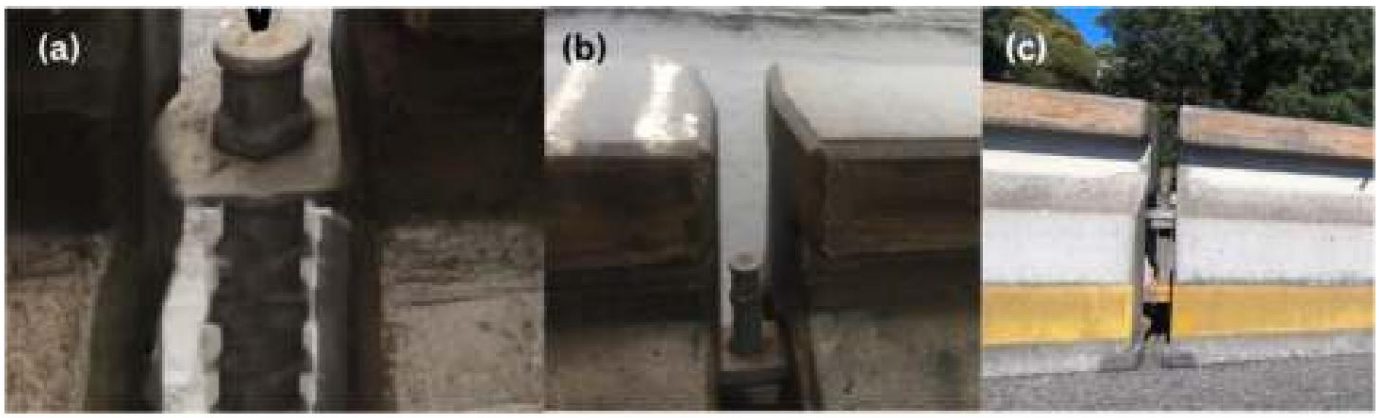


Figura 14. Proceso de clonación para crear marcos sintéticos que representan la posición 'PIN OUT'. (a) Intentos fallidos hasta el éxito (b,c); dos ángulos distintos: (b) cámara montada en el brazo posterior de la Bar-rier Transfer Machine (BTM) y (c) cámara montada en el brazo frontal de la BTM para mejorar la precisión del modelado.

Se crearon aproximadamente 40 fotogramas sintéticos a partir de imágenes de vídeo capturadas con un teléfono móvil durante la fase de prueba de concepto. Posteriormente se produjo un segundo lote de más de 200 fotogramas sintéticos a partir de grabaciones de vídeo de mayor calidad, lo que demuestra una mejora notable en la claridad de los fotogramas entre las producciones iniciales y posteriores. Dada la laboriosa naturaleza de la creación manual de marcos, se hicieron esfuerzos para automatizar el proceso utilizando el panel de acciones de Photoshop. Sin embargo, la complejidad de los elementos de fondo impidió la automatización total. Si bien MATLAB ofrece técnicas de clonación de píxeles, se requiere más investigación para desarrollar un método robusto y totalmente automatizado para la generación de cuadros sintéticos. El análisis subraya las dependencias críticas de las condiciones ambientales en el rendimiento de los sistemas de detección de pines y destaca la necesidad continua de

Machine Translated by Google

Mejoras técnicas en la generación de datos sintéticos para respaldar la capacitación y validación de sistemas sólidos.

4.3. Prototipo del sistema: funcionalidad de seguimiento, conteo y alerta de pines El

desarrollo del sistema de alerta y detección de pines metálicos se guió por el requisito de que el usuario final, que se presume no tiene conocimientos técnicos, tenga una interfaz simplificada para una operación eficiente del sistema. El prototipo del sistema, denominado ' Sistema de alerta y detección de pines inseguros (Figura 15), se diseñó e implementó utilizando MATLAB App Designer [62], integrando operaciones de back-end con una interfaz gráfica de usuario (GUI).

Figura 15. Interfaz gráfica de usuario para el 'Sistema de alerta y detección de pines inseguros'.

Funcionalidades del sistema

La aplicación permite al usuario final cargar un vídeo o una secuencia de fotogramas para su análisis. Tras la carga, la aplicación aprovecha una red de detección de estado de pin basada en aprendizaje profundo para analizar la transmisión de video. El sistema mantiene un recuento de pines metálicos y, si detecta un pin en una posición insegura, activa una alerta y muestra el ROI del pin metálico específico en la pantalla.
La segunda funcionalidad admite el análisis de transmisión en vivo, donde el usuario puede conectar la aplicación a una cámara en vivo. La red de detección de pines se activa para analizar los fotogramas entrantes en tiempo real a medida que la transmisión en vivo se transmite a la aplicación de monitoreo del sistema de alerta y detección de pines inseguros (Figura 15). Al igual que el análisis pregrabado, el sistema rastrea y cuenta las ROI de los pines metálicos, alerta al usuario y muestra el número de ROI cuando se detecta un pin inseguro.
La interfaz del sistema de alerta y detección de pines metálicos, como se muestra en la Figura 15, está diseñada para ser intuitiva y fácilmente navegable, lo que garantiza que los usuarios puedan operar el sistema sin conocimientos técnicos previos. El diseño y la lógica operativa de la aplicación se diseñaron específicamente para satisfacer las necesidades de NZTA, lo que permitió modificaciones personalizadas para adaptarse a requisitos operativos o actualizaciones específicos.

En conclusión, en teoría, la App del sistema de alertas está lista para ser implementada. Existe potencial para un mayor desarrollo hacia una implementación completa del producto, pendiente de interés y apoyo adicional de la NZTA. El trabajo futuro se centrará en perfeccionar la funcionalidad de la aplicación , mejorar su rendimiento y garantizar su instalación in situ y su integración en los sistemas de infraestructura existentes. Sin embargo, dichas mejoras dependen de la disponibilidad de más recursos y del interés continuo de las partes interesadas.

Machine Translated by Google

4.4. Resultados

La evaluación del desempeño del modelo STENet tuvo como objetivo efectivamente encontrar y localizar el estado de Pin_Out utilizando las especificaciones de la estación de trabajo descritas anteriormente en la Tabla 6. Aplicamos los modelos al seguimiento cuadro por cuadro de la región de interés (ROI) del pin y al conteo en tiempo real, asignando a cada pin ROI un índice para mantener continuidad entre cuadros. Las configuraciones del modelo de detector se resumen en la Tabla 9, que detalla parámetros como el tamaño del lote, el número de épocas, la tasa de aprendizaje y el optimizador opciones. Se utilizaron dos técnicas de optimización, Descenso de gradiente estocástico con Momentum (SGDM) y Adam, ambos elegidos por su capacidad para mejorar el rendimiento del modelo. a través de una búsqueda de dirección eficiente en el panorama de optimización [63,64].

Tabla 9. Configuración del modelo de detector. La tabla enumera el tamaño del lote, el número de épocas y el aprendizaje. tasa y optimizador utilizado para entrenar el modelo de detector. Dos técnicas de optimización diferentes, Descenso de gradiente estocástico con impulso (SGDM) y estimación de momento adaptativo (Adam), Se emplearon para mejorar el rendimiento del modelo.

Modelo	Tamaño del lote	Época	Tasa de aprendizaje	Optimizador
Detector	64	100	0,0001	Sgdm
	64	100	0,0001	Adán

Se evaluó la precisión del seguimiento del ROI del pin comparando la coherencia del índice. asignación de cuadro a cuadro. Las discrepancias en la continuidad del índice se observaron como errores en seguimiento. El conjunto de datos se dividió en un 70 % de marcos de entrenamiento, un 10 % de validación y un 20 % de pruebas. marcos para evaluar el modelo de manera sólida en diversas condiciones. El proceso de formación utilizando SGDM logró tiempos de entrenamiento más rápidos que Adam, como se muestra en la Tabla 10. La validación de los modelos demostraron menores errores cuadráticos medios (RMSE) y pérdidas de validación con SGDM, lo que indica una ruta de optimización más eficiente.

Tabla 10. Proceso de formación y validación del SGDM.

Época	Iteración	Tiempo Transcurrido	Mini lote (RMSE)	Validación (RMSE)	minilote Pérdida	Validación
10	150	00.15.05	0,91	0,87	0.8285	0.7910
20	300	00.30.20	0,74	0,83	0.5384	0.6761
30	450	00.45.12	0,66	0,78	0.4141	0.6329
40	600	01.00.15	0,62	0,76	0.3968	0.5809
50	750	14.01.50	0,56	0,77	0.3182	0.4150
60	900	28.01.58	0,53	0,76	0.2708	0.4060
70	1050	01.44.55	0,52	0,74	0.2408	0.3716
80	1200	01.58.21	0,50	0,76	0.2018	0.3208
90	1350	02.13.43	0,48	0,75	0.1808	0.2710
100	1500	27.02.23	0,47	0,74	0,1280	0.2219

Los resultados de la clasificación del ROI del pin y la precisión de la detección del cuadro delimitador por Los STENet entrenados se muestran en la Figura 16. El sistema fue muy eficaz para reconocer ambos estados Pin_OK y Pin_Out, incluso cuando los ROI de los pines estaban parcialmente oscurecidos o muy cerca posicionado, lo que tradicionalmente desafía la precisión de la detección. Sin embargo, la precisión Disminuido en fotogramas donde los pines estaban demasiado juntos o parcialmente fuera del campo. de vista.

Machine Translated by Google

Figura 16. Los fotogramas de vídeo de ROI del pin seleccionado que muestran superposiciones generadas con cuadros delimitadores.

Si bien el sistema demostró un rendimiento sólido en condiciones de visualización ideales, el La precisión de la detección varió según diferentes campos de visión y condiciones de iluminación, lo que enfatiza la necesidad de un conjunto de datos de entrenamiento más diverso. La creación de marcos sintéticos para Se exploró aumentar el conjunto de datos, pero la automatización del proceso sigue siendo un desafío. para trabajos futuros, ya que la creación manual de marcos requería mucho tiempo. Mesa 11 vitrinas las métricas de clasificación (exactitud, precisión y recuperación) después del entrenamiento, destacando las el sólido desempeño general del modelo.

Tabla 11. Rendimiento de STENet donde se utiliza ResNet 50 como clasificador.

Clases	Exactitud		Precisión		Recordar	
	Capacitación	Validación	Validación de la formación		Tren	Validación
Pin_Ok	0,952	0,945	0.942	0.940	0.940	0,945
Pin_Out	0,925	0.922	0.910	0.900	0.900	0.890

A pesar de las variaciones debidas a la diversidad limitada en los datos de las clases minoritarias, el clasificador mantiene una alta exactitud y precisión en ambas clases. El desempeño consistente Las métricas para las clases 'Pin_Ok' y 'Pin_Out' demuestran la solidez del modelo y confiabilidad en la identificación y clasificación de instancias de clases mayoritarias y minoritarias.

Los resultados subrayan la aplicación práctica de modelos de aprendizaje profundo al pasador de metal. tareas de detección, destacando la necesidad de seguir mejorando el entrenamiento de modelos y

Machine Translated by Google

Generación de datos sintéticos para manejar diversos escenarios operativos de manera efectiva. Las principales contribuciones de la investigación a ARDAD se enumeran a continuación:

• Análisis espaciotemporal para el monitoreo automatizado de barreras de tráfico en Auckland Harbour Bridge y otros lugares de tráfico que utilizan la misma barrera para controlar el flujo de tráfico; • Transformar un PoC [7] en un MVP con algoritmos de IA desplegables en tiempo real ARDAD, que ejemplifica la traducción de la investigación a la práctica; • Métodos de generación de datos sintéticos semiautomáticos para mejorar los modelos de aprendizaje automático para tareas ARDAD complejas, abordando la escasez y rareza de datos de eventos de tráfico críticos;

• Integrar el aprendizaje automático con la manipulación del kernel para la detección dinámica de anomalías para mejorar la precisión de los sistemas ARDAD actuales, aumentando la precisión de detección promedio de 0,826 a 0,939;
• Participar en una colaboración interdisciplinaria para alinear los avances de ARDAD con los requisitos de las partes interesadas, fusionando la investigación computacional con soluciones de gestión del tráfico.

4.5. Discusión

Los intentos iniciales de grabar vídeos de alta velocidad desde el transporte público y los automóviles personales presentaron desafíos importantes. Las predicciones del flujo de tráfico indicaron que las velocidades podrían caer ocasionalmente por debajo de los 20 km/h en el puente del puerto de Auckland, lo que idealmente permitiría capturar fotogramas a 240 fps que mostraran alineaciones perfectas de los pines. Sin embargo, estas condiciones rara vez se cumplieron y la dependencia de los atascos durante las horas pico no produjo los resultados deseados debido a los tiempos de parada erráticos y las limitaciones del equipo de graba Dados los requisitos críticos de seguridad en el Puente del Puerto de Auckland, todos los esfuerzos de recopilación de datos fueron supervisados por expertos de NZTA, quienes también brindaron acceso a la Barrier Transfer Machine (BTM) y al sitio de operación, junto con las instrucciones de seguridad necesarias. Para ver los estrechos espacios entre los segmentos de hormigón móviles, se montaron cámaras de alta velocidad de fotogramas (GoPro 5, GoPro 8 y GoPro 9) en el BTM, que se movía entre 6 y 9 km/ Las grabaciones se realizaron en diversas condiciones climáticas y momentos del día para capturar diversos escenarios operativos. La dificultad para encontrar y registrar pines que estaban fuera de posición dificultó significativamente el proceso de investigación. Después de numerosos intentos fallidos, se adoptaron marcos sintéticos como una solución viable. Se proporcionó un informe provisional a la NZTA, que muestra la agrupación jerárquica y una separación visual de los vectores de características relacionados con la clase de producción minoritaria utilizando medidas de distancia basadas en correlación de Pearson y Coseno. Estas medidas computacionalmente más exigentes se seleccionaron en lugar de otras más simples como las euclidianas debido a la alta dimensionalidad de las características extraídas de las CNN en relación con el número de muestras de clases minoritarias, incluida la necesidad de extraer información invariable a las condiciones de iluminación, precipitación o colores de fondo de los vehículos que pasan. .

Las clasificaciones más allá de la binaria (pin dentro o fuera de posición) siguen sin explorarse, como los escenarios en los que el ROI del pin está totalmente oscurecido o los pines metálicos están parcialmente fuera. Ampliar la clasificación binaria a un sistema multiclase podría permitir que los sistemas futuros detecten varios tipos de daños que requieran diferentes acciones de mantenimiento. Se necesitarían conjuntos de datos adicionales que capturen una gama más amplia de anomalías y más datos sintéticos para respaldar dichas mejoras, siguiendo las metodologías descritas en nuestro algoritmo de creación de datos sintéticos en la Tabla 2. La precisión de detección promedio lograda fue de 0,93, lo cual es digno de elogio dada la Numerosos desafíos encontrados durante el entrenamiento del modelo. En comparación con otros detectores basados en regiones, nuestro modelo híbrido ofrecía mayor precisión y velocidad de procesamiento superior, manejando de 40 a 45 fotogramas por segundo con hasta un 93,6 % de precisión. Las capas de integración y concatenación de profundidad mejoraron la detección de objetos más pequeños al incorporar detalles de imagen de bajo nivel en el proceso de detección, facilitado por una secuencia de capas de convolución, ReLU y normalización por lotes. La aplicación MATLAB proporciona una plataforma sólida para ampliar la investigación hacia aplicaciones futuras. En términos de "lidiar con lo desconocido" y la incertidumbre de la investigación, para la comunidad investigadora que emprende proyectos similares que duran uno o varios años, vale la pena considerar c

Machine Translated by Google

Tales consideraciones pueden incluir cambios en el personal de los socios de la industria, posibles cierres pandémicos, financiación gubernamental y actualizaciones de políticas, que requieren flexibilidad en la planificación de proyectos y recopilación de datos.

A continuación se enumera un resumen de los aspectos prácticos de este estudio: • La tecnología ofrece una solución automatizada rentable para el tráfico de carriles y general. seguridad, aumentando pero no reemplazando las inspecciones humanas.

- El sistema aumenta la frecuencia de inspección, mejora la privacidad y permite la creación de registros digitales para obtener conocimientos analíticos sobre la seguridad del tráfico.
- Los esfuerzos científicos futuros utilizarán un conjunto de datos más extenso para centrarse en el desarrollo de modelos adaptativos y la mejora del rendimiento. Se explorarán la visualización de datos adicionales y enfoques metodológicos híbridos .
- Para nuestro socio industrial, la NZTA, el proyecto allana el camino para el desarrollo de software independiente y la posible integración del sistema en infraestructuras más amplias de ciudades inteligentes .

- La transición de un producto mínimo viable (MVP) a sistemas de producción implicará pruebas exhaustivas, optimización de código y, potencialmente, transición de MATLAB a Python para mejorar las capacidades de integración de la eficiencia computacional y minimizar la posibilidad de que los proveedores se bloqueen en infraestructuras y procesamiento de datos propietarios. fuera de la jurisdicción nacional.

- Este estudio sienta las bases para futuras innovaciones en la tecnología de gestión del tráfico , posicionando a la NZTA para aprovechar los avances en su modernización continua de la infraestructura del tráfico y las iniciativas de ciudades inteligentes.

Los avances futuros del sistema considerarán permitir el seguimiento del estado del PIN desde varios puntos de vista, incluyendo potencialmente protocolos y tecnología de recopilación de datos adicionales, ampliando la versatilidad y el alcance de la aplicación del sistema.

5. Conclusiones y trabajo futuro

El puente del puerto de Auckland desempeña un papel crucial en la infraestructura de Auckland, con flujos de tráfico que son desiguales pero predecibles, invirtiendo su volumen durante las horas pico de la mañana y la tarde. Las barreras móviles de hormigón (MCB) han demostrado ser eficaces para gestionar los cuellos de botella del tráfico de corta distancia; sin embargo, la susceptibilidad del puente a diversos tipos de vibraciones, particularmente alrededor de su parte central elevada, plantea preocupaciones de seguridad, lo que requiere inspecciones frecuentes de los pasadores. Otros problemas de salud y seguridad incluyen la dependencia exclusiva de las inspecciones manuales y la posibilidad de que se produzcan errores humanos relacionados con la seguridad en el lugar de trabajo del personal de inspección, una postura ergonómica poco saludable de la columna y problemas con el equipo de protección.

Para aumentar la seguridad y la frecuencia del monitoreo de la seguridad del MCB, desarrollamos un sistema de monitoreo automatizado que preserva la privacidad y que es transferible de los datos recopilados en el Puente del Puerto de Auckland a contextos similares que involucran la regulación del flujo de tráfico y aplicaciones de monitoreo de seguridad [10]. Se introdujo una técnica novedosa para generar marcos sintéticos para simular varias posiciones de pasadores inseguras, lo que ayudó al desarrollo incremental del modelo y al ajuste del rendimiento. Esta investigación demostró con éxito que el prototipo puede detectar posiciones de pines inseguras directamente a partir de transmisiones en vivo y cuadros de video previamente grabados en diferentes condiciones de iluminación (como sol brillante, lluvia intensa y condiciones de luz "suave" temprano en la mañana). La escasez de cuadros de video que muestran un estado Pin_Out se abordó mediante la introducción de un método para crear imágenes sintéticas para mejorar el proceso de modelado. Se anticipó que el rendimiento general esperado del sistema para la detección de la región de los pines, la selección de cuadros y la clasificación de los pines sería superior al 80 %, y los modelos individuales lograrían hasta un 99 % de precisión en un conjunto de datos limitado, como se muestra en la Tabla 5. Estos hallazgos justifican una mayor validación en un conjunto de datos futuro más amplio y más equilibrado. El sistema de alerta y detección del estado del pin mostró precisión y exactitud deseables, con cierta disminución del rendimiento atribuida a la naturaleza desequilibrada del conjunto de datos, las diversas condiciones de iluminación y los ángulos de la cámara y las variaciones de distancia. La evidencia de un conjunto de datos etiquetado más pequeño sugiere que el sistema es un producto viable que no requiere más

Machine Translated by Google

etiquetado manual. La integración de un modelo híbrido facilitó el análisis y proporcionó flexibilidad.
para futuros ajustes del modelo con requisitos mínimos de etiquetado de datos.

El trabajo futuro incluirá una mayor recopilación de datos de vídeo, incluidos vídeos adicionales.
registrado por los equipos de mantenimiento de NZTA y AHB. La recopilación de datos mejorada es
Se espera que refuerce el sistema fundamental y ayude a desarrollar aún más sistemas ARDAD de aplicación
universal para contextos similares de seguridad del tráfico a nivel mundial. Mientras que el estado del pin
Los resultados de detección y clasificación son prometedores, existe un potencial significativo para
avances en la integración del seguimiento del ROI del pin con el sistema de alerta. Iteraciones futuras
del sistema también puede aprovechar tecnologías avanzadas como LiDAR y GPS, que
son cada vez más comunes en los dispositivos móviles modernos. Desarrollando adicionales
Las capacidades implicarán una amplia capacitación y adaptación del sistema en conjuntos de datos enriquecidos.
que capturan diversas condiciones y escenarios de pines, lo que potencialmente conduce a una mayor robustez y
Soluciones responsivas de gestión del tráfico.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, MR; software, señor; Validación, RM; Curación de datos,
SEÑOR; Escritura: borrador original, MR; Escritura: revisión y edición, BB y MD; Supervisión, BB
y MD Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: conjunto de datos disponible a pedido de los autores.

Agradecimientos: Extendemos nuestro más sincero agradecimiento a Gary Bonser, Martin Olive, David Ranby,
y Angela Potae de NZTA y Auckland System Management (ASM) por su invaluable
asistencia con transporte, sesiones informativas de seguridad, grabaciones de video, información sobre proyectos y soporte continuo.
También agradecemos a la Universidad Tecnológica de Auckland (AUT) por la financiación y el estipendio de doctorado.
soporte y para proporcionar acceso al hardware informático, la biblioteca y el equipo de grabación.
También deseamos reconocer los esfuerzos de desarrollo de software y documentación de la industria,
academia y comunidades de código abierto que producen MATLAB, Orange Data-Mining, SqueezeNet,
TensorFlow, ImageNet, Google Cloud y OpenCV.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Notaciones

La siguiente tabla resume los símbolos importantes y las notaciones matemáticas utilizadas en este
papel:

Descripción del símbolo	
Y	Componente de luminancia en el espacio de color YCbCr
xc	Ubicación del centroide de un objeto en la coincidencia de plantillas
xi	Ubicación de píxeles en la coincidencia de plantillas
Wisconsin	Intensidad de píxeles en la coincidencia de plantillas
P(Xt)	Probabilidad de observar un valor de píxel X en el tiempo t en un modelo de mezcla gaussiana
	Peso del k-ésimo componente gaussiano en el momento t
	Media del k-ésimo gaussiano en el tiempo t
semana,t μk,t ∑k,t	Matriz de covarianza del k-ésimo gaussiano en el momento t
ΔMt	Métrica de detección de movimiento que combina diferencias de fotogramas y flujo óptico
	Fotograma en el momento t
Pies lt	Degradado de la imagen en el tiempo t
Vermont	Vector de flujo óptico en el tiempo t
α	Factor de ponderación en la ecuación de detección de movimiento.
kk	Ganancia de Kalman en el tiempo k
zk	Medición real en el momento k
hk	Matriz de medición que asigna el espacio de estados al espacio de medición

Machine Translated by Google

Referencias

1. Agencia de Transporte de Nueva Zelanda Waka Kotahi. Ficha informativa sobre el puente del puerto de Auckland. 2024. Disponible en línea: https://www.nzta. govt.nz/assets/site-resources/content/about/docs/auckland-harbour-bridge-factsheet.pdf (consultado el 10 de abril de 2024).
2. Comisión de Infraestructura de Nueva Zelanda Te Waihanga. Valor de los activos de infraestructura, inversión y depreciación de Nueva Zelanda, 1990-2022. 2023. Disponible en línea: https://tewaihanga.govt.nz/our-work/research-insights/build-or-maintain (consultado el 10 de abril de 2024).
3. Agencia de Transporte de Nueva Zelanda Waka Kotahi. Cómo mover una barrera de hormigón en una autopista. 2024. Disponible en línea: https: //www.nzta.govt.nz/media-releases/how-to-move-a-concrete-motorway-barrier/ (consultado el 10 de abril de 2024).
4. Yang, X.; Zhang, J.; Liu, W.; Jing, J.; Zheng, H.; Xu, W. Automatización en la detección, diagnóstico y tratamiento de problemas en la carretera. J. Camino Ing. 2024, 4, 1–26. [Referencia cruzada]
5. Bai, D.; Li, G.; Jiang, D.; Yun, J.; Tao, B.; Jiang, G.; Sol, Y.; Ju, Z. Métodos de detección de defectos superficiales para productos industriales con muestras desequilibradas: una revisión del progreso en la década de 2020. Ing. Aplica. Artif. Intel. 2024, 130, 107697. [Referencia cruzada]
6. Trilles, S.; Hammad, SS; Iskandaryan, D. Detección de anomalías basada en la inteligencia artificial de las cosas: un mapeo sistemático de la literatura. Cosas de Internet 2024, 25, 101063. [CrossRef]
7. Baˇ ci´c, B.; Rathee, M.; Pears, R. Automatización de la inspección de barreras de carriles móviles para la seguridad del tráfico en el puente del puerto de Auckland. En Actas del procesamiento de información neuronal: 27.ª conferencia internacional, ICONIP 2020, Bangkok, Tailandia, 23 a 27 de noviembre de 2020; Actas, Parte I 27. Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2020; págs. 150-161.
8. Klarák, J.; Andok, R.; Malik, P.; Kuric, I.; Ritomský, M.; Klaˇ cková, I.; Tsai, H.-Y. Desde la detección de anomalías hasta la clasificación de defectos. Sensores 2024, 24, 429. [CrossRef] [PubMed]
9. Lozano-Ramírez, NE; Sánchez, O.; Carrasco-Beltrán, D.; Vidal-Méndez, S.; Castañeda, K. Digitalización y sostenibilidad en Tendencias de proyectos lineales: un análisis bibliométrico. Sostenibilidad 2023, 15, 15962. [CrossRef]
10. Wikipedia . Máquina de transferencia de barrera. 2024. Disponible en línea: https://en.wikipedia.org/wiki/Barrier_transfer_machine (accedido el 20 de abril de 2024).
11. Rathee, M. Detección de seguridad de la barrera de hormigón móvil del puente del puerto de Auckland; Universidad Tecnológica de Auckland: Auckland, Nueva Zelanda, 2021.
12. Baccari, S.; Hadded, M.; Ghazzai, H.; Touati, H.; Elhadef, M. Detección de anomalías en vehículos conectados y autónomos: un estudio, análisis y desafíos de investigación. Acceso IEEE 2024, 12, 19250–19276. [Referencia cruzada]
13. Rathee, M.; Baˇ ci´c, B.; Doborjeh, M. Detección automatizada de defectos y anomalías en la carretera para la seguridad del tráfico: una revisión sistemática. Sensores 2023, 23, 5656. [CrossRef] [PubMed]
14. Cui, Y.; Liu, Z.; Lian, S. Una encuesta sobre algoritmos de detección de anomalías no supervisados para imágenes industriales. Acceso IEEE 2023, 11, 55297–55315. [Referencia cruzada]
15. Cottrell, BH Evaluación de un sistema de barrera de hormigón móvil. [Informe técnico] 1994. Disponible en línea: https://rosap.ntl.bts.gov/ver/punto/19352 (consultado el 9 de abril de 2024).
16. Poe, CM Enfoque de barrera de hormigón móvil para el diseño y operación de un carril HOV en contraflujo. Transp. Res. Rec. 1991, 40–54.
17. Chirayil Nandakumar, S.; Mitchell, D.; Erden, MS; Flynn, D.; Lim, T. Métodos de detección de anomalías en robótica autónoma. misiones. Sensores 2024, 24, 1330. [CrossRef]
18. Galvão, YM; Castro, L.; Ferreira, J.; Neto, FBdL; Fagundes, RAdA; Fernandes, BJ Detección de anomalías en casas inteligentes para la atención sanitaria: avances recientes y perspectivas de futuro. Computación SN. Ciencia. 2024, 5, 136. [Referencia cruzada]
19. Es-Swidi, A.; Ardchir, S.; Elghoumari, Y.; Daif, A.; Azouazi, M. Detección de congestión de tráfico y anomalías en las carreteras mediante procesamiento de imágenes de CCTV, desafíos y oportunidades. En Conferencia Internacional sobre Sistemas Inteligentes Avanzados para el Desarrollo Sostenible; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2022; págs. 92-105.
20. Gao, J.; Zuo, F.; Ozbay, K.; Hammami, O.; Barlas, ML Un nuevo enfoque de monitoreo de carriles de acera y estimación del impacto del estacionamiento ilegal basado en la teoría de colas y visión por computadora para cámaras con baja resolución y baja velocidad de fotogramas. Transp. Res. Parte A Práctica de políticas. 2022, 162, 137-154. [Referencia cruzada]
21. Kim, S.; Anagnostopoulos, G.; Barmpounakis, E.; Geroliminis, N. Extensiones visuales y detección de anomalías en el pNEUMA. Experimente con un enjambre de drones. Transp. Res. Parte C Emergente. Tecnología. 2023, 147, 103966. [Referencia cruzada]
22. Yi, K.; Luo, K.; Chen, T.; Hu, R. Un modelo YOLOX mejorado y una estrategia de transferencia de dominio para peatones y vehículos nocturnos detección. Aplica. Ciencia. 2022, 12, 12476. [Referencia cruzada]
23. Wang, J.; Wang, X.; Hao, R.; Yin, H.; Huang, B.; Xu, X.; Liu, J. Coincidencia incremental de vecindad de plantillas para la detección de anomalías 3D. Neurocomputación 2024, 581, 127483. [CrossRef]
24. Pan, Q.; Bao, Y.; Li, H. Transferir la detección de anomalías de datos basada en el aprendizaje para el monitoreo de la salud estructural. Estructura. Monitor de salud. 2023, 22, 3077–3091. [Referencia cruzada]
25. Yan, P.; Abdulkadir, A.; Luley, PP; Rosenthal, M.; Schatte, Georgia; Grewe, BF; Stadelmann, T. Un estudio completo del aprendizaje de transferencia profunda para la detección de anomalías en series de tiempo industriales: métodos, aplicaciones y direcciones. Acceso IEEE 2024, 12, 3768–3789. [Referencia cruzada]
26. Bharambe, U.; Bhangale, U.; Narvekar, C. Papel de la optimización multiobjetivo en la segmentación y clasificación de imágenes. En Inteligencia Computacional en Procesamiento de Imágenes y Video; Chapman y Hall/CRC: Boca Ratón, FL, EE. UU., 2023; págs. 317–340.
27. González, RC Procesamiento de imágenes digitales; Pearson Education India: Hoboken, Nueva Jersey, EE. UU., 2009.

Machine Translated by Google

28. Yuan, Y.; Huang, J.; Yu, J.; Bronceado, JKS; Chng, KZ; Lee, J.; Kim, S. Aplicación de algoritmos de aprendizaje automático para la determinación precisa del nivel de bilirrubina en imágenes fantasma de tejido diseñadas in vitro. Ciencia. Rep. 2024, 14, 5952. [CrossRef] [PubMed]
29. Kilicaslan, M.; Tanyeri, U.; Demirci, R. Recuperación de imágenes mediante histograma de color unidimensional creado con entropía. Adv. eléctrico. Computadora. Ing. 2020, 20, 79–88. [Referencia cruzada]
30. Mittal, H.; Pandey, AC; Saraswat, M.; Kumar, S.; Pal, R.; Modwel, G. Un estudio completo sobre la segmentación de imágenes: métodos de agrupación, parámetros de rendimiento y conjuntos de datos de referencia. Multimed. Herramientas Aplica. 2022, 81, 35001–35026. [Referencia cruzada]
31. Vansh, V.; Chandrasekhar, K.; Anil, C.; Sahu, SS Detección de rostros mejorada utilizando YCbCr y Adaboost. En Actas de la Quinta Conferencia Internacional sobre Inteligencia Computacional en Minería de Datos (ICCIDM 2018), Burla, India, 15 y 16 de diciembre de 2018; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2020; págs. 689–699.
32. Han, H.; Han, C.; Lan, T.; Huang, L.; Hu, C.; Xue, X. Detección automática de sombras para la teledetección satelital multiespectral Imágenes en espacios de color invariantes. Aplica. Ciencia. 2020, 10, 6467. [Referencia cruzada]
33. Sahu, Y.; Tripathi, A.; Gupta, RK; Gautama, P.; Pateriya, RK; Gupta, A. Un diagnóstico asistido por computadora de cáncer de mama basado en CNN-SVM utilizando la técnica de segmentación de histograma K-medias. Multimed. Herramientas Aplica. 2023, 82, 14055–14075. [Referencia cruzada]
34. Kollem, S.; Reddy, KR; Rao, DS Un algoritmo de agrupamiento de medias difusas posibilistas basado en SVM optimizado para la segmentación de tumores . Multimed. Herramientas Aplica. 2021, 80, 409–437. [Referencia cruzada]
35. Agrawal, S.; Natu, P. Un modelo mejorado de resta de fondo basado en el método de mezcla gaussiana para la detección de objetos en movimiento en escenas al aire libre. En actas de la Cuarta Conferencia Internacional sobre Tecnologías Eléctricas, Informáticas y de Comunicaciones (ICECCT) de 2021, Coimbatore, India, 15 a 17 de septiembre de 2021; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2021; págs. 1–8.
36. Rakesh, S.; Hegde, NP; Gopalachari, MV; Jayaram, D.; Madhu, B.; Hameed, MA; Vankdothu, R.; Kumar, LS Objeto en movimiento detección mediante resta de fondo basada en GMM modificado. Medidas. Sens. 2023, 30, 100898. [CrossRef]
37. Zhou, Q.; Situ, Z.; Teng, S.; Chen, G. Efectividad comparativa del aumento de datos mediante enfoques tradicionales versus StyleGAN en la detección automatizada de defectos en alcantarillado. J. Recursos hídricos. Plan. Gestionar. 2023, 149, 04023045. [Referencia cruzada]
38. Zuehlke, D.; Henderson, TA; McMullen, S. Aprendizaje automático mediante coincidencia de plantillas aplicada al seguimiento de objetos en datos de vídeo. Artif. Intel. Mach. Aprender. Operación multidominio. Aplica. 2019, 11006, 110061S.
39. Ge, Y.; Zhang, J.; Ren, X.; Zhao, C.; Yang, J.; Basu, A. Red de transformación de variación profunda para detección de primer plano. Traducción IEEE. Sistema de circuitos. Tecnología de vídeo. 2020, 31, 3544–3558. [Referencia cruzada]
40. Cao, Q.; Wang, Z.; Long, K. Detección de tráfico en primer plano en intersecciones urbanas complejas utilizando un novedoso modelo de aprendizaje de diccionario en segundo plano. J. Adv. Transp. 2021, 2021, 3515512. [Referencia cruzada]
41. Zhang, Y.; Zheng, W.; Leng, K.; Li, H. Resta de fondo utilizando una característica de textura mediana local adaptativa en iluminación Cambia las escenas del tráfico urbano. Acceso IEEE 2020, 8, 130367–130378. [Referencia cruzada]
42. Feng, J.; Zeng, D.; Jia, X.; Zhang, X.; Li, J.; Liang, Y.; Jiao, L. Redes guiadas por información de movimiento espacial y basadas en puntos clave de fotograma cruzado para la detección y seguimiento de vehículos en movimiento en videos satelitales. ISPRS J. Fotograma. Sensores remotos 2021, 177, 116-130. [Referencia cruzada]
43. Yang, G.; Ramanan, D. Actualización del flujo óptico al flujo de escenas 3D mediante expansión óptica. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones 2020, Seattle, WA, EE. UU., 13 a 19 de junio de 2020; págs. 1334-1343.
44. Chen, X.; Jia, Y.; Tong, X.; Li, Z. Investigación sobre detección de peatones y seguimiento profundo delante de vehículos inteligentes basada en aprendizaje profundo. Sostenibilidad 2022, 14, 9281. [CrossRef]
45. Sol, M.; Davies, YO; Proudler, IK; Hopgood, JR Filtro Kalman de kernel adaptativo. Traducción IEEE. Proceso de señal. 2023, 71, 713–726. [Referencia cruzada]
46. Chaurasiya, RK; Gondane, PM; Acharya, B.; Khan, MI Analizador automático de tráfico rodado que utiliza resta de fondo, análisis de blobs y algoritmos de seguimiento. En actas de la séptima conferencia internacional sobre aplicaciones informáticas en ingeniería eléctrica: avances recientes (CERA) de 2023, Roorkee, India, 27 a 29 de octubre de 2023; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2023; págs. 1–6.
47. Sajeed, MA; Kelouwani, S.; Amamou, A.; Alam, MZ; Agbossou, K. Estimación de salida de carril de vehículos en vías urbanas utilizando información SIG. En Actas de la Conferencia IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) de 2021, Gijón, España, 25 a 28 de octubre de 2021; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2021; págs. 1–7.
48. Momin, KA; Barúa, S.; Jamil, MS; Hamim, OF Predicción del flujo de tráfico de corta duración mediante filtrado de Kalman. Conferencia AIP. Proc. 2023, 2713, 040011.
49. Moghaddasi, SS; Faraji, N. Un algoritmo híbrido basado en filtro de partículas y algoritmo genético para el seguimiento de objetivos. Sistema experto. Aplica. 2020, 147, 113188. [Referencia cruzada]
50. Chen, S.; Huang, L.; Chen, H.; Bai, J. Detección y seguimiento de varios carriles mediante modelo temporal-espacial y filtrado de partículas. Traducción IEEE . Intel. Transp. Sistema. 2021, 23, 2227–2245. [Referencia cruzada]
51. Nissimagoudar, P.; Algur, N.; Bonageri, N.; Chaván, A.; Koppa, A.; Iyer, Carolina del Norte Seguimiento de múltiples vehículos mediante algoritmo de cambio medio y conectividad de 8 puntos. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Computación Suave y Reconocimiento de Patrones, en línea, 14-16 de diciembre de 2022; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2022; págs. 3-13.
52. Zhang, B.; Li, Z.; Perina, A.; Del Bué, A.; Murino, V.; Liu, J. Modelado adaptativo de movimiento local para un seguimiento robusto de objetos. IEEE Trans. Sistema de circuitos. Tecnología de vídeo. 2016, 27, 1515-1526. [Referencia cruzada]
53. O'Mahony, N.; Campbell, S.; Carvalho, A.; Harapanahalli, S.; Hernández, GV; Krpalkova, L.; Riordan, D.; Walsh, J. Aprendizaje profundo versus visión por computadora tradicional. En Actas de los avances en visión por computadora: Conferencia sobre visión por computadora (CVC) de 2019, Las Vegas, NV, EE. UU., 2 y 3 de mayo de 2019; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2020; Volumen 1, págs. 128-144.

Machine Translated by Google

54. Zhang, W.; Li, H.; Li, Y.; Liu, H.; Chen, Y.; Ding, X. Aplicación de algoritmos de aprendizaje profundo en ingeniería geotécnica: un breve revisión crítica. Artif. Intel. Rev. 2021, 54, 5633–5673. [Referencia cruzada]
55. Largo, G.; Zhang, Z. Detección profunda de tráfico cifrado: un marco de detección de anomalías para el tráfico cifrado basado en paralelo extracción automática de características. Computadora. Intel. Neurociencias. 2023, 3316642. [Referencia cruzada] [PubMed]
56. Trasero, UM; Ullah, HA; Letchmunan, S.; Tariq, I.; Hassan, FH; Koh, TW Aprovechamiento del aprendizaje por transferencia para humanos espacio-temporales Reconocimiento de actividad a partir de secuencias de vídeo. Computadora. Madre. Continúe. 2023, 74, 5017–5033.
57. Ouhami, M.; Hafiane, A.; Es-Saady, Y.; El Hajji, M.; Canals, R. Visión por ordenador, IoT y fusión de datos para la detección de enfermedades en cultivos Uso del aprendizaje automático: una encuesta e investigación en curso. Sensores remotos 2021, 13, 2486. [CrossRef]
58. Carlson, diputado; Bloom, I. La naturaleza cíclica de la resolución de problemas: un marco emergente de resolución de problemas multidimensional. Educativo. Sementa. Matemáticas. 2005, 58, 45–75. [Referencia cruzada]
59. Vallenga, D.; Grypdonck, MHF; Hoogwerf, LJR; Tan, FIY Investigación-acción: ¿Qué, por qué y cómo? Acta Neurol. Belga. 2009, 109, 81–90. [PubMed]
60. Farady, I.; Lin, C.-Y.; Chang, M.-C. PreAugNet: mejore el aumento de datos para la clasificación de defectos industriales con datos de capacitación a pequeña escala . J. Intel. Fabricante. 2024, 35, 1233–1246. [Referencia cruzada]
61. Xu, M.; Yoon, S.; Fuentes, A.; Park, DS Un estudio completo de las técnicas de aumento de imágenes para el aprendizaje profundo. Reconocimiento de patrones . 2023, 137, 109347. [Referencia cruzada]
62. Trabajos de matemáticas. Desarrolle aplicaciones utilizando App Designer. 2021. Disponible en línea: https://www.mathworks.com/help/matlab/app-diseñador.html (consultado el 10 de abril de 2024).
63. Kingma, DP; Ba, J. Adam: Un método para la optimización estocástica. arXiv 2014, arXiv:1412.6980.
64. Sutskever, I.; Martens, J.; Dahl, G.; Hinton, G. Sobre la importancia de la inicialización y el impulso en el aprendizaje profundo. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Aprendizaje Automático, Atlanta, GA, EE. UU., 16 a 21 de junio de 2013; PMLR; págs. 1139-1147.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Comentario

Comente sobre Sakli, H. Guía de ondas cilíndrica sobre sustrato de ferrita controlada por un campo magnético aplicado externamente. Electrónica 2021, 10, 474

Afshin Moradi

Departamento de Ingeniería Física, Universidad Tecnológica de Kermanshah, Kermanshah 6715685420, Irán; a.moradi@kut.ac.ir

Resumen: Recientemente, Sakli investigó la propagación de ondas electromagnéticas en guías de ondas cilíndricas metálicas llenas de ferrita magnetizada longitudinalmente, centrándose en los modos Tez (eléctrico transversal) y TMz (magnético transversal) en relación con el eje z. Este comentario destaca que el sistema propuesto generalmente no puede soportar la propagación de las ondas Tez y TMz , lo que invalida los principales resultados derivados de Sakli.

Palabras clave: materiales anisotrópicos; antena; guías de ondas cilíndricas; ferritas; propagación

1. Introducción

Recientemente, Sakli [1] investigó la propagación de los modos Tez y TMz en guías de ondas cilíndricas metálicas llenas de ferrita magnetizada longitudinalmente y sin pérdidas. Demostró cómo obtener diagramas de dispersión y analizó el impacto de los parámetros anisotrópicos en las características de dispersión y las frecuencias de corte. Además, presentó resultados numéricos para los modos Tez y TMz .

Sin embargo, basándose en la teoría de guías de ondas cilíndricas rellenas de ferrita obtenida a principios de los años 50 del siglo pasado [2,3], se debería esperar la onda híbrida para la propagación de guías de ondas metálicas cilíndricas propuesta y, por lo tanto, las ondas TEZ y TMz son incapaz de propagarse. Además, como se muestra en nuestro estudio reciente [4], una guía de ondas cilíndrica metálica llena de materiales anisotrópicos homogéneos generalmente admite solo modos híbridos. Esto significa que los resultados antes mencionados para la propagación de los modos Tez y TMz obtenidos por Sakli [1] no son válidos. Tengamos en cuenta que también quedó bien establecido que, en casos generales, la separación de ondas electromagnéticas en modos TE y TM no es posible en guías de ondas metálicas rectangulares [5,6].

Creemos que las publicaciones incorrectas deben corregirse para garantizar que los nuevos investigadores puedan aprovechar estudios previos precisos. Esta motivación impulsa nuestro comentario, en el que identificamos los errores en [1].

2. El riguroso análisis electromagnético

Considere una guía de ondas cilíndrica metálica llena de ferrita magnetizada longitudinalmente como se muestra en la Figura 1 de [1]. Estamos interesados en soluciones en modo guiado en la guía de ondas que se propaga en la dirección z. Por lo tanto, consideremos la forma de la onda electromagnética que se propaga en la guía de ondas como

$$mi(r, \theta, z, t) = mi(r, \theta)e\, j(\omega t - kz\, z), \quad (1)$$

$$H(r, \theta, z, t) = H(r, \theta)e\, j(\omega t - kz\, z)\ , \quad (2)$$

check for updates

Cita: Moradi, A. Comentario sobre Sakli, H. Guía de ondas cilíndrica sobre sustrato de ferrita controlada por campo magnético aplicado externamente. Electrónica 2021, 10, 474. Electrónica 2024, 13, 3031. https://doi.org/10.3390/electrónica13153031

Editor académico: Flavio Canavero

Recibido: 9 de mayo de 2024
Revisado: 11 de julio de 2024
Aceptado: 29 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por el autor. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Machine Translated by Google

donde kz es la constante de propagación a lo largo de la dirección z. Expandiendo las ecuaciones de rizo de Maxwell (es decir, las ecuaciones (1) y (2) en [1]) y usando la ecuación (3) en [1] obtenemos

$$\begin{matrix} \frac{1}{r}\frac{\partial Ez}{\partial \theta} - \frac{\partial E\theta}{\partial z} \\ \frac{\partial Er}{\partial z} - \frac{\partial Ez}{\partial r} \\ \frac{1}{r}\frac{\partial (rE\theta)}{\partial r} - \frac{\partial Er}{r\partial \theta} \end{matrix} = \begin{matrix} \mu Hr - j\kappa H\theta \\ j\kappa Hr + \mu H\theta \\ -j\omega\mu 0 \quad \mu rzHz \end{matrix}, \tag{3}$$

$$\begin{matrix} \frac{1}{r}\frac{\partial Hz}{\partial \theta} - \frac{\partial H\theta}{\partial z} \\ \frac{\partial Hr}{\partial z} - \frac{\partial Hz}{\partial r} \\ \frac{1}{r}\frac{\partial (rH\theta)}{\partial r} - \frac{\partial Hr}{r\partial \theta} \end{matrix} = j\omega\varepsilon 0\varepsilon r \begin{matrix} Eh \\ E\theta \\ ez \end{matrix}. \tag{4}$$

Poniendo las ecuaciones (1) y (2) en las ecuaciones (3) y (4), y realizando algunas manipulaciones, obtenemos

$$Er = \frac{kz}{K2_c}\left[-jK2\frac{\partial Ez}{\partial \theta}\frac{1}{r} + F c\mu \frac{\partial Ez}{\partial r}\right] - \frac{1}{K2_c}\left[A1 + jA2\frac{\partial Hz}{r\partial \theta}\frac{1}{r} + \frac{\partial Hz}{\partial r}\right], \tag{5}$$

$$E\theta = -\frac{kz}{K2_c}\left[F\frac{\partial Ez}{\partial r} + jK2 c\mu \frac{1}{r}\frac{\partial Ez}{\partial \theta}\right] + \frac{1}{K2_c}\left[\frac{\partial Hz}{r\partial \theta}\frac{1}{r} + jA2 A1\frac{\partial Hz}{\partial r}\right], \tag{6}$$

$$Hora = \frac{\omega\varepsilon 0\varepsilon r f}{K2_c}\left[F\frac{\partial Ez}{\partial r} + jK2 c\mu \frac{1}{r}\frac{\partial Ez}{\partial \theta}\right] - \frac{1}{K2_c}\left[jkzK\frac{2}{c\mu}\frac{\partial Hz}{r\partial \theta}\frac{1}{r} + Fkz\frac{\partial Hz}{\partial r}\right], \tag{7}$$

$$H\theta = \frac{\omega\varepsilon 0\varepsilon r f}{K2_c}\left[-jK2 c\mu \frac{\partial Ez}{\partial r}\frac{1}{r} + F\frac{\partial Ez}{r\partial \theta}\right] - \frac{1}{K2_c}\left[Fkz\frac{\partial Hz}{r\partial \theta} + jkzK\frac{2}{c\mu}\frac{\partial Hz}{\partial r}\right], \tag{8}$$

donde se introducen algunos símbolos por conveniencia, a saber los siguientes:

$$\begin{aligned} K^2_{c\mu} &= \varepsilon r\, k^2 0\, \mu - kz^2, \\ F &= \varepsilon r f k^2 0\kappa, \\ k^4_c &= K^2_{c\mu} - F^2, \\ A1 &= \frac{Fkz}{\omega\varepsilon 0\varepsilon r f}, \\ A2 &= \frac{k^2_c + kz^2 K^2_{c\mu}}{\omega\varepsilon 0\varepsilon r f}. \end{aligned} \tag{9}$$

Recordamos al lector que el resto de parámetros de las ecuaciones utilizadas en este trabajo fueron definidos en la referencia [1]. Tenga en cuenta que los componentes longitudinales satisfacen las siguientes ecuaciones acopladas:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{\partial}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \left[\omega\mu 0\mu rzK + \frac{\partial}{\partial \theta}\right]^2_c Hz = -j\frac{kzF}{A2}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{\partial}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta^2}\right] Ez, \tag{10}$$

$$-\frac{1}{\partial r}\left[r\frac{\partial}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta^2} + \frac{kc^2}{K2_{c\mu}} Ez = \frac{jFkz}{K2\, c\mu\, \omega\varepsilon 0\varepsilon rf}\left[-\frac{1}{\partial r}\left[r\frac{\partial}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \theta^2}\right] Hz, \tag{11}$$

por lo que, en general, se necesita un modo híbrido. Tenga en cuenta que los lados derechos de las ecuaciones (10) y (11) fueron ignorados en el análisis de Sakli [1]; por lo tanto, su afirmación de que los modos Tez y TMz pueden soportarse por separado en una guía de ondas cilíndrica metálica llena de ferrita magnetizada longitudinalmente es incorrecta.

Sin embargo, el desacoplamiento de Ez, de Hz se produce en dos casos particulares. En el primer caso, las Ecuaciones (10) y (11) se pueden separar en dos ecuaciones independientes de Ez y Hz, cuando la magnetización es igual a cero, es decir, cuando tenemos

$$k = 0. \tag{12}$$

Machine Translated by Google

En este caso, las ecuaciones (10) y (11) se convierten en

$$\frac{1}{\partial r}\frac{\partial}{r\partial r}\frac{\partial}{} + \frac{1}{2r}\frac{\partial}{}\frac{2\,\mu rz + \partial\theta 2}{\mu} \varepsilon r f\, {}^{2}k\,0\,\mu - k\,\frac{2}{z}\,Hz = 0, \tag{13}$$

$$\frac{1\partial}{r\,\partial r}\frac{\partial r}{\partial r} + \frac{1}{2r}\frac{\partial 2}{}\,2\,k\,0\mu - k + \varepsilon r\, f_{\partial\theta 2}\,\frac{2}{z}\,Ez = 0, \tag{14}$$

y por lo tanto, los modos Tez y TMz pueden admitirse por separado en una guía de ondas cilíndrica metálica llena de ferrita longitudinalmente "no magnetizada". En el segundo caso, el desacoplamiento se produce si consideramos los modos azimutales, es decir, cuando tenemos

$$kz = 0. \tag{15}$$

Igualando la constante de propagación a cero en las ecuaciones (10) y (11), obtenemos

$$\frac{1\partial}{r\,\partial r}\,r\frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{2r}\frac{\partial}{2\,\partial\theta 2} + \varepsilon r f\,\mu rzk\,{}^{2}_{0}\,Hz = 0, \tag{dieciséis}$$

$$\frac{1\partial}{\partial r}\frac{\partial}{r\partial r} + \frac{1}{2r}\frac{\partial}{\partial\theta 2}\frac{2\,\varepsilon r f +}{\mu}\,2\,2 - k\,{}^{2}k\,0\,Ez = 0. \tag{17}$$

En este caso aparecen los modos Tez y TMz con componentes (Hz, Er , Eθ) y (Ez, Hr , Hθ), respectivamente.

3 Conclusiones

En este trabajo, comenzamos utilizando el marco matemático general de cómo las ondas electromagnéticas viajan a través de una guía de ondas cilíndrica metálica que está llena con un material de ferrita magnetizado a lo largo de su longitud (como se describe en las referencias [2] y [3]). Nuestro análisis demostró que, en la mayoría de las situaciones, este tipo de sistema no permite la separación distinta de los modos Tez y TMz . Sólo hay dos escenarios especiales en los que podría producirse esta separación. Como resultado, los principales hallazgos presentados por Sakli en la referencia [1] no son válidos.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles en el artículo.

Conflictos de intereses: El autor declara no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Sakli, H. Guía de ondas cilíndrica sobre sustrato de ferrita controlada por un campo magnético aplicado externamente. Electrónica 2021, 10, 474. [Referencia cruzada]
2. Kales, Modos ML en guías de ondas que contienen ferritas. J. Aplica. Física. 1953, 24, 604. [Referencia cruzada]
3. Gamo, H. La rotación de ondas de Faraday en una guía de ondas circular. J. Física. Soc. Japón. 1953, 8, 176. [Referencia cruzada]
4. Moradi, A.; Bait-Suwailam, MM Comentario sobre: Acoplamiento mejorado de luz de fuentes de longitud de onda inferior a una hiperbólica fibra metamaterial. J. Luz. Tecnología. 2024, 42, 5435–5436. [Referencia cruzada]
5. Moradi, A. Comentario sobre guías de ondas cargadas de metamaterial controlable que soportan ondas hacia adelante y hacia atrás. Traducción IEEE. Propagación de antenas. 2023, 72, 3858–3859. [Referencia cruzada]
6. Moradi, A.; Bait-Suwailam, MM Ondas magnetostáticas en guías de ondas metálicas rectangulares llenas de medios uniaxiales de permeabilidad negativa. J. Aplica. Física. 2024, 135, 153102. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Identificación del tipo de torre de energía y parámetro característico Cálculo a partir de datos LiDAR aerotransportados

Shengxuan Zu 1,2, Linong Wang 1,2,*, Shaocheng Wu 1,2, Guanjian Wang 1,2 y Bin Song 1,2

1 Centro de Investigación en Ingeniería del Ministerio de Educación para Protección contra Rayos y Tecnología de Puesta a Tierra, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Automatización, Universidad de Wuhan, Wuhan 430072, China; 2022202070038@whu.edu.cn (SZ); wushaocheng@whu.edu.cn (SO); wangguanjian@whu.edu.cn (GW); 00007609@whu.edu.cn (BS)

2 Escuela de Ingeniería Eléctrica y Automatización, Universidad de Wuhan, Wuhan 430072, China *

Correspondencia: wangln@whu.edu.cn; Teléfono: +86-138-7120-8599

Resumen: La reconstrucción de modelos tridimensionales (3D) de equipos eléctricos desempeña un papel cada vez más importante en el avance de las redes eléctricas gemelas digitales. Para reconstruir un modelo de alta precisión, es crucial obtener con precisión el tipo de pilón y la información de sus parámetros necesarios antes del modelado. Este estudio propone un método mejorado para identificar tipos de torres basado en mediciones de similitud y un conjunto de datos transformados linealmente. Comienza simplificando la identificación de nubes de puntos utilizando la curva de forma de pilón. Posteriormente, la semejanza entre la curva y aquellas curvas dentro del conjunto de datos se evalúa utilizando una medición de similitud para determinar el tipo de torre. Se propone un método novedoso para calcular los parámetros característicos de las nubes de puntos de los pilones. Se analizan las características de distribución horizontal y vertical de las nubes de puntos de los pilones para identificar posiciones de segmentación clave en función de sus tipos. Los puntos característicos se derivan de posiciones de segmentación clave para calcular los parámetros característicos. Finalmente, los modelos 3D del pilón se reconstruyen en base a los valores calculados. Los resultados experimentales mostraron que, en comparación con otras mediciones de similitud, la distancia de Hausdorff tuvo el mejor efecto como medición de similitud utilizando el conjunto de datos transformado linealmente, con una puntuación F de evaluación general del 86,4%. El error relativo máximo de los parámetros calculados del pilón no superó el 5%, lo que confirma la viab

Palabras clave: LiDAR aerotransportado; torre de energía; medición de similitud; reconstrucción 3D

check for updates

Cita: Zu, S.; Wang, L.; Wu, S.; Wang, G.; Canción, B. Tipo de torre de energía Identificación y característica Cálculo de parámetros desde el aire Datos LiDAR. Electrónica 2024, 13, 3032. https://doi.org/10.3390/electrónica13153032

Editor académico: Ahmed Abu-Siada

Recibido: 17 de junio de 2024
Revisado: 22 de julio de 2024
Aceptado: 30 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Con el rápido avance de la economía nacional, hay un aumento continuo en la demanda de fuentes de energía fundamentales como la electricidad. Las líneas de transmisión de alto voltaje, que sirven como infraestructura esencial para la transmisión de energía a larga distancia, desempeñan un papel crucial en el desarrollo económico nacional y la producción diaria [1–3]. El monitoreo y mantenimiento regulares de los corredores de transmisión de energía son imperativos para garantizar el funcionamiento seguro y estable del sistema eléctrico. La inspección tradicional de líneas de transmisión generalmente la llevan a cabo inspectores de línea que visualmente o con instrumentos portátiles inspeccionan los equipos eléctricos e identifican peligros potenciales según la experiencia. Sin embargo, debido a varias limitaciones y a la ausencia de datos tridimensionales (3D), las inspecciones manuales implican una carga de trabajo significativa, baja precisión y riesgos potenciales para la seguridad, lo que las hace inadecuadas para satisfacer las necesidades de inspección de la red eléctric

En los últimos años, la tecnología aérea de detección y rango de luz (LiDAR) se ha utilizado ampliamente en inspecciones de energía porque permite la adquisición rápida y precisa de densas nubes de puntos 3D dentro de corredores de transmisión de energía sin las limitaciones de la luz y el terreno [8-10]. Como componente esencial de las líneas de transmisión, la torre eléctrica desempeña un papel fundamental a la hora de garantizar la seguridad de las líneas de alta tensión. El modelo 3D reconstruido del pilón puede proporcionar datos básicos y soporte de modelo para realizar análisis de simulación de campo multifísica , simular escenas de trabajo reales y guiar la selección de

Machine Translated by Google

métodos operativos. Por lo tanto, es necesario desarrollar un método preciso y eficiente para extraer información de los pilones a partir de nubes de puntos para la reconstrucción de modelos 3D.

Actualmente, la investigación sobre las nubes de puntos de los pilones se centra principalmente en la segmentación de los puntos de los pilones a partir de las nubes de puntos recopiladas por el LiDAR aéreo [11-16]. Y existen muchos métodos para la reconstrucción de pilones basados en datos de nubes de puntos, que pueden clasificarse como basados en datos [17], basados en modelos [10] y basados en híbridos [18]. El enfoque basado en datos es generalmente una estrategia ascendente. Procesa directamente los datos sin necesidad de presuponer las características del objeto reconstruido. Han et al. [17] propusieron un método basado en datos para modelar la torre de energía. En este método, se localizaron y extrajeron nubes de puntos de torres eléctricas utilizando los puntos de conexión de pares de líneas. El modelo 3D de la torre de energía se construyó de acuerdo con la característica de línea 3D obtenida del seguimiento del contorno de la imagen binaria. Este método requiere datos de alta calidad y es difícil reconstruir la estructura del pilón cuando hay muchos puntos de ruido en las nubes de puntos obtenidas. En comparación con el enfoque basado en datos, el enfoque basado en modelos adopta una estrategia de arriba hacia abajo y requiere que se complete una biblioteca de modelos con anticipación. Li y col. [10] dividió el pilón en tres partes relativamente simples: el pie, el cuerpo y la cabeza. La cabeza se reconstruyó buscando el modelo correspondiente en la biblioteca de modelos prediseñada y el cuerpo se reconstruyó calculando las líneas de intersección de los planos laterales ajustados. El experimento sugirió que el enfoque puede lograr un modelado 3D automático de la cabeza y el cuerpo del pilón de manera efectiva. Sin embargo, la reconstrucción del pie del pilón requirió una operación interactiva. Dado que es difícil cumplir con los requisitos de reconstrucción de objetos complejos utilizando únicamente métodos basados en datos o modelos, se han propuesto métodos híbridos que combinan los dos métodos anteriores. El método adopta estrategias apropiadas según los diferentes requisitos de modelado estructural, lo que puede mejorar la precisión del modelado. Zhou y cols. [18] dividió el pilón en cabeza y cuerpo. Reconstruyeron el cuerpo del pilón mediante una estrategia basada en datos y la cabeza mediante una estrategia basada en modelos con la ayuda de una biblioteca de modelos de cabeza 3D predefinida. Este método puede reconstruir con precisión la estructura original de los pilones, pero no puede manejar de manera efectiva pilones que contengan estructuras más complejas.

Para resolver los problemas de los métodos de modelado anteriores, en este artículo se utilizan los tipos de torres y la información de parámetros necesaria obtenida de nubes de puntos 3D para reconstruir las torres .

Los métodos existentes para identificar los tipos de pilones se clasifican principalmente en métodos basados en reglas y métodos de aprendizaje automático [19]. Para el primer método, las características se extraen de las nubes de puntos de los pilones y luego se identifican los tipos de pilones según la diferencia de las características. Qiao y cols. [20] colocaron en capas las nubes de puntos de la cabeza del pilón y luego calcularon la tasa de relleno vertical para cada capa individual. Clasificaron las torres en dos tipos según la posición de la capa con la mayor tasa de llenado. Chen et al. [21] segmentaron las nubes de puntos de la cabeza del pilón en función de las características de distribución de puntos y luego las proyectaron en el plano Y0Z0 para crear una imagen. La imagen del contorno de la cabeza del pilón se adquirió integrando el método de procesamiento de imágenes. Finalmente, el tipo de pilón se determinó en función de la cantidad de píxeles dentro del contorno. Aunque los dos métodos anteriores pueden distinguir los pilones, los tipos de pilones que se pueden identificar son muy limitados. Silva F. et al. [22] propuso una metodología de clasificación basada en la similitud. Utilizaron métricas de distancia de nubes de puntos para medir la similitud entre las nubes de puntos de los pilones y los modelos de referencia básicos, logrando una clasificación de los pilones basada en diferencias de distancia.

Este método requiere manejar grandes cantidades de datos y es sensible a las fluctuaciones en la densidad de los puntos de muestreo. Para el segundo método, la identificación de los tipos de torres se realiza basándose en el algoritmo de aprendizaje automático. Zhou y cols. [18] definieron por primera vez una biblioteca de modelos parametrizados en 3D de cabezas de pilones. Luego, los tipos de cabezas de los pilones se identificaron mediante el algoritmo de contexto de forma y se utilizó un algoritmo de recocido simulado para estimar los parámetros relevantes de las cabezas de los pilones. Chen et al. [23] extrajeron características basadas en histogramas de elevación de puntos y proyección frontal, y finalmente utilizaron el método de clasificación de la máquina de vectores de soporte (SVM) para entrenar y clasificar muestras de vectores de característic

Machine Translated by Google

Se utilizó un algoritmo para estimar los parámetros relevantes de las cabezas de los pilones. Chen et al. [23] extrajeron características basadas en histogramas de elevación de puntos y proyección frontal, y finalmente utilizaron el método de clasificación de la máquina de vectores de soporte (SVM) para entrenar y clasificar muestras de vectores de características de la cabeza. Wang y cols. [24] proyectaron puntos de contorno internos y externos en imágenes rasterizadas para extraer características del histograma de gradiente orientado (HOG). Luego, Wang et al. [24] utilizaron puntos de contorno internos y externos proyectados en imágenes rasterizadas para extraer el histograma de gradiente orientado (HOG). Luego, los utilizaron como insumos para el clasificador SVM para la identificación de tipos. Sin embargo, cuando aparece el algoritmo procesa conjuntos de datos a gran escala, puede llevar más tiempo entrenarlo debido a su complejidad computacional y requisitos de almacenamiento.

En resumen, los métodos actuales para identificar tipos de torres adolecen de requisitos de almacenamiento y de la alta complejidad computacional y largos tiempos de entrenamiento. Además, no existe un método adecuado para el cálculo de los parámetros de las nubes de puntos de los postes. Para solucionar la complejidad computacional antes mencionada y los largos tiempos de formación. Además, no existe ningún método adecuado para identificar tipos de torres basado en el cálculo de los parámetros de las nubes de puntos de las torres. Para solucionar lo antes mencionado problemas, este estudio propone un método mejorado para identificar tipos de torres basado en el cálculo de los estudio propone un método mejorado para identificar tipos de pilones basado en parámetros característicos de problemas de pilones, este flujo de procesamiento de datos y un nuevo método de cálculo de parámetros característicos del pilón. nubes de puntos. ¡Error! Fuente de referencia no encontrada. La Figura 1 muestra la medición de la similitud del gráfico de este artículo. En primer lugar, las nubes de puntos se preprocesan con nubes de puntos de media cero. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo de procesamiento de datos de este artículo. En primer lugar, el punto normalización, desplazamiento y redirección de media cero antes de normalización, cambio y redirección antes de obtener la información del pilón. Las nubes se preprocesan con Se obtiene la información del pilón. En segundo lugar, los tipos de pilones se identifican calculando la forma generadas en función de las nubes de puntos y las curvas dentro del conjunto de datos. Luego, las posiciones características del pilón se determinan en función de las nubes de puntos y las curvas dentro del conjunto de datos. Luego, las posiciones características del pilón se determinan en función número, densidad, tasa de llenado y parámetro de forma. En el caso de obtener estas posiciones , los puntos la densidad, la tasa de llenado y el parámetro de forma de las nubes de puntos calculadas. En el característicos se derivan de las nubes de puntos para calcular la característica y calcular los parámetros los puntos característicos se derivan de las nubes de puntos para calcular la característica y calcular los parámetros característicos. Finalmente, los modelos 3D del pilón se reconstruyen en parámetros. Finalmente, los modelos 3D del pilón se reconstruyen sobre la base de los valores calculados. valores.

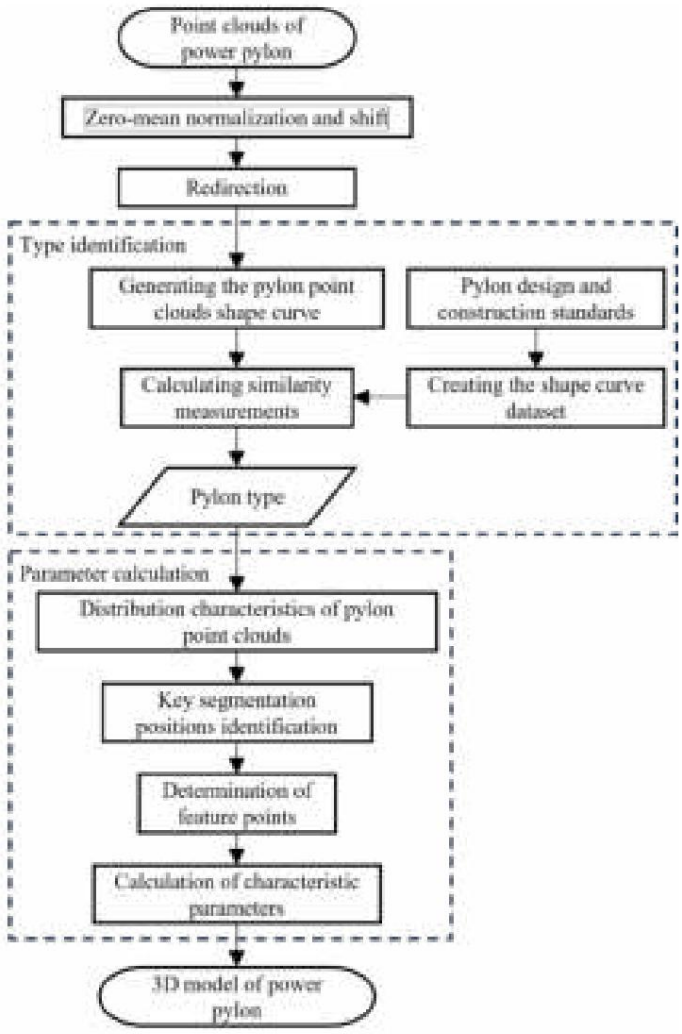


Figura 1. Diagrama de flujo general de identificación de tipos y cálculo de parámetros.

Machine Translated by Google

Las principales innovaciones y contribuciones de este estudio son las siguientes: 1. Este estudio propone un método mejorado para identificar tipos de torres basado en la medición de similitud y un conjunto de datos transformados linealmente. Al comparar los efectos de cuatro mediciones de similitud en la identificación del tipo de torre, se obtiene una medición de similitud que es más adecuada para la identificación de varios tipos de torre.
2. Se propone por primera vez un método novedoso para el cálculo automático de parámetros característicos utilizando datos LiDAR aéreos . Puede extraer eficientemente la información específica del pilón, asegurando la alta precisión de los parámetros característicos.
3. Los modelos 3D de los cuatro tipos de pilones se reconstruyen sobre la base de los tipos de pilones identificados y los parámetros calculados, que pueden reflejar con precisión la verdadera estructura de los pilones.

2. Identificación del tipo de nube de puntos de pilón basada en mediciones de similitud

En el proceso de recolección de nubes de puntos de pilones utilizando LiDAR aerotransportado, la mayoría de los puntos láser no se obtienen escaneando la superficie del objetivo verticalmente sino mediante incidencia inclinada. Por lo tanto, además de estar situadas en la parte superior del pilón, algunas de las nubes de puntos del pilón están situadas a los lados del pilón. Además, en ausencia de rutas de vuelo de vehículos aéreos no tripulados (UAV) e información geográfica espacial específica sobre las torres, es imposible determinar a qué lado pertenece Además, la estructura del pilón es generalmente compleja. Si se utilizan todas las nubes de puntos de los postes para determinar el tipo de pilón en el espacio 3D, las circunstancias antes mencionadas dificultarán la consecución de este objetivo.

Para abordar este problema de manera más efectiva, este artículo presenta curvas de forma de pilón, simplificando la identificación del tipo de pilón en un espacio 3D a la identificación de curvas en un espacio bidimensional (2D). Esta curva puede reflejar con precisión la forma del pilón. Las formas de los distintos tipos de pilones presentan diferencias significativas, y las formas de los pilones que pertenecen al mismo tipo pero de diferentes modelos son básicamente similares. Finalmente, las mediciones de similitud se combinan para determinar la semejanza entre la curva de forma derivada de las nubes de puntos del pilón y las curvas dentro del conjunto de datos, y luego se determina el tipo de pilón.

2.1. Preprocesamiento de nubes de puntos

Teniendo en cuenta que las nubes de puntos de pilón recopiladas por LiDAR aerotransportado se pueden orientar arbitrariamente en el espacio 3D, con el fin de facilitar el cálculo de la medición de similitud y el procesamiento posterior, realizamos una normalización de media cero en los datos de la nube de puntos de pilón utilizando la Ecuación (1). Luego, transformamos las coordenadas de los puntos procesados por moviéndolos a lo largo de la dirección positiva del eje Z, obteniendo las coordenadas actualizadas (x', y', z').

$$\begin{aligned} x' &= x - x0 \\ y' &= y - y0 \\ z' &= z - z0 - \min(z - z0) \end{aligned} \quad (1)$$

donde x0, y0 y z0 representan las coordenadas de la posición central de las nubes de puntos iniciales; y x y z representan las coordenadas x', y', z' de las nubes de puntos después de la normalización y el desplazamiento de media cero.

La estructura del pilón es generalmente simétrica y capturar las características de forma del pilón desde la vista frontal es más efectivo. En consecuencia, es necesario rotar las nubes de puntos del pilón en un cierto ángulo, θ, antes de generar la curva de forma del pilón, alineando su dirección horizontal perpendicular al eje X.

La dirección horizontal del pilón es generalmente más relevante para su estructura superior . En este estudio, se eligen nubes de puntos con coordenadas Z superiores a H y se proyectan en el plano XY. Posteriormente, los valores propios y vectores propios de las nubes de puntos proyectadas resultantes se calculan utilizando el algoritmo de análisis de componentes principales (PCA). El valor propio mínimo obtenido corresponde al vector propio (v1, v2) perpendicular a la orientación horizontal de la nube de puntos. Y el ángulo de rotación θ se calcula mediante

Machine Translated by Google

el plano XY. Posteriormente, los valores propios y vectores propios de las nubes de puntos proyectadas resultantes se calculan utilizando el algoritmo de análisis de componentes principales (PCA). El valor propio mínimo obtenido corresponde al vector propio (v1, v2) perpendicular a la orientación horizontal de la nube de puntos. Y el ángulo de rotación θ se calcula mediante la ecuación (2)

[20]. Finalmente, la transformación de coordenadas se realiza utilizando la Ecuación (3) para obtener coordenadas (x", y", z") de las nubes de puntos rotadas. La figura 2 muestra la proyecciones de los pilones redirigidos.

$$\theta = \arccos\left(\frac{v1}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}\right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x'' &= \bar{x}\cos(\theta) - \bar{y}\sin(\theta) \\ y'' &= \bar{x}\sin(\theta) + \bar{y}\cos(\theta) \\ z'' &= \bar{z} \end{aligned} \quad (3)$$

donde x", y" y z" representan las coordenadas de las nubes de puntos rotadas.

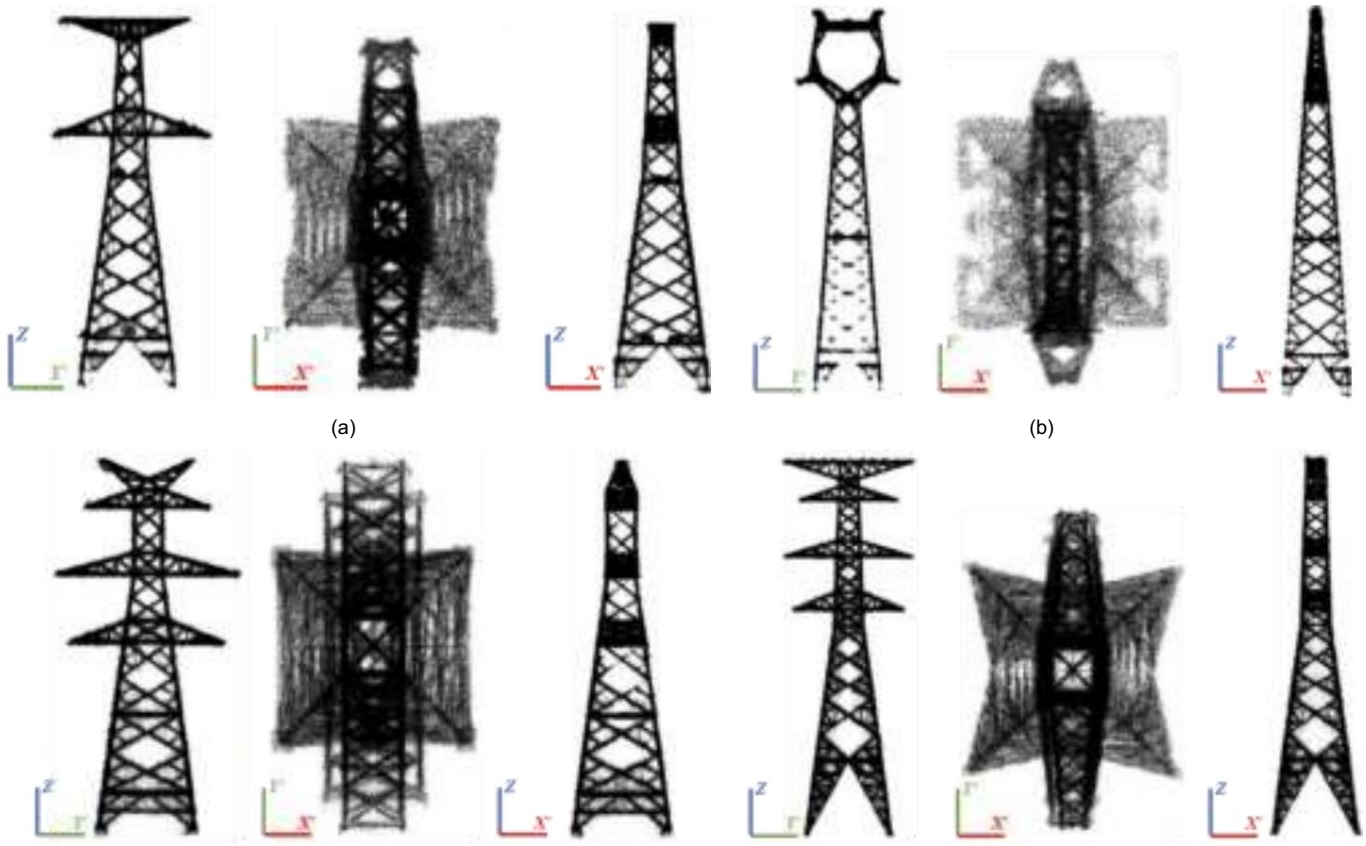


Figura 2. Proyecciones de los pilones redirigidos en los planos Y′Z, X′Y′ y X′Z. (a) Pilón tipo A. (b) Pilón tipo b. (c) Pilón tipo c. (d) Pilón tipo d.

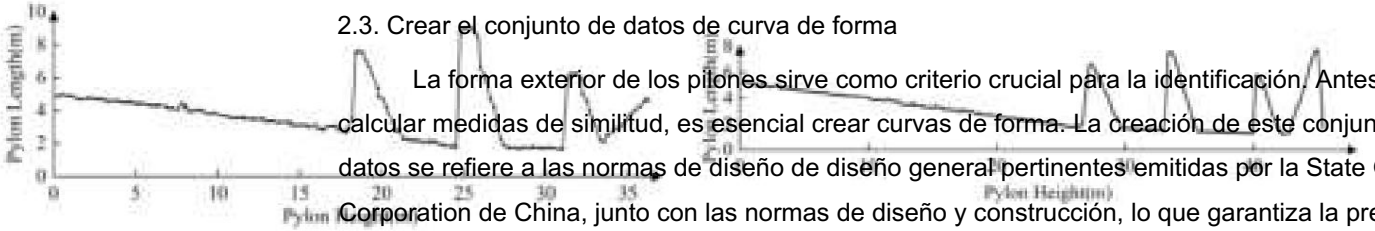
2.2. Generando la curva de forma de nube de puntos de pilón

Las nubes de puntos del pilón redirigidas se proyectan en el plano Y′Z, y luego verticalmente capas verticales a lo largo del eje Z en un cierto intervalo de h1. Los puntos límite de cada capa se colocan a lo largo de la curva de forma de la nube de puntos del pilón, como se muestra en la Figura 3 fuente de referencia no encontrado.Figura 3.

Machine Translated by Google

Figura 3. Curva de forma de nube de puntos de pilón. (a) Pilón tipo A. (b) Pilón tipo b. (c) Pilón T tipo d.

(a) (b)



(c) (d)

Curva de forma de nube de puntos de torre. (a) Pilón tipo A. (b) Pilón tipo b. (c) Pilón tipo c. (d) Pilón tipo d.

Figura 3. Curva de forma de nube de puntos de pilón. (a) Pilón tipo A. (b) Pilón tipo b. (c) Pilón tipo c. (d) Pilón tipo d.

2.3. Crear el conjunto de datos de curva de forma

La forma exterior de los pilones sirve como criterio crucial para la identificación. Antes de calcular medidas de similitud, es esencial crear curvas de forma. La creación de este conjunto de datos se refiere a las normas de diseño de diseño general pertinentes emitidas por la State Grid Corporation de China, junto con las normas de diseño y construcción, lo que garantiza la precisión y la completitud (c)

Basado en parámetros de torre comunes proporcionados por estos estándares, como la Figura 3. longitud del brazo transversal y otra información en el pilón tipo d vertical y horizontal.

Se generan curvas de forma de diferentes pilones en el conjunto de datos. Luego, el s 2.3. Crear el conjunto de datos de curva de forma

el conjunto de datos se transforma linealmente a la misma altura, como se muestra en Er. La forma

La forma exterior de los pilones sirve como criterio crucial para identificar los tipos de pilones.

Antes de calcular las medidas de similitud, es esencial crear un conjunto de datos de forma de pilón.

curvas de forma. La creación de este conjunto de datos se refiere al diseño general relevante y

estándares de diseño emitidos por State Grid Corporation de China, junto con otros estándares de pilones emitidos

de construcción, garantizando la exactitud e integridad de los datos. Residencia en

parámetros de pilón comunes proporcionados por estos estándares, como altura, longitud, ubicada

Actualmente, el conjunto de datos contiene las curvas de forma de varios estándares comunes

como pilones con cabeza de gato, pilones de cuerno de oveja y pilones de pena. Estas curvas se basan

basado en parámetros estándar. Además, teniendo en cuenta la correlación entre el número de brazos y fases de los

el número de brazos y fases del pilón y la orientación de la potencia li del conjunto de datos se transforman

línea misma altura, como se muestra en la Figura 4. Para las líneas

estas torres en torres monofásicas, bifásicas y trifásicas. Además del cálculo de la medición de

La mitad de los puntos característicos están conectados para formar una curva discreta antes de su utilización.

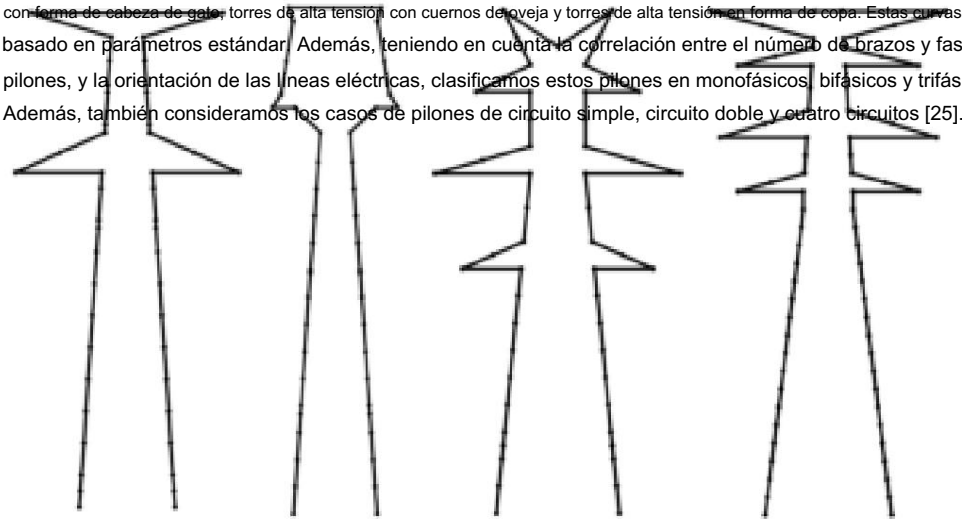
Actualmente, el conjunto de datos contiene las curvas de forma de varias torres de alta tensión comunes, como torres de alta tensión

con forma de cabeza de gato, torres de alta tensión con cuernos de oveja y torres de alta tensión en forma de copa. Estas curvas se generan

basado en parámetros estándar. Además, teniendo en cuenta la correlación entre el número de brazos y fases de los

pilones, y la orientación de las líneas eléctricas, clasificamos estos pilones en monofásicos, bifásicos y trifásicos.

Además, también consideramos los casos de pilones de circuito simple, circuito doble y cuatro circuitos [25].



Curvas de forma de algunos pilones en el conjunto de datos.

Figura 4. Figura 4. Curvas de forma de algunas torres en el conjunto de datos.

Figura 4. Curvas de forma de algunos pilones en el conjunto de datos.

Machine Translated by Google

Actualmente, el conjunto de datos contiene las curvas de forma de varias torres de alta tensión comunes, como torres de alta tensión con cabeza de gato, torres de alta tensión con cuernos de oveja y torres de alta tensión en forma de copa. Estas curvas se generan en base a parámetros estándar. Además, teniendo en cuenta la correlación entre el número de brazos y fases de los pilones, y la orientación de las líneas eléctricas, clasificamos estos pilones en monofásicos, bifásicos y trifásicos. Además, también consideramos los casos de pilones de circuito simple, circuito doble y cuatro circuitos [25].

2.4. Medidas de similitud

La curva de forma de un pilón puede proporcionar diversa información, como la forma de la cabeza del pilón, la altura del pilón y el número de crucetas. La utilización razonable de las características distintivas de los diferentes tipos de torres de alta tensión contribuirá a determinar con precisión el tipo de torre. Además, la selección de medidas de similitud es crucial para la identificación de tipos de pilones. Este estudio selecciona cuatro medidas de evaluación de similitud ampliamente utilizadas en los campos del reconocimiento de patrones y la inteligencia artificial: la distancia Dynamic Time Warping (DTW), la distancia FastDTW, la distancia discreta de Fréchet y la distancia de Hausdorff. Comparamos su efectividad en la identificación de tipos de pilones.

(1) Distancia DTW y distancia FastDTW: el algoritmo DTW se usa ampliamente para evaluar la semejanza de secuencias de tiempo con diferentes longitudes y tiene amplias aplicaciones en el campo del reconocimiento de voz [26,27]. Su enfoque principal es el siguiente.

Supongamos que hay dos secuencias de tiempo, X = {x1, x2 ,. . . , xi , . . . , xn} e Y = {y1, y2, . . . , yj , . . . , ym}. La matriz de distancias acumuladas D de X e Y se construye utilizando la distancia euclidiana. Se encuentra un camino de alabeo W en la matriz D tal que se minimiza la suma de elementos a lo largo del camino. La distancia acumulada mínima se puede calcular utilizando la ecuación (4) satisfaciendo las restricciones de monotonicidad y continuidad.

$$D(i, j) = d(xi , yj) + \min\{D(i - 1, j), D(i, j - 1), D(i - 1, j - 1)\} \quad 1 \le i \le n , \ 1 \le j \le metro \tag{4}$$

donde d(xi , yj) representa la distancia entre xi e yj . D(i, j) representa la distancia acumulada entre los pasos de tiempo xi e yj .

La distancia acumulativa mínima final se puede utilizar para evaluar la similitud de las secuencias X e Y. Un valor menor indica que las dos secuencias comparten una mayor similitud en términos de su forma; por el contrario, un valor mayor sugiere menos similitud.

Sin embargo, cuando las secuencias de tiempo son largas, la complejidad computacional de calcular la distancia DTW entre las dos secuencias es O (nm), lo que lleva a una eficiencia del algoritmo relativamente baja. En este caso, el algoritmo DTW generalmente se acelera limitando el rango de búsqueda de ruta, la abstracción de datos y la indexación. FastDTW utiliza los dos primeros métodos para acelerar DTW. Este algoritmo mejorado reduce efectivamente la complejidad temporal de DTW a O(m). FastDTW implica principalmente tres procesos: engrosamiento, proyección y refinamiento [28-30].

(2) Distancia de Fréchet discreta: la distancia de Fréchet discreta tiene en cuenta la forma de las curvas, así como la secuencia de puntos a lo largo de las curvas. Es una medida de distancia para determinar el grado de similitud entre curvas y se emplea en varios campos para medir la similitud entre curvas parametrizadas [31,32]. Su definición es la siguiente.

Si hay dos curvas poligonales X e Y que constan de myn puntos, respectivamente. Para calcular la distancia de Fréchet discreta entre X e Y, primero se encuentra la secuencia correspondiente de pares de puntos.

$$L = (xa1 , yb1), (xa2 , yb2), \cdots , (xak , ybk) \tag{5}$$

Entre ellos, a1 = 1, b1 = 1, ak = my bk = n. Y para asegurar el orden de los puntos, para cualquier i = 1,. . . , n, hay ai+1 = ai o ai+1 = ai + 1, bi+1 = bi o bi+1 = bi + 1. Luego, calculamos la distancia máxima entre los pares de puntos correspondientes.

$$L = \max_{i=1,\ldots,k} d(xai , ybi) \tag{6}$$

Machine Translated by Google

La distancia discreta de Fréchet entre X e Y se define de la siguiente manera:

$$Df(X,Y) = \min\{\quad L \quad\} \tag{7}$$

Df (X, Y) se puede utilizar para evaluar la similitud entre X e Y. La similitud de las formas entre ambas curvas aumenta a medida que el valor disminuye.

(3) Distancia de Hausdorff: La distancia de Hausdorff describe la similitud de dos subconjuntos midiendo la distancia entre ellos en el espacio [33]. Si hay dos conjuntos de puntos finitos X e Y, con longitudes n y m, respectivamente, entonces la distancia bidireccional de Hausdorff Dh (X, Y) de estos dos conjuntos de datos es:

$$\begin{aligned} Dh(X,Y) &= \max\{dh(X,Y), dh(Y,X)\}\, dh \\ (X,Y) &= \max_x \quad X\min_y \quad Y \quad x - y \\ dh(Y,X) &= \max_y \quad Y\min_x \quad X \quad y - x \end{aligned} \tag{8}$$

donde Dh (X, Y) toma el valor máximo entre dh (X, Y) y dh (Y, X). · representa la distancia euclidiana entre los conjuntos de puntos X e Y. dh (X, Y) es la distancia máxima más corta desde el punto en X hasta el conjunto Y. dh (Y, X) representa la distancia máxima más corta desde el punto en Y hasta el conjunto X.

La distancia de Hausdorff mide la disimilitud de dos conjuntos de puntos y se puede utilizar para evaluar la similitud de X e Y. Un valor menor de Dh (X, Y) indica una mayor similitud en la forma entre X e Y.

3. Cálculo de parámetros característicos de las nubes de puntos de

pilón En esta sección, primero se calculan las características de distribución de las nubes de puntos de pilón, incluido el número, la densidad y la tasa de llenado horizontal. Luego, estas características y el tipo de pilón se utilizan para identificar las posiciones clave de segmentación. Finalmente, en función de estas posiciones, los puntos característicos se derivan de las nubes de puntos para calcular los parámetros característicos.

3.1. Características de distribución de las nubes de puntos

de pilón Las nubes de puntos de pilón proyectadas en el plano Y′Z se superponen verticalmente para generar histogramas del valor característico de distribución. Luego, se utiliza una ventana deslizante para identificar capas que satisfacen simultáneamente tanto el número máximo local de nubes de puntos como la densidad máxima de nubes de puntos local. Y se calcula la tasa de llenado horizontal de estas capas . Finalmente, se identifican posiciones clave de segmentación a partir de las capas con mayor tasa de llenado.

Las nubes de puntos están dispuestas en capas a lo largo del eje Z con un intervalo fijo h1. El número de puntos de pilón y el tamaño espacial de cada capa se calculan y utilizan para obtener el grado de distribución de las nubes de puntos en cada capa, es decir, la densidad de la nube de puntos. Para considerar completamente el número de puntos de los pilones y la densidad de la nube de puntos, los dos parámetros están estandarizados. La suma De de los dos parámetros obtenidos después del procesamiento se utiliza como valor característico de distribución de las nubes de puntos del pilón. Luego, una ventana con altura h2 se desliza hacia arriba desde la parte inferior del pilón en un intervalo fijo h1. Si el valor De de la capa en el medio de la ventana es mayor que el valor De de otras capas en la ventana durante el proceso de deslizamiento, la capa se considera la que satisface simultáneamente tanto el número máximo local de nubes de puntos como el densidad máxima de nube de puntos local , como se muestra en la Figura 5 (líneas amarillas).

En el análisis práctico, no todas las capas con las dos características anteriores son capas clave necesarias para cálculos posteriores. Los valores máximos N1 superiores se seleccionan para filtrar aún más las capas aquí. Posteriormente, se pueden determinar las capas importantes calculando la tasa de llenado de cada capa. El proceso de cálculo específico de la tasa de llenado es el siguiente: las capas importantes se dividen en N2 cuadrículas con un espaciado fijo L1 a lo largo del eje Y′ , y la proporción de cuadrículas que contienen puntos n con respecto al recuento total de N2 cuadrículas se define como la tasa de llenado f, como se muestra en la Figura 6.

Machine Translated by Google

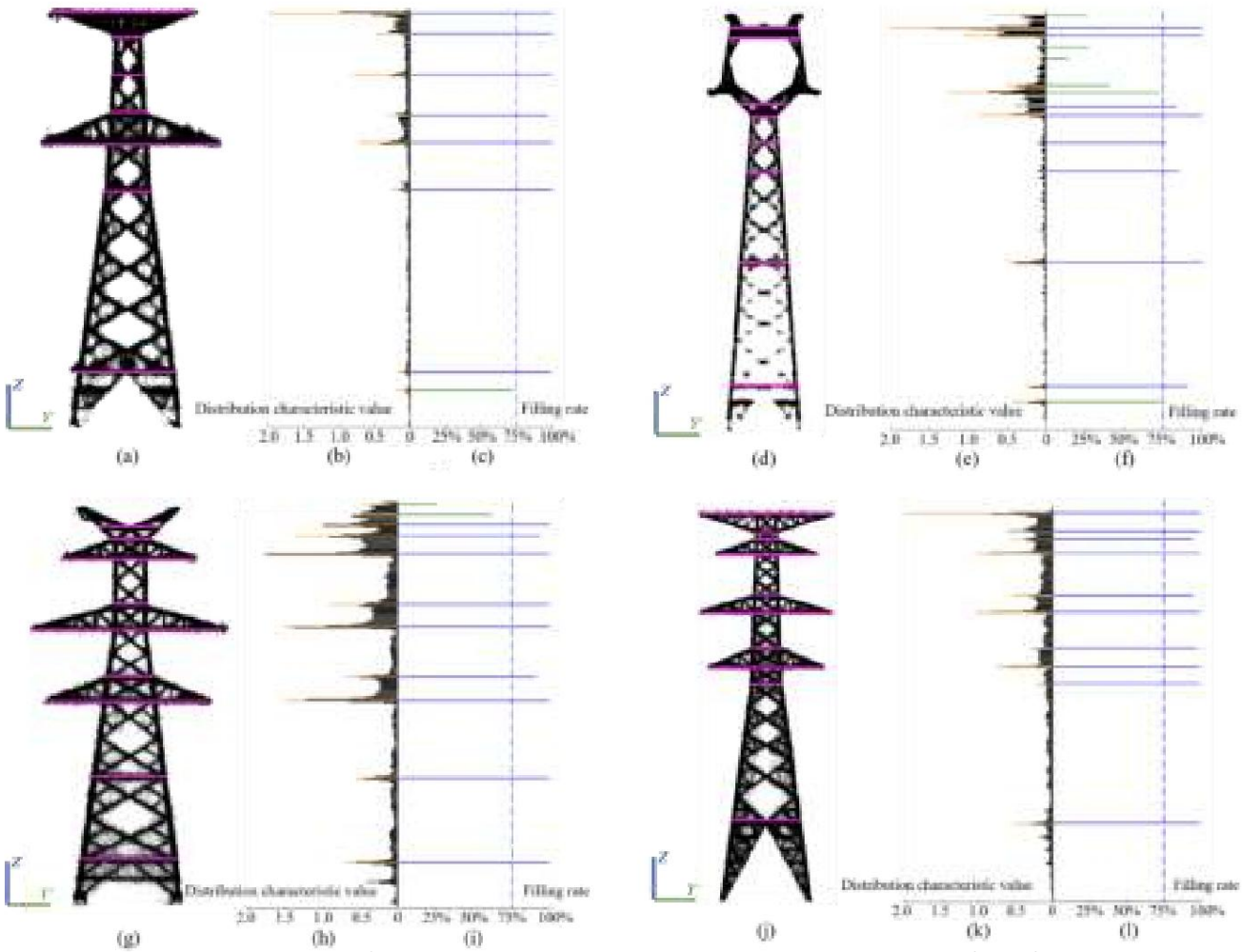


Figura 5. Características de distribución de las nubes de puntos de torres. (a,d,g,j) Las proyecciones de t en el plano Y'Z'. (b,e,h,k) Histogramas de valores característicos de distribución y las líneas amarillas son capas con máximo local de densidad de puntos. (c,f,i,l) Los histogramas de tasas de llenado y las líneas azules son las posiciones clave de segmentación.

Figura 5. Características de distribución de las nubes de puntos de torres. (a,d,g,j) Las proyecciones de t en el plano Y'Z'. (b,e,h,k) Histogramas de valores característicos de distribución y las líneas amarillas son capas con máximo local de densidad de puntos. (c,f,i,l) Los histogramas de tasas de llenado y las líneas azules son las posiciones clave de segmentación.

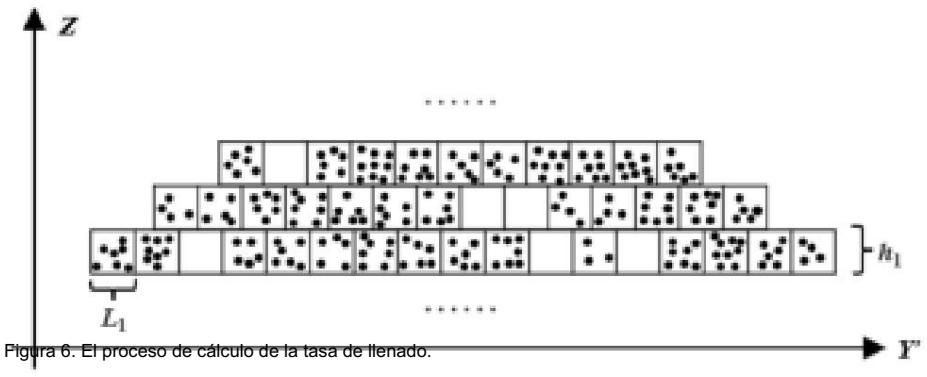


Figura 6. El proceso de cálculo de la tasa de llenado.

Figura 6. El proceso de cálculo de la tasa de llenado.

3.2. Identificación de posición de segmentación clave

La tasa de llenado f de la posición de segmentación clave esperada (líneas amarillas) se calcula en el apartado anterior. Cuando la tasa de llenado de una capa supera el umbral predefinido Tf, la posición de segmentación clave S se puede describir como la coordenada Z promedio de todas las capas dentro de la capa, como se muestra en la Figura 5 (líneas azules). Para pilones tipo a y pilones tipo d, todas las posiciones de segmentación clave pueden identificarse directamente mediante el método antes mencionado. Sin embargo, para los otros dos tipos de Tf, la posición de segmentación clave S se puede describir como los puntos de coordenadas Z promedio dentro de la capa, como se muestra en la Figura 5 ¡Error! Fuente de referencia, no de líneas). Para pilones tipo a y pilones tipo d, todas las posiciones de segmentación clave se identifican directamente utilizando el método antes mencionado. Sin embargo, para el otro

Machine Translated by Google

pilones, además de las posiciones obtenidas como se describe anteriormente, se requiere un adicional para determinar otras posiciones de segmentación clave.

Para el pilón tipo b, primero consideramos el contorno exterior. Debido a la sección hueca en la capa que contiene los pilones tipo d de posición del aislador de conexión, todas las posiciones de segmentación clave se pueden identificar directamente utilizando el pilones, la tasa de llenado de esta parte es relativamente baja y, por lo tanto, no es consistente con el método antes mencionado. Sin embargo, para los otros dos tipos de torres, además de las posiciones se describe anteriormente, se requieren enfoques adicionales para determinar otras claves. posición de segmentación. Teniendo en cuenta que la forma proyectada de la estructura se obtuvo como sa.

La cabeza del pilón de este tipo de pilón varía con la altura en el plano X′Y′, las posiciones de segmentació

Para el pilón tipo b, primero consideramos el contorno exterior. Debido a la presencia de Aquí se presenta Gi para identificar mejor las posiciones clave de segmentación. Esta parte es una sección hueca en la capa que contiene la posición del aislante de conexión para el tipo: la relación de la longitud máxima de proyección de las nubes de puntos en los pilones X′ an b, la tasa de llenado de esta parte es relativamente baja y, por lo tanto, no se considera como una llave valor mínimo. La suma de G1 y la constante de error Ce sirve como posición de segmentación t. Considerando que la forma proyectada de la estructura sobre el

La cabeza del pilón de este tipo de pilón varía con la altura en el de forma Aquí se presenta Gi para identificar mejor las posiciones clave de segmentación. Este parámetro define entre la longitud máxima de proyección de las nubes de puntos en los ejes X′ e Y′ y la mínimo. La suma de G1 y la constante de error Ce sirve como umbral TG para el parámetro de forma. A partir de G1, cada Gi se compara secuencialmente con el umbral a TG, la capa de nube de puntos correspondiente a Gi-1 es la segmentación posiciones con tasas de llenado más bajas por encima de la posición de segmentación Si-1 entre la cabeza del pilón y el cuerpo del pilón, como se muestra en la Figura 7 (línea roja). Posiciones de segmentación que soportan las líneas de conexión. Además, A través de la observación, se puede encontrar que las dos posiciones de segmentación con menor relleno Las tasas por encima de la posición de segmentación son las posiciones de segmentación clave que respaldan la posiciones de segmentación debajo de la posición de segmentación con líneas de conexión de tasa de llenado. Además, las dos posiciones de segmentación debajo de la segmentación No es necesario considerar los requisitos, y este procesamiento no afectará la posición con tasas de ocupación que cumplan con los requisitos, y esto cálculo de parámetros. El procesamiento no afectará el cálculo de parámetros posterior.

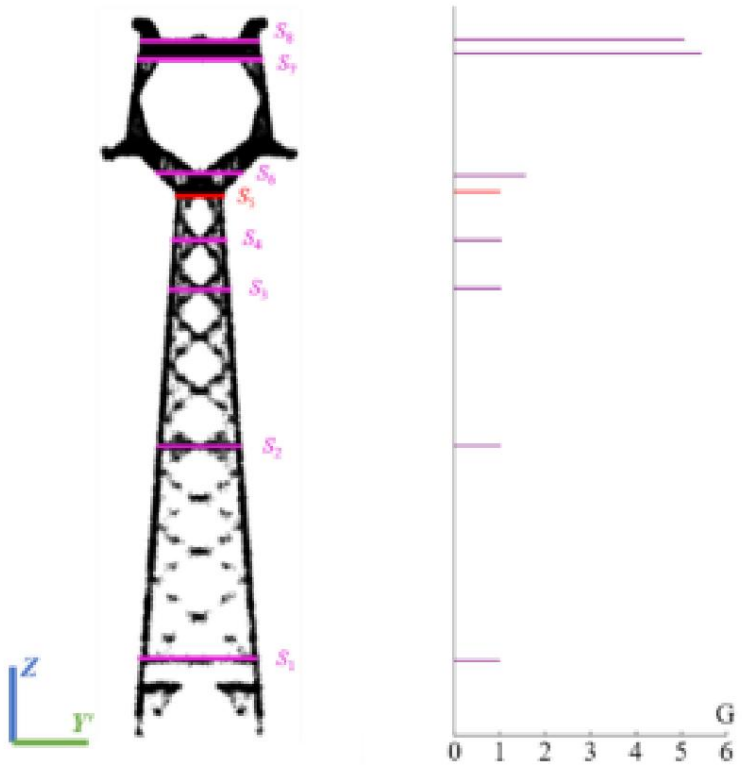


Figura 7. Parámetros de forma del pilón tipo b.

Figura 7. Parámetros de forma del pilón tipo b.

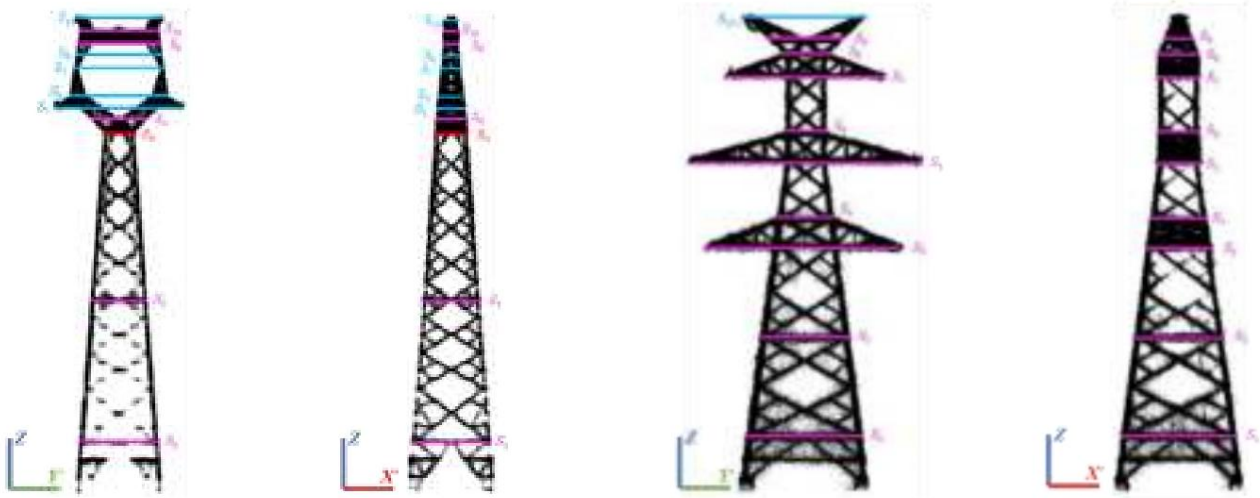
Antes de modelar los pilones tipo b, es imprescindible obtener las dimensiones de sus Estructuras huecas internas. De la Figura 6, es evidente que la posición hueca se encuentra entre clave S5 del cuerpo del pilón y la posición de segmentación clave

Antes de modelar los pilones tipo b, es imprescindible obtener la posición de segmentación Estructuras huecas internas. De la Figura 6 ¡Error! Fuente de referencia no encontrada S7 de la cabeza del pilón. Además, hay tasas de llenado relativamente más bajas en las posiciones de segmentación de clave dentro de la estructura hueca en comparación con las posiciones antes Combinando la relación posicional y las características de distribución de la nube de puntos, la clave y la posición de segmentación clave S7 de la cabeza del pilón. Además, se pueden identificar otras posiciones de segmentación en la estructura hueca.
tasas de llenado más bajas en las posiciones clave de segmentación dentro de la estructura hueca a las posiciones antes mencionadas. Combinando la relación posicional y las características de distribución, se identifican las posiciones clave de segmentación en los huecos.

Para el pilón tipo b y el pilón tipo c, se puede encontrar que

Machine Translated by Google

Para el pilón tipo b y el pilón tipo c, se puede encontrar que la segmentación
La posición en la parte superior del pilón no ha sido identificada debido a la baja tasa de llenado del
nubes de puntos observando la Figura 5, y debe considerarse por separado. El más alto
entre las posiciones de segmentación clave esperadas que no alcanzan el umbral de tasa de ocupación
El requisito se puede elegir como una de las posiciones clave de segmentación. Finalmente, todas las claves.
y se puede obtener el pilón tipo c como se muestra en la Figura 8. ¡Error! Se pueden obtener la fuente de referencia, no las
posiciones de segmentación del pilón tipo b y del pilón tipo c, como se muestra
encontré.
en la Figura 8.



(a) (b)

Figura 8. Las posiciones clave de segmentación del pilón. (a) Pilón tipo b. (b) Pilón tipo c.
Figura 8. Las posiciones clave de segmentación del pilón: (a) Pilón tipo b; (b) Pilón tipo c.

3.3. Determinación de puntos característicos
3.3. Determinación de puntos característicos

El objetivo principal de determinar los puntos característicos de los pilones es calcular mejor varios
El objetivo principal de determinar los puntos característicos de los pilones es calcular mejor varios parámetros de pilones
parámetros de pilones desconocidos, como la altura de los pilones, la longitud de los brazos transversales, el espacio entre las
desconocidos, como la altura de los pilones, la longitud de los brazos transversales, el espacio entre las patas de los pilones, etc. Este estudio elige puntos en los límites de las posiciones de segmentación clave del pilón como puntos característicos. Los
etc. Este estudio elige puntos en los límites de las posiciones de segmentación clave de los pilones como
puntos característicos. Los cuatro tipos de torres consideradas en este estudio tienen las mismas estructuras de torre y patas de
cuatro tipos de pilones considerados en este estudio tienen el mismo cuerpo de pilón.
Estructuras de cuerpo y patas de pilón. Estos puntos característicos son suficientes para calcular lo requerido para
torre. Estos puntos característicos son suficientes para calcular los parámetros requeridos.
parámetros para estas dos estructuras. Sin embargo, cada tipo de torre tiene una estructura compleja y de cabeza,
estas dos estructuras. Sin embargo, cada tipo de pilón tiene un pilón complejo y único.
Estructura única de la cabeza del pilón, que requiere la identificación de puntos característicos adicionales para los parámetros
lo que requiere la identificación de puntos característicos adicionales para calcular la
Calcule los parámetros relevantes de la cabeza del pilón.
relevantes de la cabeza del pilón.

Tomando el pilón tipo b como ejemplo para presentar la estrategia de selección de puntos característicos,
Tomando el pilón tipo b como ejemplo para introducir la selección de puntos característicos, la posición
estrategia, la posición seleccionada de los puntos característicos del pilón tipo b se muestra en la Figura donde los puntos naranjas
seleccionada de los puntos característicos del pilón tipo b se muestra en la Figura 9, en
9 ¡Error! Fuente de referencia no encontrada., en el que los puntos naranjas representan las posiciones de segmentación de
representan los puntos característicos obtenidos junto con la clave
y el cuerpo del pilón. La coordenada del eje Z se puede determinar mediante
puntos obtenidos en conjunto con las posiciones clave de segmentación. Punto 25, como se indica entre la cruceta
En la figura, representa el punto de conexión
Cruceta y el cuerpo del pilón. identificando su posición característica.
La coordenada del eje Z se puede determinar identificando su posición característica. de los puntos 11, 12 y 26 se pueden obtener
Como se muestra en la figura, el punto 27 y el punto
de esta manera. Respecto al punto 7 y al punto 8, las nubes de puntos entre el punto moviéndose desde el
Coordenada del eje Y". De manera similar, se selecciona la información de coordenadas en el intervalo del punto 11,
el punto 12 y el punto 26 , y se selecciona el punto con la coordenada máxima del eje Z en cada capa. Entonces,
se puede obtener de esta manera. Respecto al punto 7 y al punto 8, las nubes de puntos entre el punto moviéndose desde el
1 y el punto 2 se superponen a lo largo del eje Y" con un cierto intervalo, y se encuentra el punto
punto 1 y el punto 2 hacia el medio mediante una ventana deslizante. los primeros puntos
con las coordenadas del eje Z ubicado en la posición de segmentación clave S10 . Estos dos
Se selecciona la coordenada máxima del eje Z en cada capa. Luego, pasando del punto 1, los puntos se identifican como el punto
7 y el punto 8, como lo indican los marcadores rojos en la Figura 10.
2 hacia el medio por una ventana deslizante, los primeros puntos con coordenadas del eje Z ubicados En total, es necesario
determinar 36 puntos característicos para el pilón tipo a, mientras que el tipo b,
en la posición de segmentación clave S10 se encuentran. Estos dos puntos se identifican como punto 7 y punto 8, como lo indican
Los pilones tipo c y tipo d requieren 63, 51 y 52 puntos característicos, respectivamente.
los marcadores rojos en la Figura 10 ¡Error! Fuente de referencia no encontrada..

En total, es necesario determinar 36 puntos característicos para el pilón tipo a, mientras que el tipo

Los pilones b, tipo c y tipo d requieren 63, 51 y 52 puntos característicos, respectivamente.

Machine Translated by Google

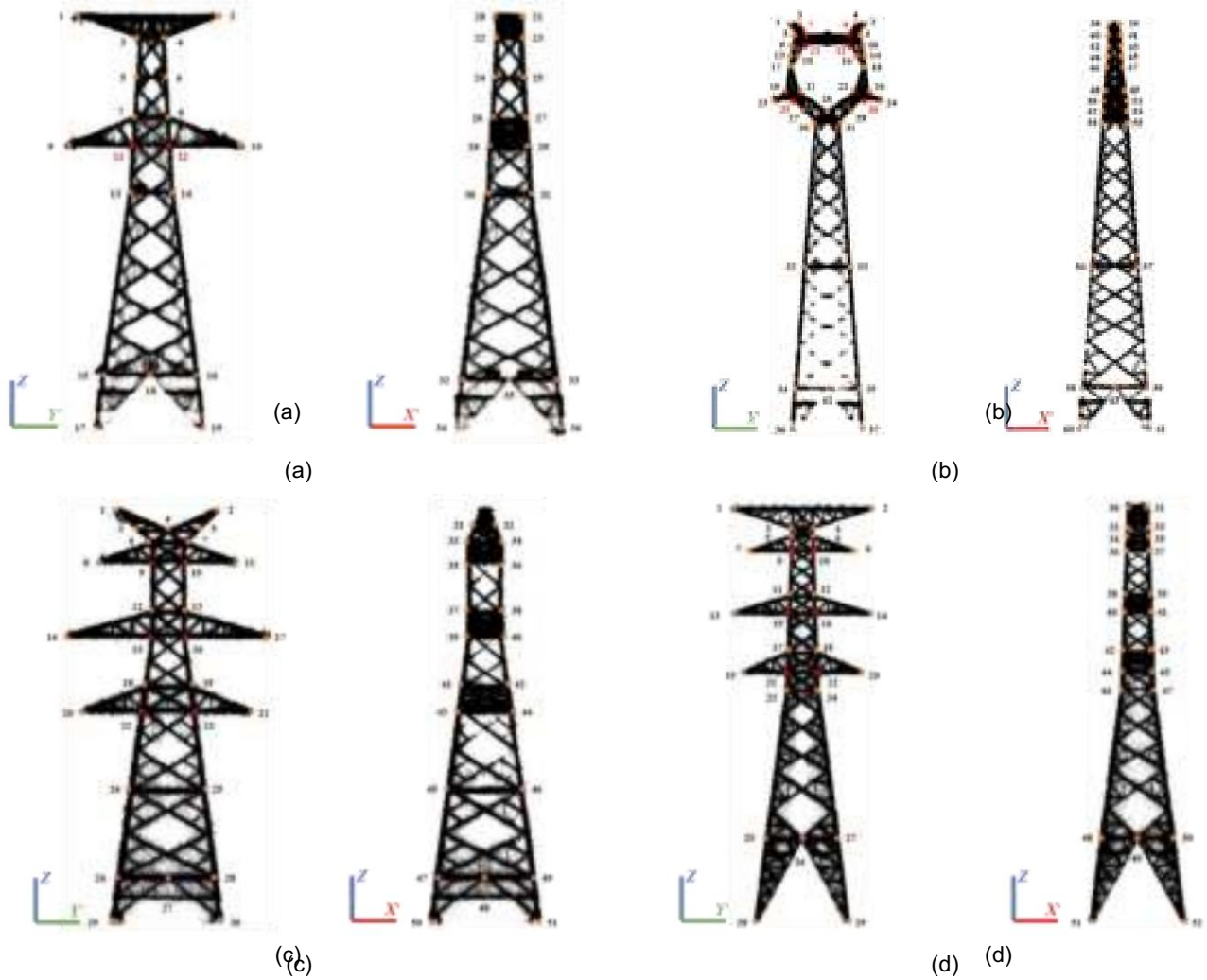


Figura 9. Los puntos y números característicos del pilón, y los puntos rojos son los puntos característicos obtenidos por Pilón tipo A. (b) Pilón tipo b. (c) Pilón tipo c. (d) Pilón tipo d.

Figura 9. Los puntos y números característicos del pilón, y los puntos rojos son los puntos característicos obtenidos mediante la
Figura 9. Los puntos y números característicos del pilón, y los puntos rojos son los puntos característicos obtenidos por
Pilón tipo A. (b) Pilón tipo b. (c) Pilón tipo c.
(d) Pilón tipo d.

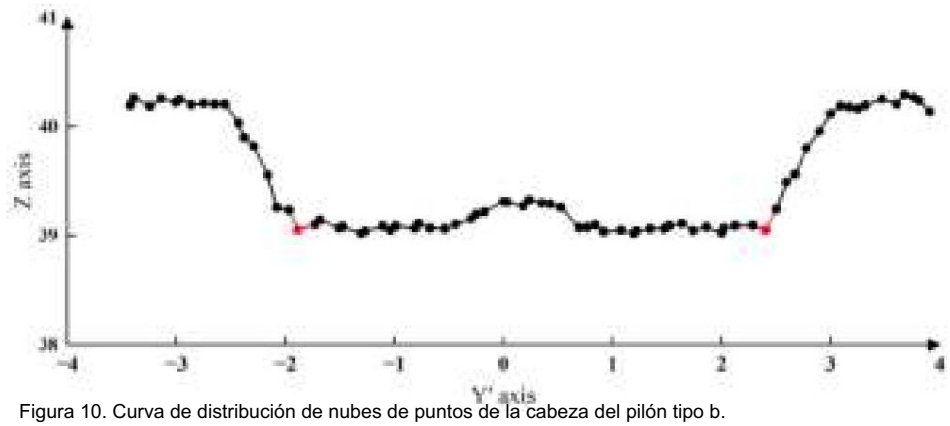


Figura 10. Curva de distribución de nubes de puntos de la cabeza del pilón tipo b.

Figura 10. Curva de distribución de nubes de puntos de la cabeza del pilón tipo b.

3.4. Cálculo de parámetros característicos.

3.4. Cálculo de parámetros característicos.

Con base en la información de coordenadas de los puntos característicos, los parámetros característicos se calculan desde las perspectivas de alto, largo y ancho. Este estudio toma en base a la información de coordenadas de los puntos característicos para describir un pilón como ejemplo para introducir los parámetros que deben calcularse. Se calculan los parámetros mediante el cálculo de la altura de la cabeza del pilón. La diferencia de coordenadas verticales entre el punto 20 y el punto 3 representa la altura de la cabeza del pilón. La diferencia de coordenadas verticales entre el punto 30 y

Según la información de coordenadas de los puntos característicos, los parámetros característicos
perspectivas de coordenadas de los puntos característicos. Estos parámetros se calculan desde las
describa un pilón como ejemplo para introducir los parámetros que deben calcularse. Se calculan
los parámetros mediante el cálculo de altura y ancho. Este estudio toma el pilón tipo A como ejemplo para introducir
En términos de altura, la diferencia de coordenadas verticales entre el punto 20 y el punto 30. En
términos de altura, la diferencia de coordenadas verticales entre el punto 20 y el punto 3 representa
la cabeza del pilón. La diferencia de coordenadas verticales entre el punto 30 y en términos de la altura de
altura, la diferencia de coordenadas verticales entre el punto 20 y el punto 3 representa la altura de la cabeza
del pilón. La diferencia de coordenadas verticales entre el punto 30 y

Machine Translated by Google

la altura de la cabeza del pilón. La diferencia de coordenadas verticales entre el punto 30 y el punto 32 representa la altura del cuerpo del pilón y la diferencia entre el punto 32 y el punto 34. representa la altura del tramo del pilón. En cuanto a la longitud, la longitud del brazo transversal de la línea de tierra puede obtenerse midiendo la diferencia de coordenadas horizontales entre el punto 1 y el punto 2, mientras que la longitud de la cruceta está determinada por la diferencia entre el punto 9 y el punto 10. Además, la diferencia de coordenadas horizontales entre el punto 17 y el punto 19 representa el espacio entre las patas del pilón. En cuanto al ancho, para puntos proyectados sobre el plano X′Z , calcular la diferencia de coordenadas horizontales de los puntos a la misma altura puede proporcionar los parámetros de ancho requeridos.

4. Experimentos

En esta sección, los datos y parámetros utilizados en el experimento se introducen primero en Sección 4.1, y luego la precisión de la identificación del tipo de torre y el parámetro de característica El cálculo se enumera, respectivamente, en las Secciones 4.2 y 4.3. Finalmente, la reconstrucción 3D. Los modelos de las torres se muestran en la Sección 4.4.

4.1. Introducción de parámetros y datos experimentales

Este estudio obtuvo datos de nubes de puntos utilizando la plataforma de vuelo DJI M300RTK con el Módulo LiDAR Livox L1 integrado. Se muestran los parámetros básicos de los datos LiDAR. en la Tabla 1. Los datos LiDAR recopilados comprenden no solo las coordenadas 3D de los puntos sino también su información de color RGB. Los datos cubren corredores de transmisión de energía con niveles de voltaje de 110 kV y 220 kV en la provincia de Hubei y la provincia de Sichuan. En orden Para facilitar el progreso de este estudio, los datos se segmentaron utilizando el código abierto. software CloudCompare 2.13 para obtener los datos de la nube de puntos del pilón.

Tabla 1. Parámetros básicos de los datos LiDAR.

Densidad de puntos	Precisión horizontal	Precisión vertical
>100 pts/m2	10 centímetros	5 centímetros

Los programas para la identificación del tipo de torre y el cálculo de parámetros fueron escritos en Python y ejecutarlo en una computadora portátil. La información de configuración de la computadora portátil se muestra en la Tabla 2. Los datos de la nube de puntos de pilón obtenidos mediante segmentación se procesaron utilizando el método propuesto en este trabajo. Los parámetros involucrados en el procesamiento se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2. Información de configuración de la computadora portátil.

Computadora portátil	UPC	GPU	RAM
Lenovo Legión R9000P 2023 AMD Ryzen 9 7945HX	NVIDIA RTX 4060		16 GB

Tabla 3. Configuración de parámetros.

Parámetros	Significado	Valores
h	Altura mínima de las nubes de puntos para la redirección.	(3/4) ×la altura del pilón
h1	El intervalo de capa a lo largo de la dirección del eje Z.	0,1 metros
h2	La altura de la ventana corredera.	1,1 metros
L1	El intervalo de la cuadrícula a lo largo de la dirección del eje Y′	0,1 metros
tf	El umbral de la tasa de llenado.	75%
ce	Constante de error	0,5
N1 (tipo-a)	El número seleccionado de capas clave.	8
N1 (tipo b)		14
N1 (tipo-c)		11
N1 (tipo-d)		10

Machine Translated by Google

4.2. Precisión de la identificación del tipo de pilón

Se emplean cuatro medidas diferentes de evaluación de similitud, a saber, distancia DTW, distancia FastDTW, distancia discreta de Fréchet y distancia de Hausdorff, para la identificación del tipo de pilón utilizando el método descrito en la sección anterior. Esta sección utiliza dos tipos de conjuntos de datos de curvas de forma para realizar los experimentos. Uno es el conjunto de datos obtenido directamente en función de la información del dibujo y el otro es el conjunto de datos obtenido escalando linealmente el conjunto de datos anterior a la misma altura. Finalmente, se obtuvieron los resultados de identificación del tipo de pilón de las cuatro mediciones de evaluación de similitud.

Para evaluar exhaustivamente el rendimiento de identificación de las diversas medidas de similitud, este estudio utilizó precisión, recuperación y puntuación F como tres índices para analizar los resultados experimentales [25].

La precisión se refiere a la proporción de pilones que se predice que pertenecen a un determinado tipo que realmente pertenecen a ese tipo en el experimento.

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \times 100\% \tag{9}$$

La recuperación se refiere a la proporción de torres de un determinado tipo que, en última instancia, se predice que pertenecen a ese tipo.

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \times 100\% \tag{10}$$

donde TP es el número de muestras que se considera que pertenecen a un determinado tipo de torre y que realmente pertenecen a ese tipo; FP es el número de muestras que se considera que pertenecen a un determinado tipo de torre pero que en realidad pertenecen a otros tipos; y FN es el número de muestras de un determinado tipo de torre que se determina que son de otros tipos.

La puntuación F se refiere a la media armónica de precisión y recuperación, y se utilizó como Índice de evaluación general del rendimiento de identificación de torres en este estudio.

$$F = \frac{2P \times R}{P + R} \times 100\% \tag{11}$$

Cuanto mayores sean los valores de estos tres índices de evaluación, mejor será el rendimiento de identificación de la medición de similitud. Para los cuatro tipos de pilones en este estudio, los resultados de identificación del tipo de pilón utilizando diferentes métodos de evaluación de similitud se muestran en la Figura 11.

Utilizando el conjunto de datos original para el cálculo, con respecto a la precisión, la distancia DTW y la distancia FastDTW exhibieron la precisión más alta tanto para el pilón tipo a como para el pilón tipo b. Para el pilón tipo c, la precisión de la distancia discreta de Fréchet fue del 89,7%, que fue significativamente mayor que las otras tres mediciones de similitud. Para el pilón tipo d, las cuatro mediciones de similitud fueron básicamente equivalentes. En términos de recuperación, para el pilón tipo a y el pilón tipo b, la distancia de Hausdorff y la distancia discreta de Fréchet arrojaron resultados ligeramente superiores. Para el pilón tipo c, la recuperación de las cuatro mediciones de similitud fue de alrededor del 76%. Para el pilón tipo d, los resultados de las cuatro mediciones de similitud fueron relativamente más bajos en comparación con los otros tres tipos.
Teniendo en cuenta el índice de evaluación general del rendimiento del algoritmo, para el pilón tipo a, las cuatro mediciones de similitud arrojaron resultados similares, con la distancia de Hausdorff ligeramente inferior. Para el pilón tipo b, las puntuaciones F de las cuatro mediciones de similitud estuvieron por debajo del 66 %, lo que indica un rendimiento de identificación deficiente. Para el pilón tipo c, la puntuación F de la distancia discreta de Fréchet fue del 83,8%, que fue mejor que otras mediciones de similitud. Para el pilón tipo d, la distancia DTW y la distancia FastDTW arrojaron puntuaciones F ligeramente más altas.

Machine Translated by Google

La puntuación de la distancia de Hausdorff fue mayor que la de las otras tres mediciones.

En resumen, al identificar el tipo de nubes de puntos de pilón, utilizando el conjunto de datos ordinario para el cálculo, la distancia discreta de Fréchet exhibió el mejor índice de evaluación general, con una puntuación F promedio del 76,4%. Utilizando el conjunto de datos transformado mediante escala lineal para el cálculo, el índice de evaluación general de la distancia de Hausdorff fue el mejor, con una puntuación F promedio del 86,4%.

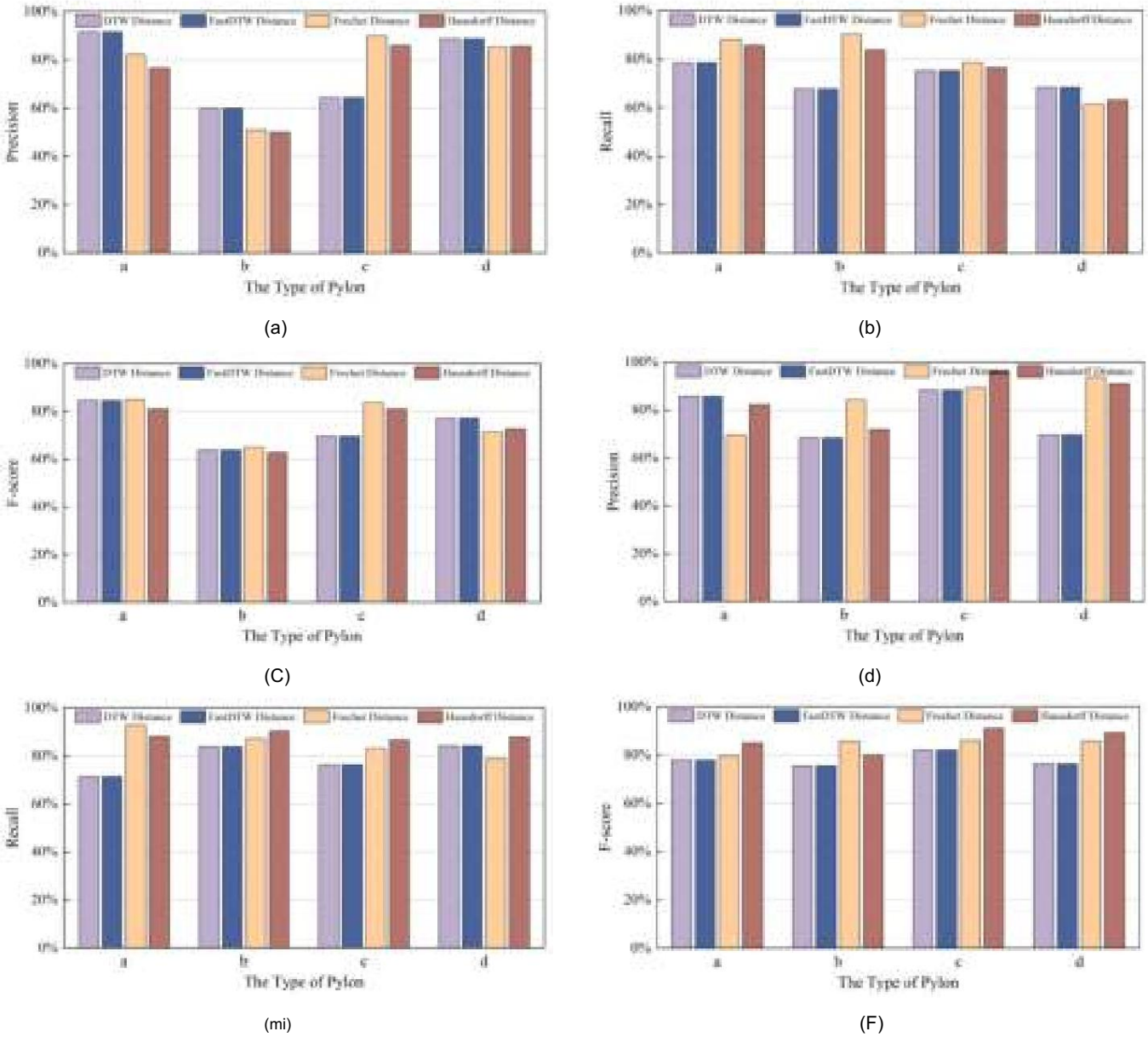


Figura 11. Resultados de identificación de tipos de pilones utilizando diferentes medidas de similitud. (a) Figura 11. Resultados de identificación de tipos de torres utilizando diferentes medidas de similitud. (a) La precisión de cuatro mediciones de similitud (conjunto de datos original). (b) El recuerdo de cuatro similitudes de cuatro mediciones de similitud (conjunto de datos original). (b) El recuerdo de cuatro medidas de similitud mediciones (conjunto de datos original). (c) La puntuación F de cuatro mediciones de similitud (conjunto de datos original). (conjunto de datos originales). (c) La puntuación F de cuatro mediciones de similitud (conjunto de datos original). (d) La precisión (d) La precisión de cuatro mediciones de similitud (conjunto de datos transformados linealmente). (e) La recuperación de cuatro mediciones de similitud (conjunto de datos transformados linealmente). (f) La puntuación F de cuatro pruebas de similitud (conjunto de datos transformados linealmente). (f) La puntuación F de cuatro mediciones de similitud (linealmente mediciones (conjunto de datos transformados linealmente) conjunto de datos transformado).

Usando el conjunto de datos transformado por escala lineal para el cálculo, las cuatro similitudes Las mediciones mostraron una mejora significativa en la precisión de la identificación del tipo-b. pilón. Para el pilón tipo c y el pilón tipo d, la precisión de la distancia de Hausdorff podría superar el 90%. En cuanto a la recuperación, para el pilón tipo a, la distancia discreta de Fréchet arrojó resultados más altos. Para los otros tres tipos de torres, los resultados del retiro del mercado de Hausdorff distancia fueron 90,3%, 86,5% y 87,7%, respectivamente, significativamente mayores que los otros medidas de similitud. Teniendo en cuenta el índice de evaluación general del rendimiento del algoritmo , las puntuaciones F de las cuatro mediciones de similitud habían experimentado una mejora sustancial. para el pilón tipo b. Para los otros tres tipos de torres, la puntuación F de Hausdorff La distancia fue mayor que las otras tres mediciones.

Machine Translated by Google

En resumen, al identificar el tipo de nubes de puntos de torre, utilizando el método ordinario conjunto de datos para el cálculo, la distancia discreta de Fréchet exhibió la mejor evaluación general índice, con una puntuación F media del 76,4%. Usando el conjunto de datos transformado por escala lineal para el cálculo, el índice de evaluación global de la distancia de Hausdorff fue el mejor, con un Puntuación F media del 86,4%.

4.3. Precisión de cálculo de los parámetros característicos del pilón

Esta sección validó la precisión del cálculo de parámetros clave para cuatro tipos de pilones utilizando ejemplos prácticos. En este caso se tomó como caso típico el pilón tipo A. El Los valores calculados de este pilón se enumeran en la Tabla 4 y se compararon con el manual. valores de medición. Finalmente se obtuvo el error relativo.

Tabla 4. Resultados del cálculo de parámetros del pilón tipo a.

De serie Número	Conexión de puntos clave	Descripción del Puesto	Calculado Valor/m	Medición manual Valor/m	Relativo Error
1	Diferencia de 1 a 2 abscisas	Longitud del brazo transversal de la línea de	10.2897	10.5	−2,00%
2	tierra Diferencia de 3 a 4	abscisas / Diferencia de 5 a 6	1.6932	1.8	−5,93%
3	abscisas / Diferencia de 7 a 8	abscisas / Diferencia de	2,0760	2,1	−1,14%
4	9 a 10 abscisas		2,4361	2,4	1,50%
5		Longitud del brazo	12,5012	13	−3,84%
6	cruzado Diferencia de abscisas de	11 a 12 / Diferencia de	2,6784	2,7	−0,80%
7	abscisas de 13 a 14 / Diferencia	de abscisas de 15 a 16 /	3,1005	3,2	−3,11%
8	Diferencia de abscisas de 17 a 19		6,8951	7	−1,50%
9		Separación entre patas	8,0340		0,43%
10	del pilón Diferencia de abscisas de 20 a 21	Anchura del brazo transversal de la línea	1,5211	8	−4,93%
11	de tierra Diferencia de abscisas de	22 a 23 / Diferencia de	1,6932	1,6	−5,93%
12	abscisas de 24 a 25 / Diferencia de	abscisas de 26 a 27 /	2,1018	1,8 2,1	0,09%
13			2,4824	2.4	3,43%
14	28-29 diferencia de abscisas	Ancho del brazo transversal	2.7438	2.8	−2,01%
15	30–31 diferencia de abscisas		3.1937	3.2	−0,20%
dieciséis	32–33 diferencia de abscisas	/ /	6.9042	7	−1,37%
17	34–36 diferencia de abscisas	Distancia entre patas del pilón	8.0179	8	0,22%
18	32-34 diferencia de ordenadas	Altura de las patas del pilón	4.0512	4	1,28%
19	30-32 diferencia de ordenadas	Altura del cuerpo del	13.4974	13.5	−0,02%
20	28–30 diferencia de ordenadas		3.4989	3.5	−0,03%
21	26–28 diferencia de ordenadas		2.0084	2	0,42%
22	24–26 diferencia de ordenadas		2.9849	3	−0,50%
23	22–24 diferencia de ordenadas		3.0140	3	0,47%
24	20–22 diferencia de ordenadas	pilón / / / / /	1.5022	1.5	0,15%

Finalmente, se encontró que el error relativo global no superó el 5% al calcular 80 muestras de pilones y comparando sus errores relativos máximos, validando así la viabilidad del algoritmo. Los resultados calculados para las torres se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Error de cálculo.

Tipo de pilón	Cantidad	Error relativo máximo	Error promedio
a	20	3,28%	2,36%
b	20	4,96%	2,71%
C	20	4,62%	3,05%
d	20	4,37%	2,93%

Machine Translated by Google

4.4. Reconstrucción del pilón

A partir de los parámetros característicos calculados en el apartado anterior, los modelos 3D
Se reconstruyeron los cuatro tipos de torres. Los modelos finales se muestran en la Figura 12.

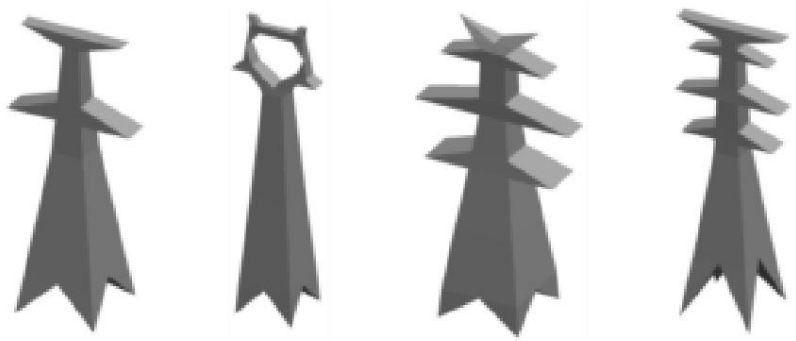


Figura 12. Modelos 3D de torres.

Figura 12. Modelos 3D de torres.

5. Discusión

5. Discusión

Esta sección analiza principalmente los errores encontrados en la identificación del tipo de torre, el
impacto de los puntos de ruido de los datos LiDAR en el cálculo de parámetros característicos, y
La influencia de la escasez de datos.

Esta sección analiza principalmente los errores encontrados en el impacto de pyl de los puntos de ruido de los
datos LiDAR en el cálculo del carácter 5.1. Errores en la identificación del tipo de pilón

Cuando se utiliza el conjunto de datos ordinario, la distancia DTW y la distancia FastDTW tienden
clasificar erróneamente el pilón tipo b y el pilón tipo d como el pilón tipo c. Esto podría ser
atribuido al hecho de que DTW es un método de comparación local insensible a la forma global
cambios, mientras que las formas de los pilones implican cambios globales, lo que resulta en la identificación errónea de
ciertos tipos de pilones. La distancia discreta de Fréchet y la distancia de Hausdorff exhiben más
identificar las nubes de puntos del pilón tipo d, que pueden estar en altura
Cuando se utiliza el conjunto de datos ordinario, la distancia DTW y los errores finales
de altura entre el pilón tipo d y otros tipos de pilones en el conjunto de datos. Después de usar el
transformado linealmente, se reducen los errores en la identificación del tipo de pilón. Actualmente
Al clasificar erróneamente el pilón tipo b y el pilón tipo d como el conjunto de datos ty
aplicable para identificar los tipos de torres en el conjunto de datos. Este método es
Aplicable para identificar los tipos de torres en el conjunto de datos. Este método solo es
La investigación puede centrarse en diseñar algoritmos de identificación más adecuados basados en la
cambios, mientras que las formas de los pilones implican cambios globales, lo que hace que los hallazgos de este
estudio mejoren su generalidad.

5.2. La influencia de los puntos de ruido en el cálculo de parámetros característicos

Los puntos de ruido se distribuyen principalmente en dos zonas del pilón: una de las áreas
está en la unión del cuerpo del pilón y la cruceta, como lo indica el círculo azul en
Figura 13. Estos puntos de ruido hacen que los puntos característicos seleccionados en el cuerpo del pilón se desplacen
hacia afuera. Por lo tanto, los resultados excesivos en el cálculo de los parámetros característicos. En este estudio,
Los verdaderos puntos característicos se pueden distinguir por las características de densidad de los puntos después.
puntos característicos de densidad de los puntos después de la segmentación clave p
La segmentación clave coloca capas, eliminando así la interferencia de dicho ruido.
puntos de ruido rimaril de la característica poi consiste en puntos de cadena aislante
puntos de cuerda aislante y puntos de línea, como se muestra en el círculo rojo en la Figura 13. Este tipo
del punto de ruido tiene el mayor impacto en el cálculo de los parámetros característicos. Si
Si existen tales puntos, será difícil calcular con precisión los parámetros del pilón utilizando el
método propuesto en este trabajo. Por lo tanto, es necesario eliminar manualmente dicho ruido.

5.2. La influencia de los puntos de ruido en el cálculo de los puntos característicos antes de identificar el tipo de pilón.

Los puntos de ruido se distribuyen principalmente en dos áreas de la unión del cuerpo del pilón y la cruceta, como se indica en la Figura 13 ¡Error! Fuente de referencia no encontrada. Estos puntos de ruido en el cuerpo del pilón se desplazan hacia afuera, lo que resulta en un cálculo excesivo de los parámetros. En este estudio, los verdaderos puntos característicos ca características de densidad de los puntos después de la segmentación clave p eliminando la interferencia de dichos puntos de ruido en la característica poi de los puntos de ruido rimaril consiste en puntos de cadena aislante

5.1. Errores en la identificación del tipo de pilón
La influencia de la escasez de datos.
Figura 12. Modelos 3D de torres.
ciertos tipos de pilones. La distancia discreta de Fréchet y los errores de Hausdo
al identificar las nubes de puntos del pilón tipo d, que pueden estar en altura
entre el pilón tipo d y otros tipos de postes en el conjunto de datos transformado
linealmente, los errores en la identificación del tipo de pilón. Actualmente este
método es solo aplicable a la identificación de investigaciones existentes.
Futuras investigaciones pueden centrarse en diseñar una identificación más
adecuada de los hallazgos de este estudio para mejorar su generalidad.

Machine Translated by Google

tiene el mayor impacto en el cálculo de las características, será difícil calcular con precisión los parámetros del pilón en este documento. Por lo tanto, es necesario retirarlo manualmente identificando el tipo de pilón.

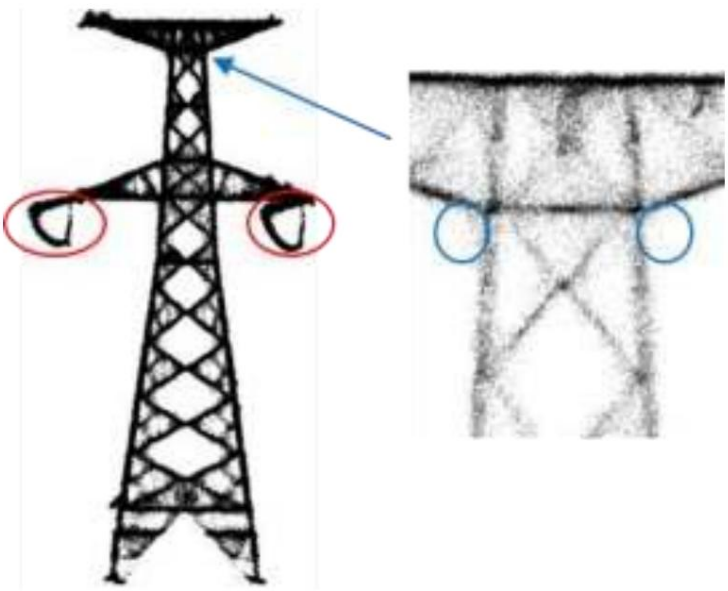


Figura 13. Nubes de puntos de pilón con puntos de interferencia.

5.3. La influencia de la escasez de datos

En el proceso de inspección de potencia, el cambio en la altura de vuelo y la velocidad del UAV. conducirá a la diferencia en la densidad de puntos. Cuando la altitud de vuelo es mayor y el vuelo La velocidad es más rápida, la densidad de puntos obtenida es menor. Analizar la influencia de la escasez de datos. En la identificación del tipo de pilón y el cálculo de los parámetros característicos, el pilón original Los datos de la nube de puntos se muestrean mediante el método de muestreo de vóxeles. El número de puntos del pilón. obtenido a diferentes distancias de muestreo se muestra en la Tabla 6. Cuando la distancia de muestreo es inferior a 0,4 m, los métodos de este documento se pueden utilizar para juzgar correctamente el tipo de pilón y los parámetros calculados del pilón son relativamente precisos. Sin embargo, cuando el La distancia de muestreo es superior a 0,4 m, las nubes de puntos se vuelven escasas y la distribución Los parámetros de las nubes de puntos no pueden reflejar las características de la segmentación clave. posiciones de los pilones. El procesamiento de redirección también se ve afectado cuando el muestreo La distancia supera los 0,6 m. Los parámetros en la Tabla 3 no pueden hacer que la dirección horizontal de el pilón perpendicular al eje X. En este caso, es necesario restablecer los parámetros para resolver este problema.

Tabla 6. Número de puntos de pilón muestreados con diferentes distancias.

Tipo de pilón	El número de puntos				
	Original Punto de nube	Distancia de muestra			
		0,1 metros	0,2 metros	0,3 metros	0,4 metros
a	203.792	67.631	20.809	9528	5492
b	102.429	47.194	16.360	7786	4706
c	239.345	128.429	42.751	19.832	11.063
d	196.601	112.847	42.108	19.851	11,166

6. Conclusiones

Este estudio propone un método mejorado para identificar tipos de torres eléctricas y un método novedoso para el cálculo automático de parámetros característicos, con el objetivo de resolver problemas de cálculo complejo y baja eficiencia en los métodos existentes. ellos pueden proporcionar el soporte de datos necesario para la reconstrucción de modelos 3D de torres de alta tensión. El método propuesto en este documento exhibe varias características y demuestra un gran potencial en la utilización

Machine Translated by Google

datos LiDAR aéreos para adquirir información básica sobre torres de alta tensión. Los resultados de la investigación de este artículo se pueden resumir de la siguiente manera.

(1) Este artículo presenta un método para generar curvas de forma de pilón basadas en datos de nubes de puntos. Sobre esta base, se propone un método mejorado para la identificación del tipo de nube de puntos basado en mediciones de similitud y un conjunto de datos transformados linealmente. Este método simplifica el problema de identificación del tipo de pilón en el espacio 3D para la identificación de curvas en el espacio 2D. Puede identificar eficazmente una variedad de tipos de torres y proporcionar soporte de información para el cálculo de parámetros de las nubes de puntos de las torres.

(2) Este estudio comparó los efectos de identificación de cuatro medidas de similitud: la distancia DTW, la distancia FastDTW, la distancia discreta de Fréchet y la distancia de Hausdorff. En términos del índice de evaluación general (puntuación F), cuando se utiliza el conjunto de datos ordinario, la distancia de Fréchet discreta como medida de similitud arrojó el índice de evaluación general óptimo del 76,4%. Mientras tanto, la distancia de Hausdorff como medida de similitud logró el mejor rendimiento utilizando el conjunto de datos después de la transformación lineal, con una puntuación F promedio del 86,4%.

(3) Se propone un método novedoso para calcular los parámetros de los pilones basándose en las características de distribución de la nube de puntos . Este método puede extraer eficazmente información específica de la nube de puntos y garantizar la precisión del cálculo de los parámetros. A través del cálculo y análisis de 80 grupos de torres, se pudo encontrar que el error relativo máximo producido por este algoritmo no superó el 5%, verificando así la viabilidad del algoritmo.

Aunque el método propuesto en este estudio puede producir resultados relativamente precisos en la identificación del tipo de pilón y el cálculo de parámetros característicos, todavía hay algunos aspectos que deben optimizarse en futuras investigaciones, como se muestra a continuación. (1) Los tipos de pilones considerados en este documento están limitados por el conjunto de datos. Por tanto, es necesario ampliar el conjunto de datos en futuros estudios. (2) El método de selección de puntos característicos debe optimizarse continuamente para reducir los errores de cálculo en los parámetros característicos. (3) En futuras investigaciones también se tendrán en cuenta los pilones con estructura asimétrica.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, SZ y LW; metodología, SZ; validación, SZ; recursos, LW y BS; curación de datos, SZ, SW y GW; redacción: preparación del borrador original, SZ; redacción: revisión y edición, SZ; visualización, SZ Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos presentados en este estudio están disponibles previa solicitud al autor correspondiente. Los datos no están disponibles públicamente debido a restricciones de privacidad.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Lu, Z.; Gong, H.; Jin, Q.; Hu, Q.; Wang, S. Un enfoque de evaluación del estado de inclinación de la torre de transmisión basado en una nube de puntos densa del LiDAR basado en UAV. Sensores remotos 2022, 14, 408. [CrossRef]
2. Li, W.; Luo, Z.; Xiao, Z.; Chen, Y.; Wang, C.; Li, J. Un método basado en GCN para extraer líneas eléctricas y torres de alta tensión a partir de datos LiDAR aéreos. Traducción IEEE. Geociencias. Sensores remotos 2022, 60, 1–14. [Referencia cruzada]
3. Chen, C.; Jin, A.; Yang, B.; Mar.; Sol, S.; Wang, Z.; Zong, Z.; Zhang, F. DCPLD-Net: una red neuronal de convolución acoplada por difusión para la detección de líneas de transmisión de energía en tiempo real a partir de datos LiDAR transmitidos por UAV. En t. J. Aplica. Observación de la Tierra. Geoinf. 2022, 112, 102960. [Referencia cruzada]
4. Yang, J.; Kang, Z. Extracción de líneas de transmisión basada en vóxeles a partir de datos de nubes de puntos LiDAR aerotransportados. IEEE J. Sel. Arriba. Aplica. Observación de la Tierra. Sensores remotos 2018, 11, 3892–3904. [Referencia cruzada]
5. Xie, X.; Liu, Z.; Xu, C.; Zhang, Y. Un método de plataforma de sensores múltiples para la inspección de líneas eléctricas basado en un gran helicóptero no tripulado. Sensores 2017, 17, 1222. [CrossRef] [PubMed]
6. Jiang, S.; Jiang, W.; Huang, W.; Yang, L. Fotogrametría oblicua basada en vehículos aéreos no tripulados para la adquisición de datos en exteriores y la inspección visual externa de líneas de transmisión. Sensores remotos 2017, 9, 278. [CrossRef]
7. Yang, L.; Fan, J.; Liu, Y.; Mentir.; Peng, J.; Liang, Z. Una revisión sobre las técnicas más modernas de inspección de líneas eléctricas. Traducción IEEE. Instrumento. Medidas. 2020, 69, 9350–9365. [Referencia cruzada]
8. Zhou, R.; Jiang, W.; Jiang, S. Un método novedoso para la reconstrucción de conductores de haces de alto voltaje a partir de datos LiDAR aéreos. Sensores remotos 2018, 10, 2051. [CrossRef]

Machine Translated by Google

9. Zhao, P.; Yang, W.; Feng, Y.; Li, F.; Huang, X. Construcción de una escena 3D del corredor de una línea de transmisión basada en GIM y GIS 3D. J. Física. Conf. Ser. 2021, 2005, 012083. [Referencia cruzada]
10. Li, Q.; Chen, Z.; Hu, Q. Un enfoque basado en modelos para el modelado 3D de torres a partir de datos LiDAR aerotransportados. Sensores remotos 2015, 7, 11501–11524. [Referencia cruzada]
11. Tang, Q.; Zhang, L.; Lan, G.; Shi, X.; Duanmu, X.; Chen, K. Un método de clasificación de nubes de puntos del corredor de líneas de transmisión basado en bosques aleatorios mejorados y características de múltiples escalas. Sensores 2023, 23, 1320. [CrossRef] [PubMed]
12. Zhu, S.; Li, Q.; Zhao, J.; Zhang, C.; Zhao, G.; Pequeño.; Chen, Z.; Chen, Y. Un método basado en el aprendizaje profundo para extraer un número arbitrario de líneas eléctricas individuales de nubes de puntos de escaneo láser montadas en vehículos aéreos no tripulados. Sensores remotos 2024, 16, 393. [CrossRef]
13. Guo, B.; Huang, X.; Li, Q.; Zhang, F.; Zhu, J.; Wang, C. Un método de geometría estocástica para la reconstrucción de pilones desde el aire Datos LiDAR. Sensores remotos 2016, 8, 243. [CrossRef]
14. Yang, L.; Kong, S.; Deng, J.; Li, H.; Liu, Y. DRA-Net: una red de atención residual de doble rama para Pixelwise Power Line Detección. Traducción IEEE. Instrumento. Medidas. 2023, 72, 5010813. [Referencia cruzada]
15. Wang, G.; Wang, L.; Wu, S.; Zu, S.; Song, B. Segmentación semántica de nubes de puntos 3D de corredores de transmisión basada en CA-PointNet++. Electrónica 2023, 12, 2829. [CrossRef]
16. Shen, Y.; Yang, Y.; Jiang, J.; Wang, J.; Huang, J.; Ferreira, V.; Chen, Y. Un método novedoso para segmentar cables individuales a partir de paquetes Conductor que utiliza datos de nubes de puntos UAV-LiDAR. Medida 2023, 211, 112603. [CrossRef]
17. Han, W. Modelado tridimensional de torres de energía con datos LiDAR aéreos. J. Ciencia del río Yangtze. Res. Inst. 2012, 29, 122-126. [Referencia cruzada]
18. Zhou, R.; Jiang, W.; Huang, W.; Xu, B.; Jiang, S. Un método heurístico para la reconstrucción de torres de energía a partir de datos LiDAR aerotransportados. Sensores Remotos. 2017, 9, 1172. [CrossRef]
19. Camuffo, E.; Mari, D.; Milani, S. Avances recientes en algoritmos de aprendizaje para nubes de puntos: una descripción general actualizada. Sensores 2022, 22, 1357. [Referencia cruzada]
20. Qiao, Y.; Xi, X.; Nie, S.; Wang, P.; Guo, H.; Wang, C. Reconstrucción de torres de energía a partir de datos LiDAR aéreos basados en componentes Segmentación y Matching de Modelos. Sensores remotos 2022, 14, 4905. [CrossRef]
21. Chen, S.; Wang, C.; Dai, H.; Zhang, H.; Pan, F.; Xi, X.; Yan, Y.; Wang, P.; Yang, X.; Zhu, X.; et al. Basado en la reconstrucción de torres eléctricas sobre estructuras de plantillas abstractas que utilizan datos LiDAR aéreos. Sensores Remotos. 2019, 11, 1579. [CrossRef]
22. Silva, F.; Amaro, N. Clasificación de torres de transmisión mediante similitud de nubes de puntos. En actas de APCA Internacional Conferencia sobre control automático y informática informática, Caparica (Portugal), 6 a 8 de julio de 2022; págs. 609–618.
23. Chen, Z.; Lan, Z.; Largo, H.; Hu, Q. Modelado 3D de un pilón a partir de datos LiDAR aerotransportados. En Actas de la teledetección del medio ambiente: 18.º Simposio Nacional sobre Teledetección de China, Wuhan, China, 14 de mayo de 2014; pag. 915807.
24. Wang, H.; Cabaña.; Wang, Z.; Kang, Z.; Akwensi, PH; Yang, J. Reconstrucción de torres de energía a partir de nubes de puntos LiDAR basada en segmentación estructural y estimación de parámetros. IEEE Geociencias. Sensores remotos. Lett. 2022, 19, 1–5. [Referencia cruzada]
25. Zhang, M.; Su, X.; Xu, H.; Li, H.; Wang, D. Identificación de la categoría de la torre de transmisión a partir de nubes de puntos LiDAR aerotransportadas según la curva de forma. En actas de la 3.ª Conferencia Internacional sobre Mecatrónica, Automatización y Control Inteligente, Guilin, China, 15 a 17 de septiembre de 2023; pag. 012026. [Referencia cruzada]
26. Principio, E.; Squartini, S.; Cambria, E.; Piazza, F. Coincidencia de plantillas acústicas para la detección automática de estados de emergencia: un ELM Algoritmo basado. Neurocomputación 2015, 149, 426–434. [Referencia cruzada]
27. Obaid, M.; Hodrob, R.; Abu Mwais, A.; Aldababsa, M. Reconocimiento automático de voz de palabras aisladas de vocabulario pequeño para Comandos de una sola palabra en árabe hablado. Computación suave. 2023, 1–14. [Referencia cruzada]
28. Salvador, S.; Chan, P. Hacia una deformación del tiempo dinámica precisa en el tiempo y el espacio lineales. AIF 2007, 11, 561–580. [Referencia cruzada]
29. Gao, Y.; Yang, Y.; Puede.; Xu, W. Estudio sobre el diagnóstico inteligente de desvíos ferroviarios basado en FastDTW mejorado y segmentación de series temporales bajo monitoreo de Big Data. Matemáticas. Problema. Ing. 2022, 2022, 7048813. [Referencia cruzada]
30. Yeo, K.; Yin, OS; Han, PY; Kwee, WK Aplicación móvil en tiempo real de firma en el aire con deformación dinámica rápida del tiempo (FastDTW). En actas de la Conferencia internacional IEEE de 2015 sobre aplicaciones de procesamiento de imágenes y señales (ICSIPA), Kuala Lumpur, Malasia, 19 a 21 de octubre de 2015; págs. 315–320.
31. Barbay, J. Cálculo adaptativo de la distancia de Fréchet discreta. En Actas de Procesamiento de Cadenas y Recuperación de Información, Lima, Perú, 14 de septiembre de 2018; págs. 50–60.
32. Abraham, RB; Filtser, O.; Kaplan, H.; Katz, MJ; Sharir, M. La distancia de Fréchet discreta y semicontinua con atajos a través de Conteo y Selección de Distancias Aproximadas. Transmisión ACM. Algoritmos 2015, 11, 1–29. [Referencia cruzada]
33. Ali, M.; Hussain, Z.; Yang, M.-S. Medidas de distancia y similitud de Hausdorff para conjuntos neutrosóficos de valor único con aplicación en la toma de decisiones con criterios múltiples. Electrónica 2022, 12, 201. [CrossRef]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Algoritmo de seguimiento y detección de vehículos multiobjeto basado en YOLOv8 y ByteTrack mejorados

Longxiang You, Yajun Chen *, Ci Xiao, Chaoyue Sun y Rongzhen Li

Escuela de Ingeniería de Información Electrónica, Universidad Normal Occidental de China, Nanchong 637009, China; ylxzxx@stu.cwnu.edu.cn (LY); xiaoci035560@stu.cwnu.edu.cn (CX); sunchaoyue@stu.cwnu.edu.cn (CS); lee1225rz@stu.cwnu.edu.cn (RL)
* Correspondencia: scnccyj@cwnu.edu.cn

Resumen: La tecnología de detección y seguimiento de vehículos juega un papel crucial en los Sistemas de Transporte Inteligentes. Sin embargo, debido a factores como escenarios complejos, diversas escalas y oclusiones, con frecuencia ocurren problemas como detecciones falsas, detecciones perdidas y cambios de identidad. Para abordar estos problemas, este artículo propone un algoritmo de seguimiento y detección de vehículos multiobjeto basado en CDS-YOLOv8 y ByteTrack mejorado. Para la detección de vehículos, el módulo guiado por contexto (CG) se introduce durante el proceso de reducción de resolución para mejorar las capacidades de extracción de características en escenarios compl El Bloque de Reparación Dilatado (DRB) se reconstruye para abordar problemas de múltiples escalas, y Soft-NMS reemplaza al NMS tradicional para mejorar el rendimiento en escenarios de vehículos densamente poblados. Para el seguimiento de vehículos, el vector de estado y la matriz de covarianza del filtro de Kalman se mejoran para manejar mejor el movimiento no lineal de los vehículos, y se introduce la interpolación suavizada gaussiana (GSI) para llenar los espacios en la trayectoria causados por errores de detección. Los experimentos realizados en el conjunto de datos UA-DETRAC muestran que el algoritmo mejorado aumenta el rendimiento de detección, con mAP@0.5 y mAP@0.5:0.95 mejorando en un 9% y 8,8%, respectivamente. En términos de rendimiento de seguimiento, mMOTA mejora un 6,7%. Además, los experimentos comparativos con detección convencional y algoritmos de seguimiento de dos etapas demuestran el rendimiento superior del algoritmo propuesto.

Palabras clave: visión por computadora; sistemas de transporte inteligentes; detección de vehículos; seguimiento de vehículos

check for updates

Cita: Usted, L.; Chen, Y.; Xiao, C.; Sol, C.; Li, R. Algoritmo de seguimiento y detección de vehículos multiobjeto basado en YOLOv8 y ByteTrack mejorados. Electrónica 2024, 13, 3033. https://doi.org/10.3390/

electrónica13153033

Editor Académico: Fernando De la Prieta Pintado

Recibido: 11 de julio de 2024
Revisado: 29 de julio de 2024
Aceptado: 30 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

La tecnología de detección y seguimiento de vehículos desempeña un papel clave en los sistemas de transporte inteligentes [1]. La utilización de esta tecnología permite monitorear en tiempo real el flujo del tráfico por carretera, ayudando a las autoridades de gestión del tráfico a tomar decisiones informadas para aliviar eficazmente la congestión del tráfico. Además, la tecnología de detección y seguimiento de vehículos puede identificar infracciones de tránsito, lo que reduce la probabilidad de accidentes de tránsito. Esta tecnología también proporciona una percepción inteligente de los vehículos y del entorno vial, ofreciendo soluciones más inteligentes y eficientes para la gestión del tráfico. En los últimos años, la tecnología de IA ha desempeñado un papel importante en la mejora de las capacidades de las redes vehiculares. Por ejemplo, en computación de redes de borde de vehículos, Y Ju et al. [2] han realizado investigaciones sobre descarga segura utilizando tecnología de acceso múltiple no ortogonal (NOMA) y aprendizaje de refuerzo profundo asincrónico. Esto no sólo mejora la seguridad y la eficiencia de la transmisión de datos, sino que también respalda los requisitos en tiempo real para la detección y el seguimiento de v

Sin embargo, a menudo se enfrentan varios desafíos al realizar la detección y el seguimiento de vehículos. Factores como las complejas variaciones de iluminación, los impactos climáticos, la diversidad de tipos y tamaños de vehículos y las escenas de tráfico de alta densidad pueden reducir significativamente la eficacia de la detección y el seguimiento. En respuesta a estos desafíos, se han llevado a cabo numerosos esfuerzos de investigación. Por ejemplo, D. Roy et al. [3] mejoró el rendimiento de detección y seguimiento de vehículos mediante la introducción de información multimodal. M. Humayun y col. [4], basado en YOLOv4, abordó las variaciones en diversas condiciones climáticas agregando un bloque de agrupación de pirámide espacial. P. Deshmukh et al. [5] utilizó el transformad

Machine Translated by Google

funciones de múltiples escalas y utilizó una red piramidal de funciones bidireccional para manejar la diversidad en las escalas de vehículos. J. Wang y col. [6], basado en YOLOv5, introdujo un mecanismo de atención para mejorar el rendimiento de detección de vehículos pequeños y empleó el algoritmo JDE para el seguimiento de vehículos. T. Bui y col. [7], también basado en YOLOv5, introdujo un módulo de interacción de características intraescala basado en la atención para acelerar la convergencia de la red de detección y mejoró ResNet36 como la red de extracción de características DeepSORT para el seguimiento de vehículos. Además de mejorar los modelos de detección de objetos y los métodos de seguimiento de vehículos basados en el filtro de Kalman, se han propuesto varias soluciones tecnológicas para abordar estos desafíos. Y Wu et al. [8] propusieron una técnica que utiliza una red generativa adversaria (GAN) para convertir conjuntos de datos de vehículos diurnos en conjuntos de datos nocturnos, mejorando el rendimiento de la detección nocturna desde la perspectiva de la expansión del conjunto de datos.

B Xu et al. [9] introdujeron un marco de visión monocular que utiliza un modelo de imagen en pintura para restaurar vehículos ocluidos mediante enmascaramiento, mejorando el rendimiento en escenarios de tráfico congestionado. Además, B Xu et al. [10] empleó un método que combina la detección de puntos clave y múltiples modelos de aprendizaje profundo, optimizando la detección y el seguimiento de los puntos de carga del eje del vehículo mediante la integración de los modelos YOLO-v5 y HourglassNet con un modelo dinámico. H Xu et al. [11] propusieron un modelo de detección de automóviles de dominio cruzado con un modelo de detección de vehículos con mecanismo de atención de bloque convolucional integrado (CDCDMA) que construye un marco de detección de objetos de dominio cruzado, enfatizando las características de los faros para manejar cambios en escenas complejas. C Zhang et al. [12] introdujeron un marco de sistema que aborda los desafíos de reidentificación de vehículos con vista cruzada mediante el aprendizaje de relaciones de alto orden e información topológica. Este marco mejora efectivamente la precisión del reconocimiento en diferentes vistas a través del módulo de extracción de características, el módulo de convolución de gráficos y el módulo de coincidencia de gráficos.

En el ámbito de la detección de vehículos, la mayoría de los métodos suelen optimizarse para escenarios únicos . Para abordar esto, este artículo propone un algoritmo mejorado basado en YOLOv8 [13] —CDS- YOLOv8. Este algoritmo introduce el módulo guiado por contexto [14] durante el proceso de reducción de resolución para mejorar las capacidades de extracción de características, adaptándose así a variaciones complejas de la escena. Simultáneamente, la estructura del Bloque Dilatado Reparam [15] se reconstruye e integra con el módulo C2f para extraer completamente características dispersas y de múltiples escalas, mejorando el rendimiento del modelo en la detección de objetos de múltiples escalas. Además, en la etapa de posprocesamiento , el algoritmo adopta Soft-NMS para reemplazar el NMS tradicional, preservando cuadros candidatos más válidos en escenas de vehículos densamente pobladas a través de una caída suave de la confianza. En términos de seguimiento de vehículos, la mayoría de los algoritmos de seguimiento normalmente se centran solo en cuadros de detección de alta confianza e ignoran los de baja confianza, lo que lleva a detecciones perdidas de algunos objetivos reales. Para abordar esto, este artículo selecciona ByteTrack [16] como rastreador base y realiza ajustes al vector de estado y la matriz de covarianza en el filtro de Kalman. Además, se introduce la interpolación suavizada gaussiana [17] para posprocesar las trayectorias de los vehículos, compensando las trayectorias faltantes.

Las principales contribuciones de este artículo se resumen a continuación: 1.

Propusimos un modelo de detección de vehículos mejorado, CDS-YOLOv8: para abordar las limitaciones de YOLOv8 en entornos urbanos para la detección de vehículos, el modelo CDS-YOLOv8 introduce un módulo CG durante el muestreo descendente para mejorar las capacidades de extracción de características en respuesta a cambios complejos de escena. Reconstruye la DRB para manejar mejor los problemas de múltiples escalas causados por las diferentes distancias de las cámaras y los tamaños de los ve Además, Soft-NMS reemplaza el NMS tradicional para retener cuadros de candidatos más válidos, mejorando el rendimiento en escenas de vehículos densamente pobladas.

2. Mejoramos el rastreador ByteTrack: se seleccionó ByteTrack como rastreador base. Para abordar las limitaciones del filtro de Kalman original a la hora de capturar el movimiento de los vehículos, se realizaron mejoras en el vector de estado y la matriz de covarianza para manejar mejor los cambios no lineales en el movimiento de los vehículos. Para mitigar las interrupciones de la pista debido a la pérdida de detección, se utilizó GSI para llenar los vacíos de seguimiento, mejorando la continuidad de la pista y reduciendo los cambios de identidad y la pérdida de pista.

Machine Translated by Google

3. Se logró la integración del detector y rastreador mejorado: CDS-YOLOv8 y el ByteTrack mejorado se combinaron y validaron en conjuntos de datos públicos. Los resultados experimentales indican que este método demuestra un rendimiento avanzado y superioridad en múltiples métricas.

2. Trabajo relacionado

2.1. Detección de vehículos

En los últimos años, con el rápido desarrollo de la tecnología de aprendizaje profundo, se han logrado avances significativos en el campo de la detección de objetos. Los métodos de detección de objetos basados en el aprendizaje profundo se pueden dividir en enfoques de una y dos etapas. La ventaja de los métodos de una etapa radica en su rápida velocidad de procesamiento, ya que generan directamente categorías de objetos y cuadros delimitadores a través de una única red. Por el contrario, los métodos de dos etapas primero generan regiones candidatas y luego realizan una detección fina, con la ventaja de una mayor precisión de detección. Los métodos representativos de una etapa incluyen la serie YOLO, SSD [18] y RetinaNet [19], mientras que los métodos representativos de dos etapas incluyen Faster R-CNN [20] y Cascade R-CNN [21]. El principio de funcionamiento de la serie YOLO es dividir la imagen de entrada en una cuadrícula de tamaño fijo, y cada cuadrícula predice directamente la ubicación y la probabilidad de categoría del objeto. SSD extrae los cuadros delimitadores y las categorías de objetos en mapas de características de diferentes escalas, logrando una detección multiescala. RetinaNet emplea una red piramidal de funciones para la extracción de funciones e introduce Focal Loss para abordar el problema del desequilibrio de clases. R-CNN más rápido primero genera regiones candidatas a través de una red de propuesta de región y luego realiza una clasificación fina de objetos y una regresión del cuadro delimitador en estas regiones. Cascade R-CNN, basándose en Faster R-CNN, introduce una estructura de clasificación y regresión de varias etapas que refina progresivamente las regiones candidatas, mejorando aún más la precisión de la detección.

Para satisfacer las necesidades prácticas de la detección de vehículos, varios esfuerzos de investigación han optimizado aún más los detectores generales. Z. Chen y col. [22] propusieron un método mejorado basado en SSD mediante la introducción de mecanismos de atención de canales y módulos de deconvolución para la fusión de características, mejorando así el rendimiento de detección de vehículos. L. Kang y col. [23] presentaron un método de atención difusa tipo 1 basado en YOLOv5 para mejorar la detección de vehículos. Este enfoque optimiza el rendimiento de la detección al enfocar el detector en el centro del objetivo.
M. Bie y col. [24] propusieron una red piramidal de características bidireccional basada en YOLOv5 para mejorar las capacidades de extracción de características del modelo. B. Wang y col. [25] introdujo un método mejorado basado en YOLOv8 incorporando el mecanismo de atención BiFormer y la red BiFPN para mejorar las capacidades de fusión de características.

En términos de selección de algoritmos de detección, YOLOv8 logra un buen equilibrio entre velocidad, precisión y tamaño del modelo debido a su rápida velocidad de detección, alta precisión y tamaño compacto del modelo. Por lo tanto, este artículo propone un algoritmo CDS-YOLOv8 basado en YOLOv8 para abordar problemas de detección de vehículos en condiciones climáticas complejas, diversidad de escala y entornos de vehículos densos. Sin aumentar la carga computacional, este algoritmo mejora efectivamente el rendimiento de detección de vehículos.

2.2. Seguimiento de vehículos de múltiples objetivos

Los algoritmos de seguimiento de múltiples objetivos basados en la detección se pueden dividir en métodos de una sola etapa y de dos etapas. Los métodos de una sola etapa generalmente utilizan una estructura de un extremo a otro, fusionando la detección y asociación de objetos en un solo paso para producir directamente resultados de detección y seguimiento, con la ventaja de un sólido rendimiento en tiempo real. Los métodos de dos etapas primero realizan la detección de objetos y luego llevan a cabo la asociación de objetos, lo que ofrece una mayor precisi
Los métodos típicos de una sola etapa incluyen JDE [26] y FairMOT [27]. JDE completa la detección e incrustación de objetos en la misma red, y las partes de detección e incrustación comparten la mayoría de los parámetros de la red. FairMOT integra redes de detección de objetos y ReID en una sola red, pero procesa tareas de detección y reidentificación a través de sucursales independientes.

Machine Translated by Google

Los algoritmos típicos de seguimiento de dos etapas incluyen la serie SORT. SORT [28], propuesto por A. Bewley et al., utiliza Faster R-CNN como detector en la etapa de detección para generar información de categoría y ubicación del objeto. La etapa de seguimiento completa la asociación de trayectorias combinando el filtro de Kalman y el algoritmo húngaro. Posteriormente, n. Wojke et al. propuso el algoritmo DeepSORT [29] , que, en comparación con SORT, introduce el método ReID, utilizando una red de extracción de características para obtener las características de apariencia de los objetos y realizando una coincidencia en cascada de características de apariencia e Intersection Over Union (IoU) durante la asociación de datos. StrongSORT mejora aún más la extracción de características de apariencia, el manejo del ruido de movimiento y la compensación del movimiento de la cámara basándose en DeepSORT, y complementa y optimiza las trayectorias con detecciones y asociaciones faltantes . Y. Zhang et al. [16] propusieron el algoritmo ByteTrack, que mejora el rendimiento del seguimiento al asociar casi todos los cuadros de detección. A continuación, N. Aharon et al. propuso el algoritmo BoT-SORT [30] , que mejora el filtro de Kalman sobre la base de ByteTrack, agregando compensación de movimiento de la cámara y el método ReID.

En escenarios de seguimiento de vehículos, Z. Zhao et al. [31] diseñó una nueva estrategia de puntuación conjunta basada en el marco JDE e introdujo codificadores CBAM y Transformer para mejorar las capacidades de detección, mejorando así el rendimiento del seguimiento. K. Zhang y col. [32] incorporaron el mecanismo de atención CAENet en YOLOX para mejorar la detección de vehículos y utilizaron DeepSORT para el seguimiento de vehículos. G. Han y col. [33] rastrearon vehículos basados en FairMOT, optimizaron la red DLA-34 para mejorar el rendimiento de detección e introdujeron una función de pérdida conjunta para reducir los problemas de cambio de identidad.

En comparación con los algoritmos de seguimiento de una sola etapa, los algoritmos de seguimiento de dos etapas son más flexibles y logran una mayor precisión en escenarios complejos. Por lo tanto, este trabajo opta por mejorar ByteTrack basado en CDS-YOLOv8 para la detección y seguimiento de vehículos. A diferencia de la mayoría de los métodos de seguimiento que ignoran los cuadros de detección de puntuación baja, ByteTrack considera plenamente los cuadros de detección de puntuación baja en la asociación de trayectorias, abordando eficazmente el problema de los fragmentos de trayectoria faltantes. Por ejemplo, cuando se produce una oclusión parcial, las puntuaciones del cuadro de detección pueden variar de mayor a menor. Al considerar cuadros de puntuación de baja confianza, ByteTrack puede identificar objetivos parcialmente ocluidos, lo que reduce la incidencia de detecciones perdidas.

3. Métodos

En el proceso de detección y seguimiento de vehículos, el detector CDS-YOLOv8 primero genera los cuadros de detección para el cuadro actual. Luego, el filtro de Kalman mejorado predice los cuadros delimitadores del fotograma actual mediante la predicción de tracklet. Posteriormente, los cuadros de detección y los cuadros predichos se comparan utilizando el algoritmo húngaro, con IoU como base para la asociación. El proceso específico de emparejamiento secundario se ilustra en la Figura 1.

Los cuadros de detección generados con CDS-YOLOv8 se dividen en cuadros de alta confianza y cuadros de baja confianza según sus puntuaciones de confianza, seguidos de dos rondas de procesamiento de asociación. En la primera ronda de asociación, el filtro de Kalman mejorado predice los tracklets rastreados y los tracklets perdidos y luego relaciona los cuadros de alta confianza con los cuadros predichos. Si la coincidencia tiene éxito, se actualiza el estado del tracklet; de lo contrario, los tracklets rastreados que no coinciden con cajas de alta confianza se someten a una segunda ronda de asociación con cajas de baja confianza. En la segunda ronda de asociación, si la coincidencia tiene éxito, se actualiza el estado del tracklet; de lo contrario, el tracklet entra en estado perdido . En la gestión de tracklets, se eliminan los tracklets que no coinciden durante más de 30 fotogramas. Los nuevos tracklets se asignan a cuadros de detección de alta confianza inigualables. Finalmente, después de la detección y el seguimiento de vehículos, GSI se utiliza para llenar los vacíos en las trayectorias causados por detecciones faltantes, optimizando la continuidad y la integridad de las trayectorias.

El modelo CDS-YOLOv8 se compone de tres partes: la columna vertebral, el cuello y la cabeza, como se ilustra en la Figura 2:

Machine Translated by Google

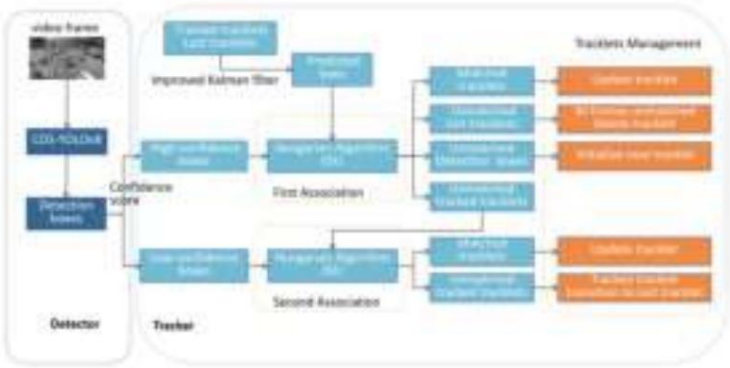


Figura 1. Diagrama de flujo de detección y seguimiento de vehículos.

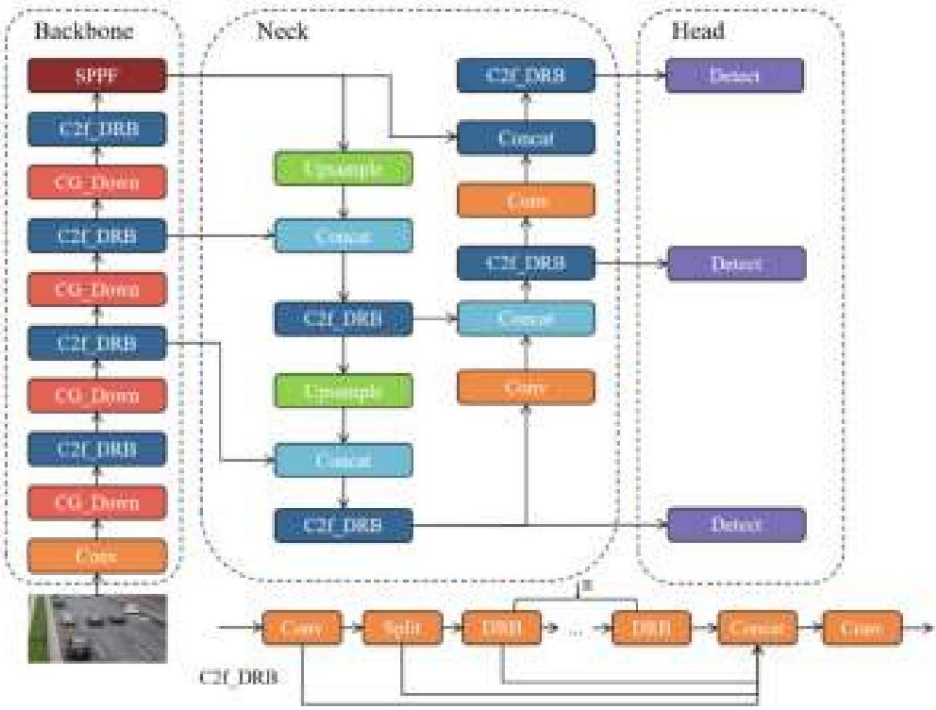


Figura 2. Estructura de CDS-YOLOv8.

En la Figura 2, Backbone se utiliza para la extracción de características, extrayendo características de varios niveles de la imagen de entrada. The Neck es responsable de la fusión de características, combinando características profundas y superficiales usando FPN y PAN. El cabezal contiene tres cabezales de detección, que manejan mapas de características de diferentes escalas y generan información de posición y categoría de los cuadros de detección. El CDS-YOLOv8 aborda las deficiencias de YOLOv8 en la detección de vehículos urbanos con las siguientes mejoras: El módulo CG se introduce durante la reducción de resolución, lo que mejora la extracción de características en entornos complejos al combinar información contextual local y circundante y utilizar información global para ponderación. En Backbone and Neck, la estructura DRB se reestructura y se integra con el módulo C2f para abordar mejor los problemas de diversidad de escala. En la etapa de posprocesamiento, Soft-NMS reemplaza al NMS tradicional, evitando la eliminación agresiva de cajas candidatas y mejorando el rendimiento de detección bajo oclusión parcial.

3.1. Reducción de resolución guiada

por el contexto Los entornos donde operan los vehículos incluyen escenarios complejos como noches, tiempo nublado, días soleados y días lluviosos. Para mejorar las capacidades de extracción de características en estos entornos complejos, el módulo guiado por contexto se presenta durante la

Machine Translated by Google

proceso de reducción de resolución. El módulo CG comprende varios componentes clave: El extractor de características locales utiliza convolución estándar para extraer características locales de la imagen, proporcionando características detalladas e información de límites. El extractor de contexto circundante emplea convolución dilatada para expandir el campo receptivo de características locales, capturando así una gama más amplia de información contextual. Joint Feature Extractor concatena características locales y características contextuales circundantes y las procesa con normalización por lotes (BN) y activación SiLU, formando características conjuntas que mejoran las capacidades de expresión no lineal. El Extractor de contexto global agrega información de contexto global de toda la imagen a través de la agrupación promedio global y la procesa adicionalmente utilizando un perceptrón multica Esto aplica pesos a las características de las articulaciones, amplificando la información útil y suprimiendo la información irrelevante. La estructura del Módulo CG se ilustra en la Figura 3:

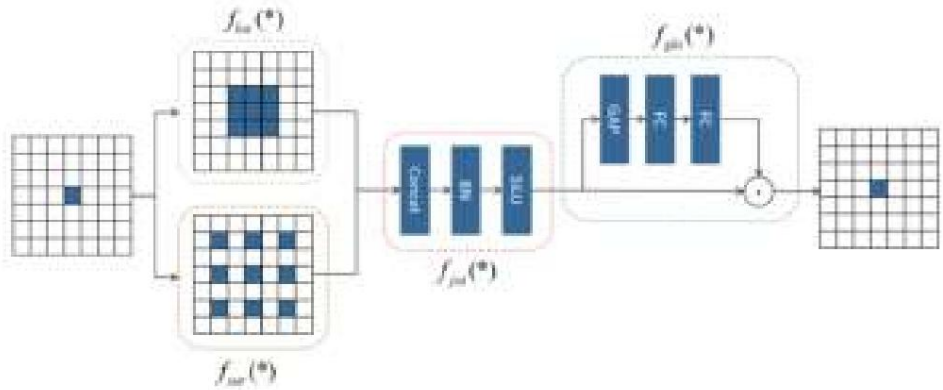


Figura 3. Estructura del módulo guiado por contexto.

En detalle, primero, el mapa de características de entrada se somete a una convolución de 3 ×3 para extraer características locales y a una convolución de 3 ×3 con una tasa de dilatación de 2 para extraer características contextuales circundantes. A continuación, el Extractor de características conjuntas fusiona las características locales y las características contextuales circundantes a lo largo de la dimensión del canal, seguido de la capa BN y la activación de SiLU . Finalmente, Global Context Extractor aprovecha la información global de la imagen, utilizando Global Average Pooling para generar un vector de características global para cada canal. Luego, este vector se somete a una transformación no lineal a través de dos capas completamente conectadas, lo que produce pesos de canal. Estos pesos se aplican a las características conjuntas para una optimización ponderada, mejorando las características importantes y suprimiendo las que no son importantes, aumentando así la capacidad de extracción de características del modelo.

3.2. Bloque reparador dilatado reconstruido

En la detección de vehículos surgen importantes variaciones de escala debido a diferencias en las distancias de las cámaras y el tamaño de los vehículos. Para abordar este problema, hemos reconstruido el bloque de reparación dilatado y lo hemos integrado en la estructura C2f. La estructura DRB comprende una capa de convolución de núcleo grande y múltiples capas de convolución de núcleo pequeño dilatadas. La capa de convolución de núcleo grande captura características espaciales más amplias, mientras que las capas de convolución de núcleo pequeño dilatadas capturan características espaciales dispersas mediante operaciones de dilatación. Las salidas de estas capas se procesan a través de la capa BN y luego se resumen. Utilizando técnicas de reparametrización, se representan de manera equivalente como una única capa de convolución de núcleo grande. Este diseño tiene dos ventajas principales: las capas de convolución de núcleo pequeño , al incorporar dilatación, capturan características en un rango más amplio. Cuando se combina con la capa de convolución de núcleo grande, el campo receptivo se expande efectivamente, eliminando la necesidad de aumentar la profundidad del modelo o diseñar núcleos de convolución más grandes. Durante la inferencia, las técnicas de reparametrización fusionan múltiples capas de convolución en un único núcleo de convolución equivalente, manteniendo el tamaño del núcleo y la complejidad computacional al tiempo que mejoran significativamente la capacidad de extracción de características del modelo. La Figura 4 ilustra la estructura de la DRB.

Machine Translated by Google

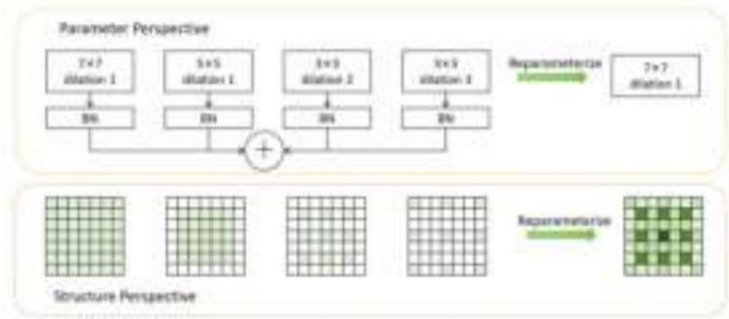


Figura 4. Estructura del Bloque Reparam Dilatado.

Desde una perspectiva de parámetros, el DRB consta de una capa de convolución de núcleo grande de 7 ×7 y tres capas de convolución de núcleo pequeño con diferentes tasas de dilatación. Las salidas de todas las capas convolucionales se procesan a través de capas BN y se representan de manera equivalente como una única capa convolucional de núcleo grande de 7 ×7 durante la inferencia, sin aumentar significativamente la carga computacional.

Estructuralmente, la Figura 4 demuestra cómo cada capa de convolución corresponde a áreas según el tamaño del núcleo y la tasa de dilatación. Para objetos grandes, el DRB extiende efectivamente el campo receptivo combinando capas de convolución de núcleo grande con capas de convolución dilatadas. Para objetos pequeños, las capas de convolución dilatadas en la DRB, utilizando núcleos pequeños y velocidades de dilatación variables, capturan de manera eficiente características de grano fino, mejorando así el rendimiento de detección de vehículos a múltiples escalas en fondos complejos.

3.3. NMS suave

En el proceso de detección y seguimiento de vehículos, Soft-NMS se utiliza para reemplazar el NMS tradicional y mejorar el rendimiento en escenarios de vehículos densamente poblados. Los pasos tradicionales de NMS son los siguientes: 1. Ordenar los

cuadros candidatos en orden descendente según sus puntuaciones de confianza. 2.
Seleccione el cuadro candidato con la puntuación de confianza más alta y agréguelo al conjunto de resultados final.

3. Calcule el IoU entre este cuadro candidato y los otros cuadros. Si el IoU de un cuadro candidato excede un umbral establecido, se elimina.
4. De los cuadros de candidatos restantes, seleccione el que tenga la puntuación de confianza más alta y repita los pasos 2 y 3 hasta que se hayan procesado todos los cuadros de candidatos.

Soft-NMS optimiza el tercer paso del NMS tradicional: en Soft-NMS, después de calcular el IoU entre el cuadro candidato con el puntaje de confianza más alto y los otros cuadros, en lugar de eliminar aquellos cuadros con un IoU que excede el umbral, se utiliza un método de manejo suave. se utiliza disminuyendo sus puntuaciones de confianza. Específicamente, adoptamos un método de desintegración gaussiana, como se muestra en la Ecuación (1):

$$si = si \times \exp - \frac{IoU2}{\sigma} \quad (1)$$

donde si representa la puntuación de confianza del i-ésimo cuadro candidato y σes el factor de caída.

Si la puntuación de confianza decreciente está por debajo del umbral establecido, se eliminará el cuadro de candidato . En escenarios con vehículos densos, la superposición de cuadros candidatos entre objetivos es grave. En comparación con el NMS tradicional, Soft-NMS puede retener cuadros de candidatos más válidos, manejar objetivos adyacentes de manera más efectiva y reducir la ocurrencia de detecciones perdidas.

3.4. Filtro de Kalman mejorado

En los algoritmos de seguimiento de dos etapas, la salida del cuadro delimitador generalmente se estima utilizando el filtro de Kalman (KF) para determinar el estado de movimiento del objetivo. En ByteTrack, el vector de estado del filtro de Kalman se muestra en la Ecuación (2):

Machine Translated by Google

$$x = xc, yc , a, h, \quad \dot{xc}, \dot{yc} , \dot{a}, \dot{h}^{t} \tag{2}$$

donde xc, yc son las coordenadas centrales, a es la relación de aspecto y h es la altura.

Luego, cuando se trata de oclusión parcial y cambios de perspectiva, la relación de aspecto es difícil de adaptar. Por lo tanto, estimar directamente el ancho y el alto es una mejor opción. El vector de estado mejorado se muestra en la Ecuación (3):

$$xk = xc(k), yc(k), w(k), h(k), \dot{xc}(k), \dot{yc}(k), \dot{w}(k), \dot{h}(k) \tag{3}$$

donde (xc (k), yc (k) son las coordenadas centrales, w(k) es el ancho y h(k) es la altura.

En comparación con el uso de la relación de aspecto, estimar directamente el ancho y el alto tiene las siguientes ventajas: por un lado, puede reflejar con mayor precisión el tamaño real del objeto y adaptarse mejor a los cambios en las dimensiones del vehículo; por otro lado, los cambios en la forma y el tamaño del vehículo durante el movimiento son complejos y el uso de la relación de aspecto aumenta los errores no lineales. Estimar directamente el ancho y el alto puede reducir la distorsión del cuadro delimitador causada por la acumulación de errores, manteniendo así una mejor estabilidad en escenas complejas.

En el filtro de Kalman clásico, la matriz de covarianza del ruido del proceso Q y la matriz de covarianza del ruido de medición R se establecen como valores fijos, que permanecen sin cambios durante todo el proceso de seguimiento. Para mejorar el rendimiento del filtro de Kalman en entornos dinámicos, Q y R se ajustan dinámicamente según las condiciones en tiempo real, Q como se muestra en la Ecuación (4) y R como se muestra en la Ecuación (5).

$$Qk = \text{diagnóstico}\begin{matrix} \sigma p\hat{w}_{k-1|k-1}^{2}, \sigma p\hat{h}_{k-1|k-1}^{2}, \\ \sigma p\hat{w}_{k-1|k-1}^{2}, \sigma p\hat{h}_{k-1|k-1}^{2}, \\ \sigma v\hat{w}_{k-1|k-1}^{2}, \sigma v\hat{h}_{k-1|k-1}^{2}, \\ \sigma v\hat{w}_{k-1|k-1}^{2}, \sigma v\hat{h}_{k-1|k-1}^{2} \end{matrix} \tag{4}$$

donde σp es la desviación estándar del ruido de posición y σp es la desviación estándar del ruido de velocidad.

$$Rk = \text{diagnóstico}\begin{matrix} \sigma m\hat{w}_{k|k-1}^{2}, \sigma m\hat{h}_{k|k-1}^{2}, \\ \sigma m\hat{w}_{k|k-1}^{2}, \sigma m\hat{h}_{k|k-1}^{2} \end{matrix} \tag{5}$$

donde σm es la desviación estándar del ruido de medición.

Q y R que varían en el tiempo pueden responder de manera más flexible a cambios no lineales en el entorno , como la desaceleración o aceleración de un vehículo. En comparación con las matrices de covarianza fija , Q y R que varían en el tiempo se pueden ajustar en función de los estados actuales de predicción y medición, abordando de manera más efectiva los problemas de ruido y acumulación de errores. Esto permite una mejor adaptación a entornos dinámicos y mejora el rendimiento general del sistema.

3.5. Interpolación suavizada gaussiana

Para abordar el problema de la pérdida de trayectoria causada por omisiones de detección en el seguimiento de vehículos, se emplea el método de interpolación suavizada gaussiana como paso de posprocesamiento para la optimización. Los métodos tradicionales de interpolación lineal normalmente se basan únicamente en las posiciones de dos puntos finales, ignorando la complejidad del movimiento del vehículo, lo que da como resultado resultados menos precisos. GSI captura la trayectoria de movimiento no lineal del vehículo mediante regresión del proceso gaussiano (GPR), proporcionando así resultados más precisos.

Para la iésima trayectoria del vehículo, el modelo GSI está representado por la Ecuación (6):

$$pt = f(i)(t) + \tag{6}$$

Machine Translated by Google

donde t es el ID del cuadro, pt es la coordenada de posición del vehículo en el cuadro t, f (i) (t) es la función ajustada por GPR utilizada para describir la trayectoria del vehículo, y $N(0, \sigma^2)$ representa el ruido gaussiano.

El proceso gaussiano es un poderoso método bayesiano no paramétrico que puede capturar las relaciones no lineales entre puntos de datos, asumiendo que la función f (i) sigue una Proceso Gaussiano, como se muestra en la Ecuación (7):

$$f(i) \sim GP(0, k(x, x')) \tag{7}$$

donde la función de covarianza k(x, x′) es el núcleo de la Función de Base Radial (RBF), que es particularmente sensible a los cambios locales. Cuanto más cerca están los puntos de datos, mayor es su correlación y la respuesta del núcleo RBF disminuye rápidamente a medida que aumenta la distancia entre los puntos de datos. Esta característica hace que el núcleo RBF sea más adecuado para describir cambios no lineales en el movimiento del vehículo, como arrancar, girar y acelerar o desacelerar. representado específicamente como se muestra en la Ecuación (8):

$$k(x, x') = \exp\left(-\frac{|x - x'|^2}{2\lambda^2}\right) \tag{8}$$

El proceso de predicción e interpolación de la posición de la trayectoria es el siguiente: para fotogramas con detecciones faltantes, la posición suavizada P_{PAG} se predice como se muestra en la Ecuación (9):

$$P_{PAG} = K(F_{PAG}, F) \left[K(F, F) + \sigma^2 I\right]^{-1} P_{PAG} \tag{9}$$

donde K(·, ·) es la matriz de covarianza basada en la función de covarianza k(·, ·), I es la matriz identidad y P representa las posiciones conocidas del vehículo en la trayectoria.

Además, para la función del núcleo RBF, el parámetro de escala λ determina su sensibilidad a los cambios de datos. Durante el seguimiento de vehículos, diferentes longitudes de trayectoria del vehículo pueden corresponder a diferentes patrones de movimiento. Por lo tanto, ajustando λ para acomodar la longitud l de la trayectoria del vehículo, las trayectorias se pueden suavizar, reduciendo así el ruido y logrando un seguimiento más suave y preciso. La configuración de λ se muestra en la Ecuación (10):

$$\lambda = \tau \cdot \log\left(\frac{3\tau}{y_0}\right) \tag{10}$$

donde τ es una constante utilizada para controlar el grado de suavizado, que se ha establecido en 18 según los resultados experimentales obtenidos mediante la búsqueda en cuadrícula.

A través de los pasos anteriores, GSI puede completar eficazmente las trayectorias faltantes en el vehículo. seguimiento, mejorando la precisión y estabilidad de las predicciones de trayectoria.

4. Experimentos y Resultados 4.1.

Conjunto de datos y configuración experimental

El conjunto de datos UA-DETRAC [34], publicado conjuntamente por la Universidad de Alberta y la Universidad de Ciencia y Tecnología de China, sirve como un conjunto de datos de referencia diseñado específicamente para la detección y seguimiento de vehículos multiobjeto. Este conjunto de datos comprende 10 h de vídeo capturado con una cámara Canon EOS 550D (Canon USA, Inc., Lake Success, NY, EE. UU.). Los vídeos se graban a una velocidad de 25 fotogramas por segundo, abarcando más de 140.000 fotogramas y 1,21 millones de cuadros de detección de objetos anotados. El conjunto de entrenamiento consta de 60 secuencias de vídeo, con un total de 83.791 imágenes, mientras que el conjunto de prueba incluye 40 secuencias de vídeo, con un total de 56.340 imágenes. El conjunto de datos UA-DETRAC presenta varios desafíos, con escenarios representativos ilustrados en la Figura 5. El conjunto de datos cubre cuatro categorías de vehículos: automóviles, autobuses, camionetas y otros. Además, incluye cuatro condiciones climáticas: soleado, nocturno, nublado y lluvioso, así como escenas con alta densidad de vehículos y tasas de oclusión.

Machine Translated by Google

Figura 5. Escenarios representativos en el conjunto de datos UA-DETRAC.

En los experimentos de detección de vehículos, primero se excluyeron las imágenes sin etiquetas, lo que dio como resultado un conjunto de entrenamiento de 82.085 imágenes y un conjunto de prueba de 56.167 imágenes. Para evitar el sobreajuste, se tomaron muestras de cada décimo cuadro, obteniendo finalmente 8209 imágenes para entrenamiento y 5617 imágenes para evaluación. Para los experimentos de seguimiento de vehículos se utilizaron para la evaluación 40 secuencias de vídeo del conjunto de prueba .

El dispositivo GPU utilizado en estos experimentos es una NVIDIA GeForce RTX 4090 (NVIDIA Corporation, Santa Clara, CA, EE. UU.) y el dispositivo CPU es una CPU Core i9-9900K @ 3,60 GHz (Intel Corporation, Chengdu, China). Los experimentos se realizaron en un sistema Windows 10 con un entorno de aprendizaje profundo basado en PyTorch 1.31.1, CUDA 11.6 y Python 3.8. Los parámetros de entrenamiento se establecieron de la siguiente manera: el número de épocas de entrenamiento fue 200, el tamaño del lote fue 32 y no se utilizaron pesos previamente entrenados durante el proceso de entrenamiento.

4.2. Métricas de evaluación

En la detección de vehículos, se utilizan Precisión (P), Recuperación (R), mAP@0.5 y mAP@0.5:0.95 para evaluar los resultados experimentales.

P: la proporción de muestras verdaderamente positivas entre todas las muestras detectadas como positivas, como se muestra en la Ecuación (11):

$$\text{pag} = \frac{TP}{TP + FP} \tag{11}$$

R: la proporción de muestras positivas detectadas correctamente entre todas las muestras positivas reales, como se muestra en la Ecuación (12):

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \tag{12}$$

donde TP es el número de muestras verdaderamente positivas, FP es el número de muestras falsamente positivas y FN es el número de muestras positivas reales que se detectaron incorrectamente como muestras negativas.

Precisión promedio (AP): el área bajo la curva PR para una determinada clase de muestras, como se muestra en la Ecuación (13):

$$PA = \int_0^1 PDR \tag{13}$$

mAP@0.5 es la precisión promedio media para todas las clases con un umbral de IoU de 0,5.

mAP@0.5:0.95 es la precisión promedio media para todas las clases con umbrales de IoU que varían de 0,5 a 0,95 con un tamaño de paso de 0,05.

En el seguimiento de vehículos, se utilizan MOTA, IDF1 e IDS para evaluar los resultados experimentales.

MOTA mide la precisión del algoritmo de seguimiento, considerando varios errores que ocurren durante el proceso de seguimiento, como falsos positivos, detecciones perdidas y cambios de identidad. Esto se muestra en la Ecuación (14):

Machine Translated by Google

$$MOTA = 1 - \frac{\sum t\,(FNt + FPt + IDSWt)}{\sum i\,GTt} \quad (14)$$

donde FNt representa el número de detecciones perdidas en el tiempo t, FPt representa el número de falsos positivos en el momento t, IDSWt representa el número de cambios de identidad en el momento t, y GTt representa el número de objetivos reales en el terreno en el momento t.

IDF1: IDF1 mide la coherencia de la identidad y la continuidad del algoritmo de seguimiento, como se muestra en la Ecuación (15):

$$FDI1 = 2 \cdot \frac{PDI \cdot IDR}{\text{desplazados internos} + IDR} \quad (15)$$

donde IDP representa la proporción de objetivos correctamente identificados entre los detectados objetivos. IDR representa la proporción de identidades objetivo detectadas correctamente con respecto a la real. identidades objetivo.

IDS: el número de cambios de identidad que se producen durante el proceso de seguimiento, es decir Al mismo objetivo se le asignan diferentes identidades. Un valor más bajo indica un mejor rendimiento del rastreador para mantener la coherencia de la identidad.

4.3. Experimentos de ablación con detectores

Verificar la eficacia de los módulos de mejora propuestos en la detección de vehículos, Los experimentos de ablación se realizaron utilizando YOLOv8-S como modelo de referencia. Los resultados se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Resultados del experimento de ablación en el conjunto de datos UA-DETRAC.

Modelo	PAG	R	mapa@0.5	mapa@0.5:0.95	fracasos
YOLOv8-S	71,8%	58,6%	64,2%	46,6%	28,8 gramos
YOLOv8-S+CG_Abajo	78,4%	63,3%	69,9%	51,0%	30,7 gramos
YOLOv8-S+C2f_DRB	81,5%	62,6%	71,4%	51,6%	24,7 gramos
YOLOv8-S+CG_Down+C2f_DRB	80,7%	63,9%	72,9%	52,2%	26,6 gramos
YOLOv8-S+CG_Down+C2f_DRB+Soft-NMS	82,4%	62,3%	73,2%	55,4%	26,6 gramos

Como se ve en los datos de la Tabla 1, la introducción del módulo CG en el proceso de muestreo reducido aumentó P en un 6,6%, R en un 4,7%, mAP@0.5 en un 5,7% y mAP@0.5:0.95 en un 4,4%, verificando la efectividad del módulo CG en la extracción de características del vehículo. El La introducción del módulo C2f_DRB aumentó P en un 9,7%, R en un 4,0%, mAP@0.5 en un 7,2%, y mAP@0.5:0.95 en un 5%, lo que demuestra la importante ventaja de C2f_DRB en el manejo cuestiones de múltiples escalas. Cuando los módulos CG y C2f_DRB se introdujeron simultáneamente, P aumentó en un 8,9%, R en un 5,3%, mAP@0.5 en un 8,7% y mAP@0.5:0.95 en un 5,6%. demostrando que la combinación de estos dos módulos puede extraer e integrar mejor el vehículo características. Finalmente, se reemplaza ligeramente el NMS tradicional con Soft-NMS para el posprocesamiento. aumentó mAP@0.5 en 0.3 puntos porcentuales, pero mejoró significativamente mAP@0.5:0.95 en 3,2%, sentando las bases para un seguimiento de vehículos más preciso en etapas posteriores. En comparación con el modelo base, con una reducción de 2,2 G en Flops, P aumentó un 10,6%, R en un 3,7%, mAP@0.5 en un 9% y mAP@0.5:0.95 en un 8,8%, verificando plenamente la superioridad de CDS-YOLOv8 en el manejo de escenarios de detección de vehículos.

Para demostrar aún más los avances del modelo mejorado en detección de vehículos, Se presenta un análisis visual de los resultados experimentales, como se muestra en la Figura 6. Las imágenes de izquierda a derecha representan la imagen original, los resultados de predicción de la línea de base. modelo YOLOv8-S, los resultados de predicción del modelo mejorado CDS-YOLOv8 y el ajustes realizados por CDS-YOLOv8 en comparación con YOLOv8-S, que incluyen la reducción en vehículos perdidos. Las partes optimizadas están marcadas con círculos rosas. Además, el Las áreas negras en las imágenes son regiones ignoradas, ya que el seguimiento posterior del vehículo solo se centra en el movimiento de vehículos en la carretera principal.

Machine Translated by Google

Figura 6. Visualización de los resultados de la detección.

En la Figura 6, seleccionamos tres escenarios representativos: soleado, nocturno y lluvioso. En
En el escenario soleado, como se muestra en el área con un círculo rosa, CDS-YOLOv8 detectó un autobús que
YOLOv8 se perdió, así como los autos más alejados de la cámara. En el escenario nocturno, CDS-YOLOv8
detectó casi todos los objetivos que YOLOv8 no alcanzó e identificó con precisión un
Coche blanco parcialmente ocluido que YOLOv8 no reconoció como un objetivo válido. en la lluvia
En este escenario, CDS-YOLOv8 detectó casi todos los objetivos pequeños que estaban lejos de la cámara y
identificó un taxi que estaba parcialmente ocluido y YOLOv8 no lo reconoció como objetivos válidos.

En estos escenarios, CDS-YOLOv8 demostró mejoras significativas sobre YOLOv8-
S en capacidades de extracción de características y procesamiento a múltiples escalas. Además, retuvo más
objetivos válidos en escenas de vehículos densas mediante el manejo de cuadros candidatos muy superpuestos utilizando
Soft-NMS con caída de confianza en lugar de simplemente eliminarlos a través de un umbral de IoU . En
resumen, CDS-YOLOv8 logró un rendimiento excelente bajo diversas condiciones de iluminación y
condiciones climáticas, manejando eficazmente problemas de múltiples escalas y escenarios de vehículos densos.

4.4. Experimento de comparación de detectores

Para demostrar el avance de CDS-YOLOv8 en la detección de vehículos, comparamos
con algoritmos de detección convencionales. Los resultados se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Resultados experimentales comparativos en el conjunto de datos UA-DETRAC. (Los mejores resultados son
resaltado en negrita.)

Modelo	mapa@0.5	mapa@0.5:0.95	fracasos
RCNN más rápido [20]	66,3%	38,8%	60,5 gramos
Cascada-RCNN [21]	65,2%	41,1%	88,1 gramos
RetinaNet [19]	56,6%	32,1%	45,2 gramos
ATSS [35]	58,8%	32,1%	49,2 gramos
YOLOv5-S [36]	62,0%	44,9%	16 gramos
YOLOv6-S [37]	59,0%	43,0%	44,9 gramos
YOLOv7 [38]	71,1%	53,9%	105,2 gramos
YOLOv8-S [13]	64,2%	46,6%	28,8 gramos
YOLOv8-M [13]	68,2%	50,6%	79,3 gramos
YOLOv8-L [13]	71,6%	51,4%	165,7 gramos
YOLOv9-S [39]	65,1%	48,0%	39,6 gramos
L. Kang y col. [23]	70,0%	50,3%	26,7 gramos
CDS-YOLOv8 (nuestro)	73,2%	55,4%	26,6 gramos

De los resultados de la comparación, es evidente que CDS-YOLOv8 exhibe el más avanzado
rendimiento en comparación con estos métodos de detección convencionales de dos y una etapa. Es

Machine Translated by Google

El rendimiento no solo supera a la última versión de YOLOv9-S sino que también supera al gran
versión de YOLOv8, logrando mejoras del 1.6% y 4% en mAP@0.5 y mAP@0.5:0.95,
respectivamente. CDS-YOLOv8 logra un mejor equilibrio entre precisión y computación
complejidad, lo que demuestra aún más su superioridad en escenarios de detección de vehículos.

4.5. Experimento de ablación con rastreador

Verificar la efectividad del detector mejorado y la mejora propuesta.
módulos en el seguimiento de vehículos, se realizó un experimento de ablación como se muestra en la Tabla 3.
Los resultados experimentales son los promedios basados en 40 secuencias de prueba:

Tabla 3. Resultados del experimento de ablación en el conjunto de datos UA-DETRAC.

Detector+ Rastreador	mIDF1	identificación	mMOTA
YOLOv8s+ BYTEPista	76,9%	855	67,2%
CDS-YOLOv8+ BYTEPista	78,2%	785	70,6%
CDS-YOLOv8+ BYTETrack+ KF mejorado	79,7%	717	73,1%
CDS-YOLOv8+ BYTETrack+ KF +GSI mejorado	80,3%	530	73,9%

En comparación con el detector original, la introducción del detector mejorado CDS- YOLOv8
aumenta mIDF1 en un 1,3%, reduce el IDS en un 70 y mejora significativamente mMOTA.
en un 3,4%. Esto refleja el papel crítico del detector en el sistema de seguimiento. Después,
después de mejorar el rastreador optimizando el filtro de Kalman, mIDF1 aumenta en un 1,5%, IDS
disminuye en 68 y mMOTA mejora en un 2,5%. Esto indica que el Kalman mejorado
El filtro puede manejar de manera más flexible el movimiento no lineal de los vehículos. Sobre esta base, introducir
GSI para procesar las trayectorias de seguimiento aumenta aún más mIDF1 en un 0,6%, significativamente
reduce el IDS en 187 y mejora mMOTA en un 0,8%, lo que demuestra la eficacia de
este método para llenar los vacíos de trayectoria. Usando el detector y rastreador mejorados, en comparación
Antes de las mejoras, mIDF1 aumenta un 3,4%, IDS disminuye en 325 y mMOTA
mejora en un 6,7%, mejorando significativamente el rendimiento de seguimiento de vehículos.

Para demostrar de forma más intuitiva la eficacia del detector y rastreador mejorados.
en el seguimiento de vehículos, se realizó un análisis de visualización de los resultados del seguimiento, como se muestra
en la Figura 7. Las cuatro columnas de imágenes de izquierda a derecha son la imagen original, el seguimiento
resultados usando el detector y rastreador originales, los resultados de seguimiento usando el mejorado
detector y rastreador, y los efectos de optimización del modelo mejorado en comparación con el
detector y rastreador originales.

Figura 7. Visualización de los resultados del seguimiento.

En la Figura 7, también seleccionamos tres escenarios representativos: soleado, nocturno y
lluvioso. En el escenario soleado, como se muestra en el área con un círculo rosa, CDS-YOLOv8, en comparación con
YOLOv8: no solo detectó más objetivos perdidos sino que también proporcionó límites más precisos
Detección de cajas. Por ejemplo, CDS-YOLOv8 pudo identificar de manera más completa un
camioneta blanca y un taxi en el borde de la imagen, mientras que YOLOv8 solo identificó una parte

Machine Translated by Google

región como cuadro delimitador. Además, el ID de seguimiento de la camioneta blanca era 1281 con el detector y rastreador originales, pero se redujo significativamente a 1099 después de las mejoras, lo que indica una mejora notable en la coherencia del seguimiento. En el escenario nocturno, el El detector mejorado identificó objetivos más pequeños y el ID de seguimiento del autobús en el izquierda disminuyó significativamente de 3060 a 2529. En el escenario lluvioso, YOLOv8 identificó la parte delantera de un coche de policía como un vehículo separado, mientras que CDS-YOLOv8 reconoció correctamente todo el cuadro delimitador del coche de policía. Además, la identificación de seguimiento del coche de policía. disminuyó significativamente de 5898 a 5026 después de las mejoras.

En general, el detector mejorado no solo redujo la cantidad de detecciones perdidas pero también proporcionó detecciones de cuadros delimitadores más precisas. La importante reducción de la identificación Los números para el mismo objetivo indican que el rastreador mejorado mantuvo una alta precisión. y coherencia en el seguimiento de vehículos. El detector y rastreador mejorados están mejor equipados para manejar escenarios complejos y cambios no lineales en vehículos en entornos urbanos.

4.6. Experimentos de comparación de rastreadores

Para validar el avance del rastreador mejorado, se realizaron experimentos comparativos. realizado con algoritmos convencionales de seguimiento de objetos de dos etapas. Para garantizar la equidad, todos Los experimentos utilizaron CDS-YOLOv8 para el detector. Los resultados del seguimiento se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4. Resultados de la comparación en el conjunto de datos UA-DETRAC. (Los mejores resultados están resaltados en negrita).

Rastreador	mIDF1	identificación	mMOTA
Clasificación profunda [29]	73,5%	2731	70,0%
Orden fuerte [17]	76,8%	2994	71,3%
OCLASIFICAR [40]	76,8%	2191	71,9%
SORTEO PROFUNDO [41]	77,1%	1830	72,1%
BYTEPista [16]	78,2%	785	70,6%
CLASIFICACIÓN BOT [30]	78,6%	727	72,9%
BYTETrack mejorado (el nuestro)	80,3%	530	73,9%

De los resultados de la comparación, se puede ver que el BYTETrack mejorado demuestra rendimiento de última generación. Análisis de los resultados del seguimiento BYTETrack y BOT-SORT algoritmos, es evidente que considerar cuadros de puntuación de baja confianza puede reducir el IDS, demostrando su eficacia en la coherencia de la identidad. Además, DeepSORT, StrongSORT, DeepOCSORT y BOT-SORT emplean el método ReID, que reduce la velocidad de funcionamiento de la red. Por el contrario, el BYTETrack mejorado presentado en este documento no utiliza el método ReID y aún así logra el mayor rendimiento en todos las tres métricas de seguimiento, logrando un buen equilibrio entre velocidad de seguimiento y precisión.

5. Conclusiones

Este documento aborda los desafíos encontrados en la detección y seguimiento de vehículos, tales como escenarios complejos, diversidad de escala causada por diferentes tamaños de vehículos y cámaras ángulos y oclusiones parciales en escenas densas. Se propusieron una serie de mejoras para abordar estas cuestiones.

En términos de detección de vehículos, introducimos el módulo CG durante la reducción de resolución. Proceso que combina características locales y circundantes para formar características conjuntas. Estos Luego, las características conjuntas se ponderan utilizando información global, mejorando la extracción de características. capacidad del detector. Además, se reconstruyó e integró el módulo DRB. en el módulo C2f. Usando capas de convolución de núcleo grande y múltiples núcleos pequeños Se extrajeron circunvoluciones con dilataciones, diferentes escalas y características dispersas. Se empleó tecnología de reparametrización para generar núcleos de convolución equivalentes, lo que permitió para una mejor extracción integral de características durante la etapa de inferencia, abordando efectivamente problemas de múltiples escalas. También reemplazamos el NMS tradicional por Soft-NMS, que Maneja mejor los escenarios de oclusión parcial a través de una caída suave de la confianza. en el aspecto de seguimiento de vehículos, mejoramos el vector de estado del filtro Kalman e introdujimos

Machine Translated by Google

una matriz de covarianza relacionada con el tiempo para afrontar mejor los movimientos dinámicos de los vehículos. Además, se incorporó el método GSI para llenar los vacíos de trayectoria causados por detecciones perdidas. Realizamos experimentos en el conjunto de datos UA-DETRAC, utilizando estudios de ablación para demostrar la función de cada módulo y empleando análisis visual para mostrar intuitivamente los efectos de optimización del modelo mejorado. Los experimentos comparativos mostraron el rendimiento avanzado del CDS-YOLOv8 y el algoritmo BYTETrack mejorado.

En el futuro, nos centraremos más en la detección y el seguimiento de vehículos desde diferentes perspectivas, mientras exploramos modalidades más diversas, como imágenes infrarrojas, radares y otros métodos, para mejorar la eficacia de la detección y el seguimiento de vehículos.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, LY; metodología, LY; software, LY; validación, LY e YC; análisis formal, CS; investigación, CS y RL; curación de datos, LY y CX; redacción: revisión y edición, LY; visualización, LY; supervisión, YC; Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por el proyecto Talent Fund de China West Normal University (No. 463177).

Declaración de disponibilidad de datos: Las contribuciones originales presentadas en el estudio están incluidas en el artículo; Se pueden dirigir más consultas al primer autor.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Boukerche, A.; Tao, Y.; Sun, P. Métodos de predicción del flujo de tráfico vehicular basados en inteligencia artificial para respaldar la inteligencia sistemas de transporte. Computadora. Neto. 2020, 182, 107484. [Referencia cruzada]
2. Ju, Y.; Cao, Z.; Chen, Y.; Liu, L.; Pei, Q.; Mumtaz, S.; Dong, M.; Guizani, M. Descarga segura asistida por NOMA para redes informáticas de borde vehicular con aprendizaje por refuerzo profundo asíncrono. Traducción IEEE. Intel. Transp. Sistema. 2024, 25, 2627–2640 [Referencia cruzada]
3. Roy, D.; Li, Y.; Jian, T.; Tian, P.; Chowdhury, K.; Ioannidis, S. Detección multimodal y fusión de datos para la detección de múltiples vehículos. Traducción IEEE. Multimed. 2023, 25, 2280–2295. [Referencia cruzada]
4. Humayun, M.; Ashfaq, F.; Jhanjhi, Nueva Zelanda; Alsadun, MK Gestión del tráfico: detección de vehículos a múltiples escalas en condiciones climáticas variables Condiciones que utilizan YOLOv4 y Spatial Pyramid Pooling Network. Electrónica 2022, 11, 2748. [CrossRef]
5. Deshmukh, P.; Satyanarayana, RSG; Majhi, S.; Sahoo, Reino Unido; Das, SK Swin Transformer Detección de vehículos basada en Indisciplinado Entorno de tráfico. Sistema experto. Aplica. 2023, 213, 118992. [Referencia cruzada]
6. Wang, J.; Dong y.; Zhao, S.; Zhang, Z. Un método de seguimiento y detección de vehículos de alta precisión basado en el mecanismo de atención. Sensores 2023, 23, 724. [CrossRef] [PubMed]
7. Bui, T.; Wang, G.; Wei, G.; Zeng, Q. Algoritmo de seguimiento y detección de objetos múltiples de vehículos basado en la versión mejorada Solo mira una vez 5s y DeepSORT. Aplica. Ciencia. 2024, 14, 2690. [Referencia cruzada]
8. Wu, Y.; Wang, T.; Gu, R.; Liu, C.; Xu, B. Algoritmo de detección de vehículos nocturnos basado en tecnología de traducción de imágenes 1. J. Intell. Sistema difuso. 2024, 46, 5377–5389. [Referencia cruzada]
9. Xu, B.; Liu, X.; Feng, G.; Liu, C. Un marco monocular para la identificación precisa de la distribución espacio-temporal de Cargas de ruedas de vehículos en escenarios de oclusión. Ing. Aplica. Artif. Intel. 2024, 133, 107972. [Referencia cruzada]
10. Xu, B.; Liu, C. Método integrado del modelo de aprendizaje profundo múltiple y basado en detección de puntos clave para identificar la carga por eje del vehículo Distribución espacial-temporal. Adv. Ing. Informar. 2024, 62, 102688. [Referencia cruzada]
11. Xu, H.; Lai, S.; Li, X.; Yang, Y. Modelo de detección de automóviles entre dominios con mecanismo de atención de bloques convolucional integrado. Imagen Vis. Computadora. 2023, 140, 104834. [Referencia cruzada]
12. Zhang, C.; Yang, C.; Wu, D.; Dong, H.; Deng, B. Reidentificación de vehículos con vista cruzada basada en la coincidencia de gráficos. Aplica. Intel. 2022, 52, 14799–14810. [Referencia cruzada]
13. Ultralíticos. YOLOv8: Detección de objetos en tiempo real y segmentación de imágenes. Repositorio de GitHub. Disponible en línea: https://github.com/ultralytics/ultralytics (consultado el 28 de julio de 2024).
14. Wu, T.; Tang, S.; Zhang, R.; Cao, J.; Zhang, Y. CGNet: una red ligera guiada por contexto para la segmentación semántica. Traducción IEEE. Proceso de imagen. 2021, 30, 1169–1179. [Referencia cruzada] [PubMed]
15. Ding, X.; Zhang, Y.; Ge, Y.; Zhao, S.; Canción, L.; Yue, X.; Shan, Y. UniRepLKNet: una ConvNet de núcleo grande de percepción universal para audio, vídeo, nube de puntos, series temporales y reconocimiento de imágenes. arXiv 2024, arXiv:2311.15599.
16. Zhang, Y.; Sol, P.; Jiang, Y.; Yu, D.; Weng, F.; Yuan, Z.; Luo, P.; Liu, W.; Wang, X. ByteTrack: seguimiento de múltiples objetos asociando cada cuadro de detección. En Computer Vision—ECCV 2022, Actas de la 17.ª Conferencia Europea, Tel Aviv, Israel, 23-27 de octubre de 2022; Avidan, S., Brostow, G., Cissé, M., Farinella, GM, Hassner, T., Eds.; Springer Nature Suiza: Cham, Suiza, 2022; págs. 1–21.

Machine Translated by Google

17. Du, Y.; Zhao, Z.; Canción, Y.; Zhao, Y.; Su, F.; Gong, T.; Meng, H. StrongSORT: Haga que DeepSORT vuelva a ser grandioso. Traducción IEEE. Multimed. 2023, 25, 8725–8737. [Referencia cruzada]

18. Liu, W.; Anguelov, D.; Erhan, D.; Szegedy, C.; Caña, S.; Fu, C.-Y.; Berg, AC SSD: detector MultiBox de disparo único. En Computer Vision—ECCV 2016, Actas de la 14.ª Conferencia Europea, Ámsterdam, Países Bajos, 11 a 14 de octubre de 2016; Leibe, B., Matas, J., Sebe, N., Welling, M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Suiza, 2016; págs. 21–37.

19. Lin, T.-Y.; Goyal, P.; Girshick, R.; Él, K.; Dollar, P. Pérdida focal para la detección de objetos densos. En actas de IEEE International Conferencia sobre visión por computadora (ICCV), Venecia (Italia), 22 a 29 de octubre de 2017; págs. 2980–2988.

20. Girshick, R. Rápido R-CNN. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE sobre Visión por Computadora (ICCV), Santiago, Chile, 7 a 13 de diciembre de 2015; págs. 1440-1448.

21. Cai, Z.; Vasconcelos, N. Cascade R-CNN: Profundizando en la detección de objetos de alta calidad. En Actas de la Conferencia IEEE sobre Visión por Computadora y Reconocimiento de Patrones (CVPR), Salt Lake City, UT, EE. UU., 18 a 23 de junio de 2018; págs. 6154–6162.

22. Chen, Z.; Guo, H.; Yang, J.; Jiao, H.; Feng, Z.; Chen, L.; Gao, T. Algoritmo de detección rápida de vehículos en escenas de tráfico basado en SSD mejorado. Medida 2022, 201, 111655. [CrossRef]

23. Kang, L.; Lu, Z.; Meng, L.; Gao, Z. YOLO-FA: Detector YOLO tipo 1 basado en atención difusa para detección de vehículos. Sistema experto. Aplica. 2024, 237, 121209. [Referencia cruzada]

24. Bié, M.; Liu, Y.; Li, G.; Hong, J.; Li, J. Algoritmo de detección de vehículos en tiempo real basado en un dispositivo liviano que solo mira una vez (YOLOv5n-L) Enfoque. Sistema experto. Aplica. 2023, 213, 119108. [Referencia cruzada]

25. Wang, B.; Li, Y.-Y.; Xu, W.; Wang, H.; Hu, L. Método de detección de vehículos y peatones basado en YOLOv8 mejorado. Electrónica 2024, 13, 2149. [Referencia cruzada]

26. Wang, Z.; Zheng, L.; Liu, Y.; Li, Y.; Wang, S. Hacia el seguimiento de múltiples objetos en tiempo real. En Computer Vision—ECCV 2020, Actas de la 16.ª Conferencia Europea, Glasgow, Reino Unido, 23 a 28 de agosto de 2020; Vedaldi, A., Bischof, H., Brox, T., Frahm, J.-M., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Suiza, 2020; págs. 107-122.

27. Zhang, Y.; Wang, C.; Wang, X.; Zeng, W.; Liu, W. FairMOT: Sobre la equidad de la detección y reidentificación en el seguimiento de múltiples objetos. En t. J. Computación. Vis. 2021, 129, 3069–3087. [Referencia cruzada]

28. Bewley, A.; Ge, Z.; Ott, L.; Ramos, F.; Upcroft, B. Seguimiento sencillo en línea y en tiempo real. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE sobre Procesamiento de Imágenes (ICIP) de 2016, Phoenix, AZ, EE. UU., 25 a 28 de septiembre de 2016; págs. 3464–3468.

29. Wojke, N.; Bewley, A.; Paulus, D. Seguimiento simple en línea y en tiempo real con una métrica de asociación profunda. En Actas de la Conferencia internacional IEEE sobre procesamiento de imágenes (ICIP) de 2017, Beijing (China), 17 a 20 de septiembre de 2017; págs. 3645–3649.

30. Aharon, N.; Orfaig, R.; Bobrovsky, B.-Z. BoT-SORT: Seguimiento multipeatonal de asociaciones robustas. arXiv 2022, arXiv:2206.14651.

31. Zhao, Z.; Ji, Z.; Yao, Y.; Él, Z.; Du, C. Modelo de detección mejorado y estrategia de puntuación conjunta para el seguimiento de varios vehículos. IEEE Acceso 2023, 11, 30807–30818. [Referencia cruzada]

32. Zhang, K.; Wu, F.; Sol, H.; Cai, M. Detección monocular de velocidad de vehículos basada en YOLOX y DeepSORT mejorados. Neural Computadora. Aplica. 2024, 36, 9643–9660. [Referencia cruzada]

33. Han, G.; Jin, Q.; Rong, H.; Jin, L.; Zhang, L. Algoritmo de seguimiento de vehículos basado en aprendizaje profundo en perspectiva en la carretera. Sostenibilidad 2023, 15, 1950. [CrossRef]

34. Wen, L.; Du, D.; Cai, Z.; Lei, Z.; Chang, MC; Qi, H.; Lim, J.; Yang, MH; Lyu, S. UA-DETRAC: Un nuevo punto de referencia y protocolo para detección y seguimiento de objetos múltiples. Computadora. Vis. Comprensión de la imagen. 2020, 193, 102907. [Referencia cruzada]

35. Zhang, S.; Chi, C.; Yao, Y.; Lei, Z.; Li, SZ Cerrando la brecha entre la detección basada en anclajes y sin anclajes mediante la selección de muestras de entrenamiento adaptativo. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones (CVPR), Seattle, WA, EE. UU., 13 a 19 de junio de 2020; págs. 9759–9768.

36. Ultralíticos. YOLOv5: Familia de arquitecturas y modelos de detección de objetos previamente entrenados en el conjunto de datos COCO. Repositorio de GitHub. Disponible en línea: https://github.com/ultralytics/yolov5 (consultado el 28 de julio de 2024).

37. Li, C.; Pequeño.; Jiang, H.; Weng, K.; Geng, Y.; Pequeño.; Ke, Z.; Li, Q.; Cheng, M.; Nie, W.; et al. YOLOv6: una detección de objetos de una sola etapa Marco para Aplicaciones Industriales. arXiv 2022, arXiv:2209.02976.

38. Wang, C.-Y.; Bochkovskiy, A.; Liao, H.-YM YOLOv7: La bolsa de regalos entrenable establece un nuevo estado del arte para detectores de objetos en tiempo real. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones (CVPR), Vancouver, BC, Canadá, 17 a 24 de junio de 2023; págs. 7464–7475.

39. Wang, C.-Y.; Sí, I.-H.; Liao, H.-YM YOLOv9: Aprenda lo que desea aprender utilizando información de gradiente programable. arXiv 2024, arXiv:2402.13616.

40. Cao, J.; Pang, J.; Weng, X.; Khirodkar, R.; Kitani, K. SORT centrado en la observación: repensar el SORT para un seguimiento robusto de múltiples objetos. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones (CVPR), Vancouver, BC, Canadá, 17 a 24 de junio de 2023; págs. 9686–9696.

41. Maggiolino, G.; Ahmad, A.; Cao, J.; Kitani, K. Deep OC-Sort: seguimiento de varios peatones mediante reidentificación adaptativa. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE sobre Procesamiento de Imágenes (ICIP) de 2023, Kuala Lumpur, Malasia, 8 a 11 de octubre de 2023; págs. 3025–3029.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Evolución de los parámetros de radiación de antena para Transición de aire a plasma

Tomasz Aleksander Mi´s

División de Física del Plasma, Centro de Investigación Espacial de la Academia Polaca de Ciencias, ul. Bartycka 18A, 00-716 Varsovia, Polonia; tmis@cbk.waw.pl o tomasz.a.mis@mailplus.pl

Resumen: Este artículo presenta la descripción de los parámetros de la antena relacionados con sus capacidades de radiación/recepción influenciadas por los parámetros del plasma en el entorno que rodea la antena, complementando los trabajos existentes sobre los parámetros de la antena (por ejemplo, la impedancia o las corrientes). Los parámetros considerados son los radios de las zonas de radiación (inductiva, Fresnel, Fraunhofer), el festoneado y la directividad; También se considera un método de transformación del patrón de radiación/recepción medido en aire/vacío al patrón esperado para condiciones plasmáticas dadas. Se tienen en cuenta tres condiciones de plasma simplificadas diferentes (diferentes densidades de electrones: 1,4 ×1012 m−3, 4 ×1011 m−3 y 108 m−3), con diferentes longitudes de antena (1 m, 10 m, 100 m) y propagación de la señal. modo (clásico- ionosférico, Whistler y Alfvén). Los hallazgos muestran que los parámetros de antena presentados y su patrón de radiación/recepción dependen en gran medida de las condiciones del plasma. Estos hallazgos pueden utilizarse para formular requisitos y limitaciones adicionales para el diseño mecánico de nuevos instrumentos para mediciones del clima espacial a bordo de naves espaciales (por ejemplo, alejar las antenas de la nave espacial para no alterar sus patrones de radiación/recepción o no medir la plasma alrededor de la nave espacial) o un procesamiento de datos más preciso de los satélites meteorológicos espaciales existentes, permitiendo, por ejemplo, una triangulación más precisa de la fuente de señal o su potencia espectral con respecto al rendimiento real de las antenas sumergidas e

Palabras clave: plasma; plasmasfera; magnetosfera; antena espacial; antena activa; parámetros de antena; patrón de radiación; pruebas de antenas; directividad; festoneado

check for updates

Citación: Mi´s, TA Evolución de Parámetros de radiación de antena para Transición de aire a plasma. Electrónica 2024, 13, 3040. https://doi.org/10.3390/electrónica13153040

Editores académicos: Jun Wang, Kuikui Fan, Jianfeng Zhu y Fan Wu

Recibido: 27 de junio de 2024
Revisado: 23 de julio de 2024
Aceptado: 26 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por el autor. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción; Emisiones Electromagnéticas y Antenas en Plasmas

Desde el comienzo de la era espacial y la exploración del entorno cercano a la Tierra, se puso un gran interés en investigar las propiedades de la vaina de partículas ionizadas que rodea el planeta: la plasmasfera, su variabilidad dependiendo de las condiciones solares, su influencia en la propagación de señales de radio y el efecto que tiene o puede tener en las naves espaciales y misiones espaciales tripuladas [1]. Desde la década de 1960, se han identificado numerosos fenómenos de radio naturales producidos por las interacciones entre el viento solar y la magnetosfera de la Tierra (por ejemplo, la radiación kilométrica auroral [2–4] y otros tipos de emisiones [5]), muchos de los cuales que se generan dentro de la guía de ondas terrestre (el espacio entre la superficie de la Tierra y las capas inferiores de la ionosfera) y son capaces de propagarse más a través de la ionosfera, ya sea a lo largo de las líneas del campo magnético o independientemente de ellas [6–8]. Estas emisiones varían mucho según sus rutas de propagación [9] y presentan una capacidad útil para ser empleadas como herramienta de detección remota para la ionosfera [10] y la plasmasfera [8], incluidas la magnetopausa y el arco de choque plasmasférico [11]. La propagación de estas señales depende en gran medida de las condiciones plasmáticas locales, tanto en la ionosfera como en la plasmasfera, lo que se ha investigado, por ejemplo, durante la aparición de erupciones solares de rayos X, que afectan significativamente a ambos entornos ionizados [12-15]. . Vale la pena señalar que los complejos cambios en los parámetros del medio ionizado (que incluyen no sólo la densidad de electrones, sino también la densidad de protones) son cruciales también para el análisis de los entornos cercanos a los planetas de los planetas expuestos a una radiación solar aún más intensa. influencias, por ejemplo, Mercurio [16].

Machine Translated by Google

Como muchas de estas emisiones naturales pueden recibirse con bastante facilidad en tierra [6] y en altitudes más cercanas a la ionosfera [4,17], su propagación a través del entorno magnetosférico a menudo requiere mediciones in situ (a veces sólo in situ [8]), llevado a cabo por naves e instrumentos especiales, por ejemplo, Interball-1 [18], POLRAD a bordo de Interball-2 [2], DEMETER [7], SWARM [3], PROGNOZ-8 [19], MAGION-4 [20] , ISEE 1 y 2 [5], CESAR [21], CORONAS [21], CLUSTER [22] o Arase [23]. Para maximizar la apertura efectiva de la antena para la recepción y, en algunos casos, experimentos activos, las antenas espaciales generalmente se diseñan como dipolos grandes (de hasta docenas de metros de longitud total), ya sea en forma de armadura o de alambre, con soporte opcional para otros sensores más pequeños, por ejemplo, los magnetómetros [23,24] o las sondas Langmuir [25]. Si bien son convenientes para realizar cálculos y pruebas en un entorno de aire/vacío, los dipolos presentan parámetros y rendimientos significativamente diferentes cuando se sumergen en un entorno ionizado. Se ha llevado a cabo un trabajo elaborado para determinar los parámetros de carga de dichas antenas, con respecto al ángulo de la intensidad del campo magnético local [26-28] o el patrón/modos de corriente en los cables de la antena dependiendo de los parámetros del plasma local [29,30]. Para las antenas activas/transmisoras, un elemento crucial es determinar el tamaño de la vaina plasmática que rodea el radiador y participa en la formación de la onda de radio [31], así como determinar las fórmulas para el campo eléctrico y magnético. intensidades en el espacio tridimensional (crucial para el mantenimiento de la precisión [32]) alrededor de la antena, ambas aproximadas para plasma anisotrópico [33], incluida la distribución espacial de los parámetros del plasma [34] y diferentes tipos de emisiones de radio dependiendo de la frecuencia y modo de propaga

Estos análisis muestran claramente las diferencias significativas entre los casos de aire/vacío y los casos de plasma para el diseño de la antena y los parámetros básicos de la antena, como la impedancia de entrada y la reactancia o el patrón de radiación; sin embargo, se dedica poca información al rendimiento real de la radiación espacial. de la antena, por ejemplo, cómo se forma y evoluciona el patrón de radiación en diferentes condiciones plasmáticas (esto es crucial para determinar, por ejemplo, la dirección de llegada de la señal registrada). Estas diferencias son importantes tanto en la etapa de diseño de la antena como en la operación de la antena, cuyo objetivo es entregar datos científicamente útiles que describan de la manera más precisa posible los fenómenos que aparecen dentro de la plasmasfera. Si bien las formulaciones más elaboradas y precisas para diferentes tipos de plasmas pueden incluirse durante la etapa de diseño de la antena, la verificación y prueba de los parámetros (por ejemplo, el patrón de radiación) pueden llevarse a cabo prácticamente sólo en condiciones de aire, lo que exige un método sencillo. Método de transformación de los resultados en el aire en resultados plasmáticos. Es más, a medida que el plasma real evoluciona alrededor de la antena espacial , la antena cambia constantemente su patrón de radiación y sus características de radiación (festoneado, directividad, zonas de radiación), tanto en el dominio de las variables del plasma como en el dominio de la frecuencia operativa. La evaluación de estos cambios, incluso de forma simplificada pero fácilmente implementable, es crucial para el análisis de los espectrogramas recibidos (por ejemplo, para determinar el ángulo de llegada de las señales registradas o la sensibilidad del sistema de antena en las condiciones plasmáticas dadas en el rango de frecuencia dado), así como la evaluación de la influencia potencial de los objetos externos (plumas, estructuras de satélites, otras antenas cercanas) sobre el plasma al que está sometida la antena (especialmente incluyendo la vaina plasmática [31]).

Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores, este artículo presenta métodos analíticos resumidos y simplificados (para entornos isotrópicos, el número de onda como una variable unidimensional y las condiciones del campo magnético se detallan más adelante) para la determinación de los parámetros esperados de la antena: patrón de radiación, festoneado, directividad y sensibilidad espectral. —para las condiciones plasmáticas y geométricas dadas, permitiendo evaluar mejor el caso de funcionamiento de la antena dentro de un plasma, facilitando la evaluación de la antena durante las pruebas y ofreciendo un aumento en la precisión en el análisis de los espectrogramas registrados (también espectrogramas de las misiones espaciales mencionadas anteriormente).): cierran efectivamente la brecha entre los análisis de antenas existentes (por ejemplo, la impedancia y los patrones de corriente) y su desempeño real en el espacio circundante.

Machine Translated by Google f

f

tt

2. Evolución de las Zonas de Radiación

Las zonas de radiación alrededor de la antena se pueden describir como los rangos en los que la energía radiada por la antena se almacena inicialmente (cerca de la superficie de la antena) en el espacio libre en forma reactiva, luego, a medida que aumenta la distancia a la antena, la se forma un frente de ondas de radio con sus componentes básicos de campo eléctrico y magnético; la energía toma la forma radiativa [36]. La Figura 1 muestra el esquema básico de las zonas alrededor de un dipolo simétrico, indicando el radio de la zona de Fresnel rFresnel, detrás del cual la forma reactiva o energía emitida es dominante, y el radio de la zona de Fraunhofer rFraunhofer, después del cual el frente de ondas de radio adquiere forma completa. Además, para una dimensión física de antena h menor que la longitud de onda λ, también se indica la zona limitada por la longitud de onda (considerada reactiv

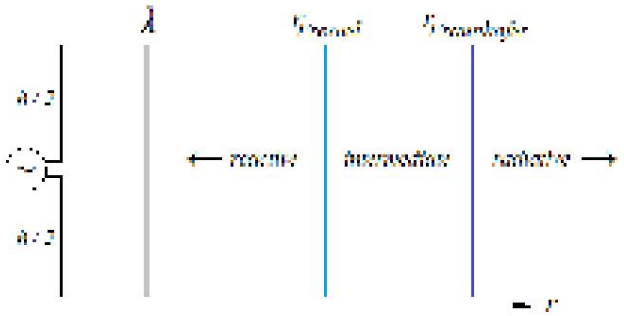


Figura 1. Esquema de las zonas de radiación alrededor de un dipolo simétrico.

Los radios de zona posteriores para el i-ésimo λ se pueden definir como [37]:

$$h\ rFresnel_i = \frac{\lambda}{2}\sqrt{\frac{h}{2\ 2\lambda_i}} \quad (1)$$

$$rFraunhofer = \lambda_i + \frac{2h^2}{\lambda_i} \quad (2)$$

Para formulaciones matemáticas precisas de los componentes del campo eléctrico y magnético en la elevación θ, la orientación φ y las direcciones radiales r desde la antena, el límite θ distancia que separa las zonas reactiva y radiativa rFraunhofer_approx. se puede definir como [38]:

$$rFraunhofer_{aprox.} = \frac{2\ 4\pi}{\lambda_0} - \frac{mi\ 2ne}{2\ meses0c} \quad (3)$$

donde λ0 [m] es la longitud de onda del espacio libre, e es la carga eléctrica del electrón (1,602 ×10−19 C), ne [1/m3] es la concentración/densidad del electrón, me es la masa del electrón (9,109 ×10−31 kg), ε0 es la permitividad eléctrica en el espacio libre (8,854 ×10−12 F/m) y c es la velocidad de la luz en el espacio libre (300.000.000 m/s). Para esta formulación, la zona cercana de radiación (reactiva) se ubica a distancias r << rFraunhofer_approx.; para la zona intermedia: r ~ rFraunhofer_approx. y para la zona radiativa: r >> rFraunhofer_approx..

El i-ésimo λ se puede calcular de la siguiente manera:

$$\lambda_i = \frac{2\pi}{k_2} \quad (4)$$

donde ki denota el número de onda para un modo de propagación específico dado. En este artículo, se consideran tres modos de propagación básicos para frecuencias más bajas: el modo Whisler (kW), es decir, para las frecuencias por debajo de la frecuencia del plasma de electrones local, aproximadamente 1400,564 kHz [35], el modo Alfvén (kA), es decir, para las frecuencias por debajo de la frecuencia giromagnética del ion local, aproximada como 40,215 Hz [35], y el número de onda kJ calculado para las condiciones de propagación determinadas por la frecuencia de corte ionosférica (indicada con el subíndice 'clásico') para antenas de elementos de corriente pequeños [38] .

Machine Translated by Google

Para el modo silbador, según lo indicado por Bannister et al. [35], el número de onda es igual a

$$\text{kilovatio} = \frac{1}{C}\sqrt{\frac{2\pi\ f\ eno}{B0\varepsilon\ 0}} \quad (5)$$

donde f [Hz] es la frecuencia de funcionamiento y B0 [T] es la inducción del campo magnético paralela a la dirección de propagación de la onda (perpendicular al eje de la antena).

Para el modo Alfvén, después de Bannister et al. [35], el número de onda se formula de la siguiente manera:

$$kA = \frac{2\pi\ f}{C}\sqrt{\frac{nimi}{\varepsilon\ 0}} \quad (6)$$

donde ni [1/m3] es la concentración de iones, igual a ne , y mi [kg] es la masa promedio de iones, aproximada como 3,17 ×10-26 kg [35].

Para el caso ionosférico "clásico" (en el que el frente de onda entra en la ionosfera y está sujeto a absorción, refracción y reflexión, dependiendo únicamente de la frecuencia y ne), el número de onda lo proporciona DJ Bem [38] de la siguiente manera:

$$kJ = \sqrt{\frac{4\pi\ 2}{\lambda\ 2_0} - \frac{e\ 2ne}{2\ me\varepsilon\ 0c}} \quad (7)$$

de manera similar a la derivación de la Fórmula (3).

Los cuatro radios de las siguientes zonas de radiación: inductiva (para longitud de antena h [m] << λ0), Fresnel, Fraunhofer y Fraunhofer clásico, se han calculado para diferentes concentraciones de electrones ejemplares: capa F ionosférica en condiciones de luz diurna (1,4 ×1012 m-3 [38]), capa F ionosférica para condiciones nocturnas (4 ×1011 m-3 [38]) y condiciones heliosféricas, generalizadas como 108 m-3 [39].

tt f

Los tres números de onda considerados se representan en las Figuras 2 a 4. Cada concentración de electrones se empleó para cálculos para tres longitudes de antena diferentes h: 1 m, 10 my 100 m (antena tratada como un dipolo simétrico). Puede observarse que los órdenes de magnitud de los números de onda de los casos de Alfvén difieren significativamente de los de los casos de Whistler y de la ionosfera clásica; esto provocará posteriormente la exclusión de algunos de los casos de Alfvén de la comparación directa con otros casos debido a su tamaños gigantescos (en comparación con la apertura real de la antena). Para el caso heliosférico, también se puede observar que la función ionosférica clásica de k (Fórmula (7)) comienza a superponerse con el rango para el modo silbador de la función k (Fórmula (5)); por lo tanto, es importante tomar teniendo en cuenta el rango de frecuencias al que es aplicable la función dada y los tamaños finales de los radios de las zonas de radiación resultantes, dándose prioridad al radio menor.

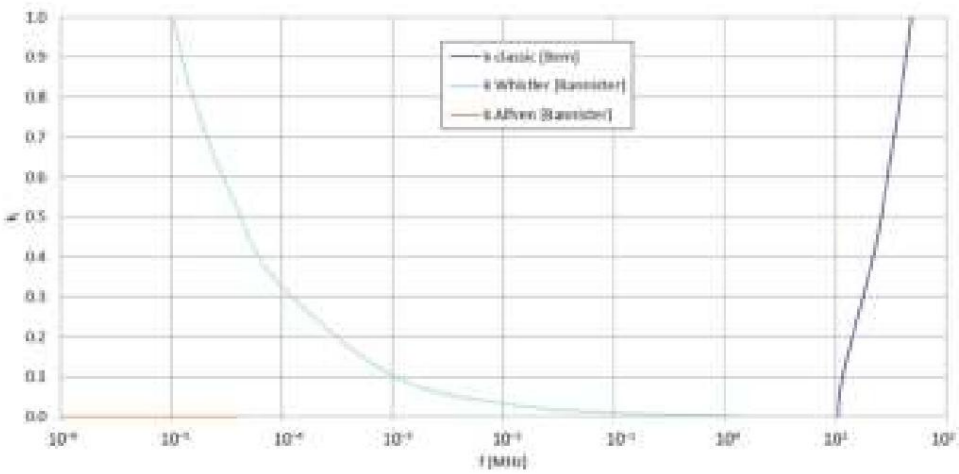


Figura 2. Valores calculados para los números de onda k para el caso clásico (ionosférico), el modo de propagación Whisler y el modo de propagación Alfvén para la densidad de electrones de luz diurna de la capa F ionosférica (1,4 ×1012 m−3).

Machine Translated by Google

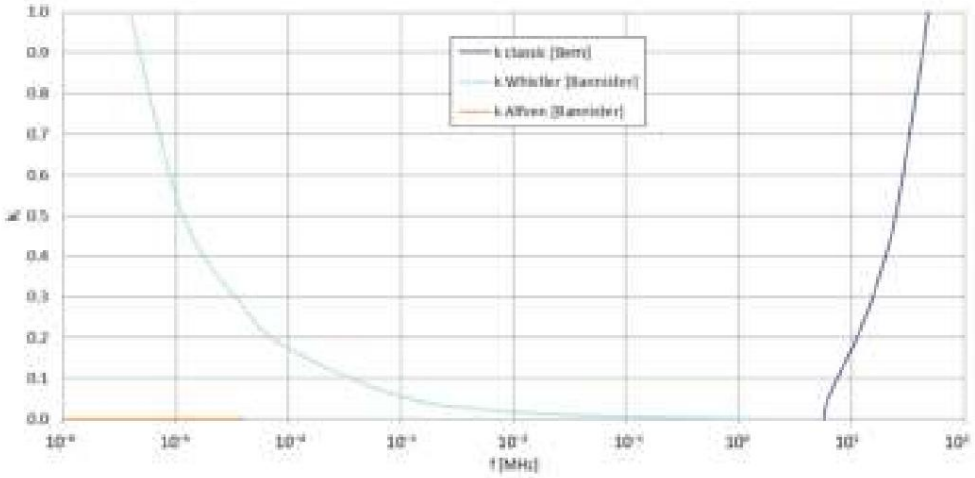


Figura 3. Valores calculados para los números de onda k para el caso clásico (ionosférico), el modo de propagación Whisler y el modo de propagación Alfvén para la densidad electrónica nocturna de la capa F ionosférica (4 ×1011 m−3).

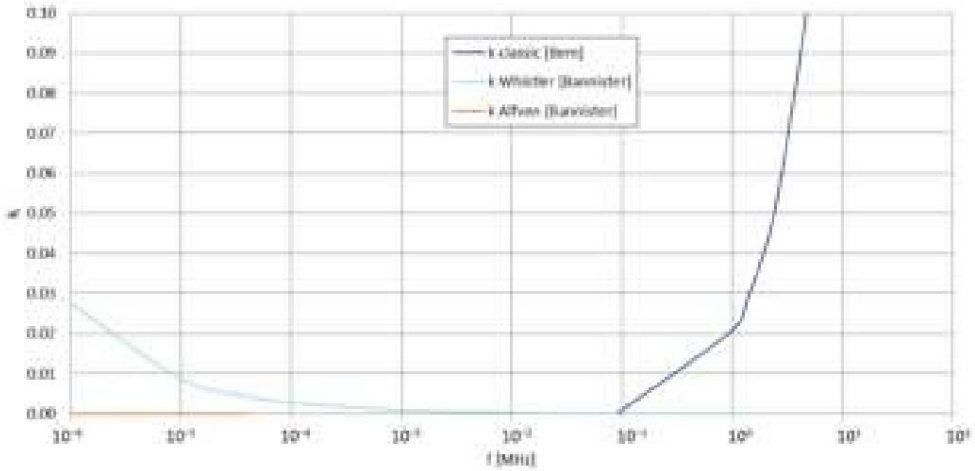


Figura 4. Valores calculados para los números de onda k para el caso clásico (ionosférico), el modo de propagación Whisler y el modo de propagación Alfvén para la densidad electrónica heliosférica aproximada (108 m−3).

Las figuras 5 a 7 presentan los radios de las zonas de radiación: aproximado de Fraunhofer (Fórmula (3)), Fresnel (Fórmula (1)), Fraunhofer (Fórmula (2)) y longitudes de onda para casos no plasmáticos (para λ << h). para kJ y h = 1 m; Figuras 8 a 10: para kJ y h = 10 m y Figuras 11 a 13: para kJ y h = 100 m. Puede observarse que la zona de Fraunhofer de la Fórmula (2) se expande significativamente con el aumento de las dimensiones de la antena, mientras que la indicación aproximada de la zona de Fraunhofer (por ejemplo, que indica la presencia o falta de presencia de ciertos componentes de campos) permanece más convergente al rango inductivo (longitud de onda), situándose la zona de Fresnel como la más grande en estos órdenes de magnitud. Estos conjuntos de funciones y gráficos se aplicarán generalmente a las observaciones de radio en frecuencias bajas MHz.

La Figura 14 muestra los radios aproximados de las zonas de radiación de Fraunhofer (3) para kW y todos los rangos ne considerados (independientes de la fórmula h); Figuras 15 a 17: para los radios de las zonas de Fresnel (1) para kW y todos los rangos ne y valores h considerados; Figuras 18-20: para los radios de las zonas de Fraunhofer (2) para kW y todos los rangos ne y valores h considerados; Figuras 21 a 23: para los radios de las zonas de Fresnel (1) para kA y todos los rangos ne y valores h considerados (los radios de las zonas de Fraunhofer para kA se omitieron debido a grandes diferencias en los órdenes de magnitud de sus valores en comparación con los valores de la apertura de la antena h).

Machine Translated by Google

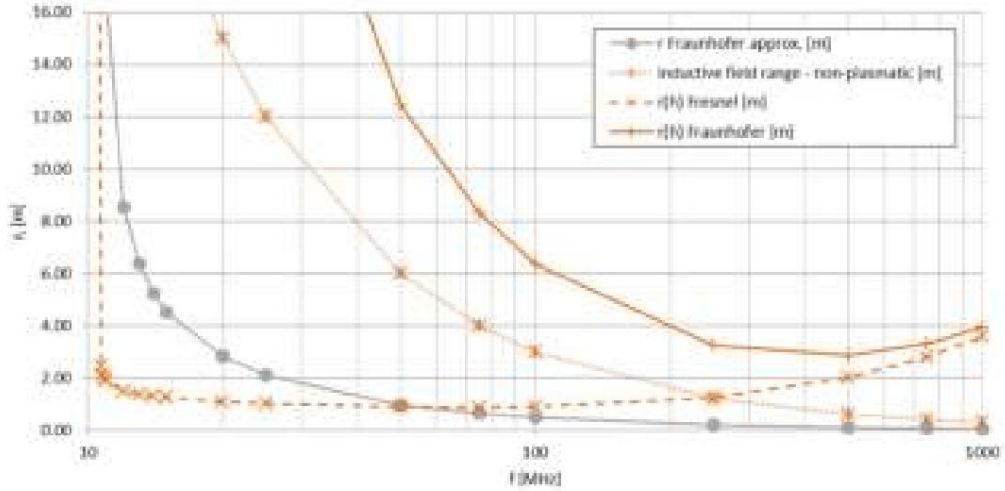


Figura 5. Radios de las zonas de radiación calculados para el enfoque ionosférico clásico (kJ) para la densidad de electrones de luz diurna de la capa F ionosférica (1,4 ×1012 m−3) y h = 1 m.

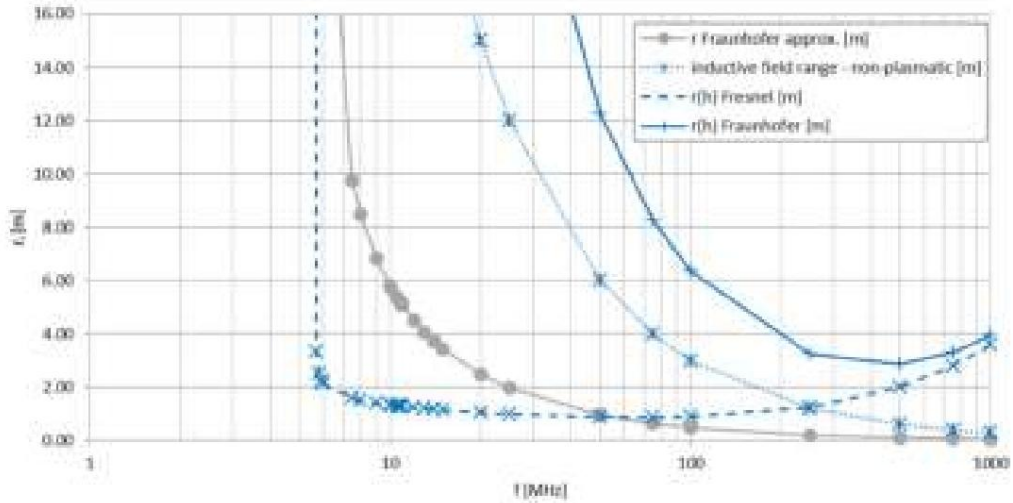


Figura 6. Radios de las zonas de radiación calculados para el enfoque ionosférico clásico (kJ) para la densidad electrónica nocturna de la capa F ionosférica (4 ×1011 m−3) y h = 1 m.

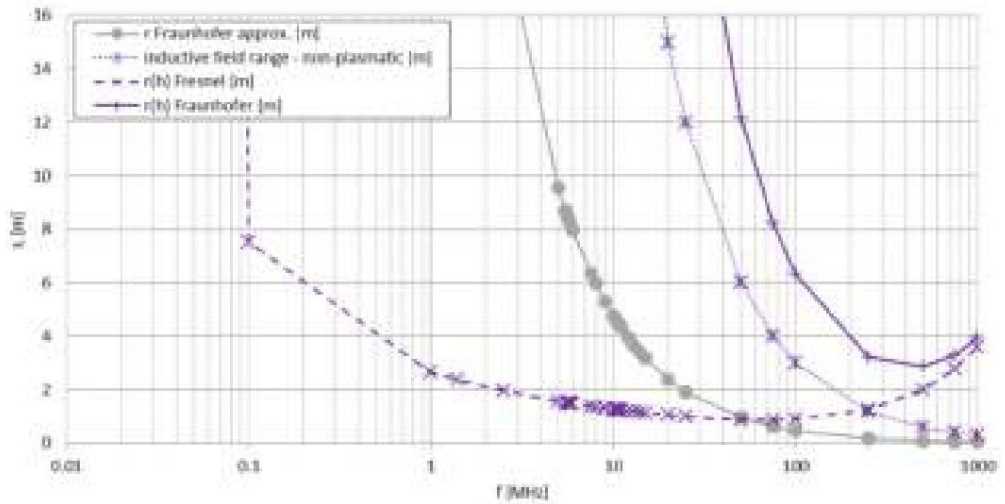


Figura 7. Radios de las zonas de radiación calculados para el enfoque ionosférico clásico (kJ) para la densidad electrónica heliosférica aproximada (108 m−3) y h = 1 m.

Machine Translated by Google

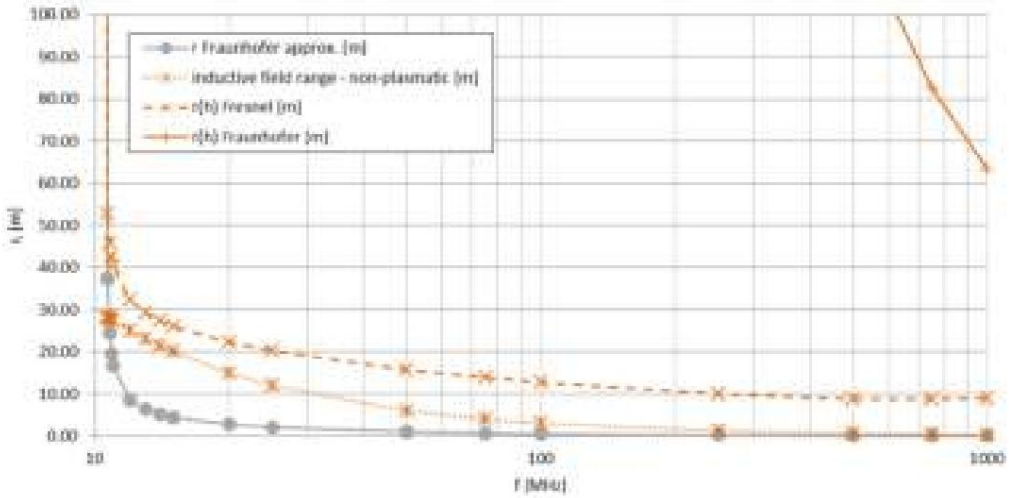


Figura 8. Radios de las zonas de radiación calculados para el enfoque ionosférico clásico (kJ) para la densidad de electrones de luz diurna de la capa F ionosférica (1,4 ×1012 m−3) y h = 10 m.

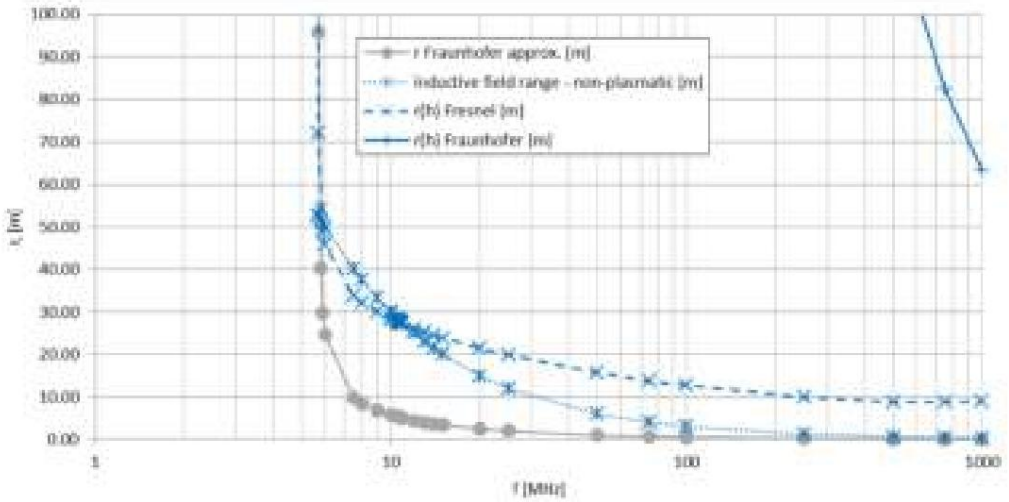


Figura 9. Radios de las zonas de radiación calculados para el enfoque ionosférico clásico (kJ) para la densidad electrónica nocturna de la capa F ionosférica (4 ×1011 m−3) y h = 10 m.

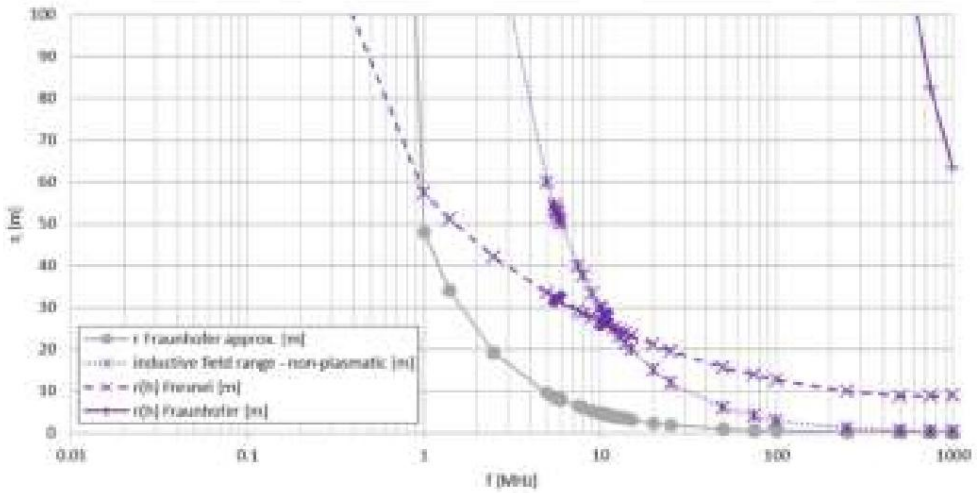


Figura 10. Radios de las zonas de radiación calculados para el enfoque ionosférico clásico (kJ) para la densidad electrónica heliosférica aproximada (108 m−3) y h = 10 m.

Machine Translated by Google

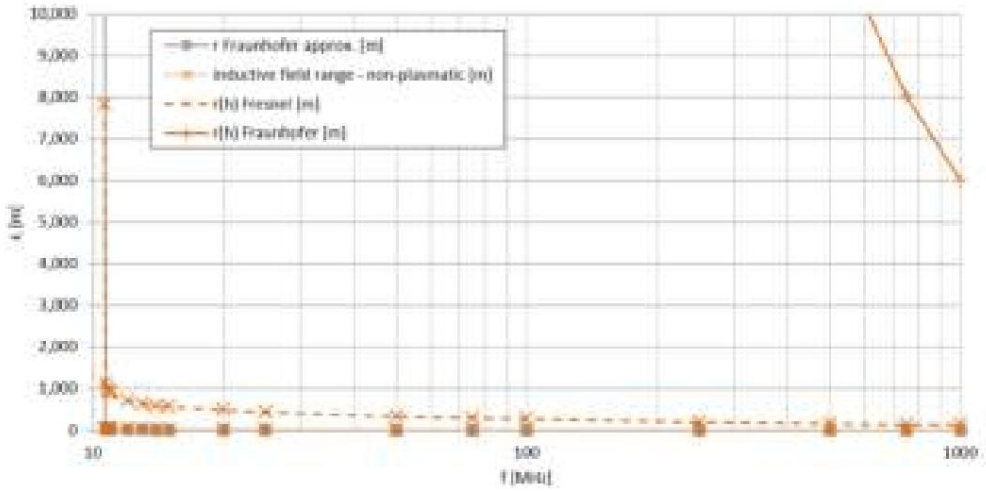


Figura 11. Radios de las zonas de radiación calculados para el enfoque ionosférico clásico (kJ) para la densidad de electrones de luz diurna de la capa F ionosférica (1,4 ×1012 m−3) y h = 100 m.

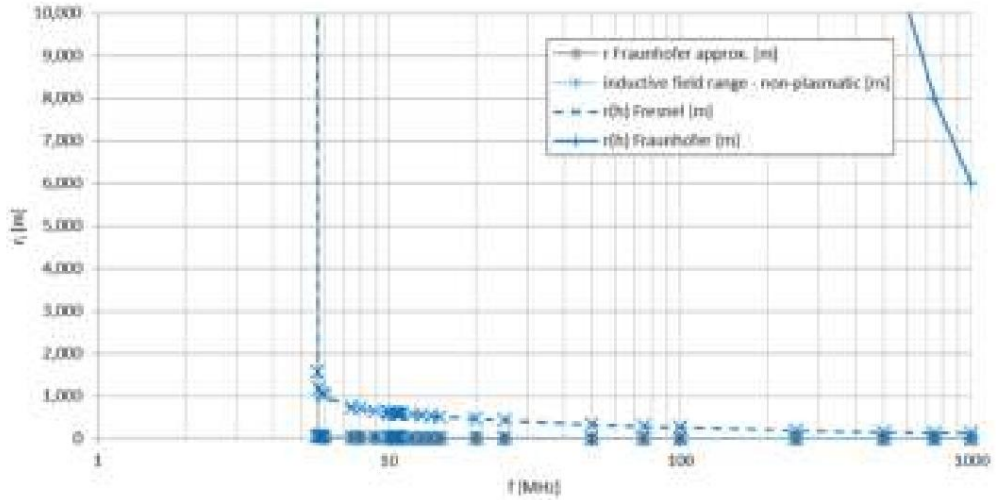


Figura 12. Radios de las zonas de radiación calculados para el enfoque ionosférico clásico (kJ) para la densidad electrónica nocturna de la capa F ionosférica (4 ×1011 m−3) y h = 100 m.

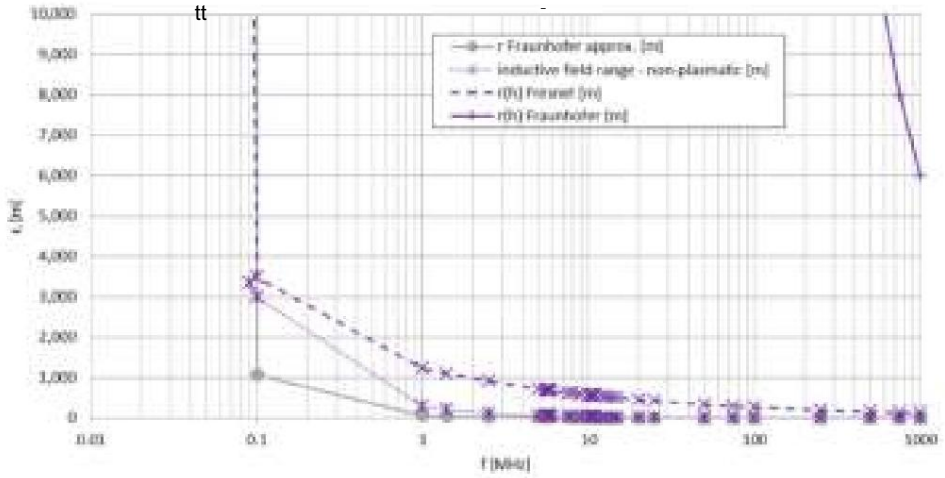


Figura 13. Radios de las zonas de radiación calculados para el enfoque ionosférico clásico (kJ) para la densidad electrónica heliosférica aproximada (108 m−3) y h = 100 m.

Machine Translated by Google

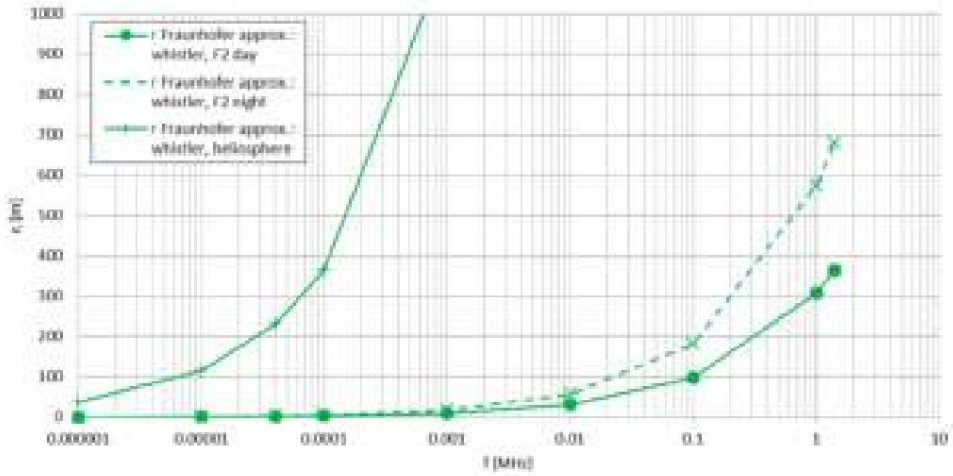


Figura 14. Radios aproximados calculados de las zonas de radiación de Fraunhofer para el modo de propagación de silbidos (kW) para h = 1 my diferentes concentraciones de electrones.

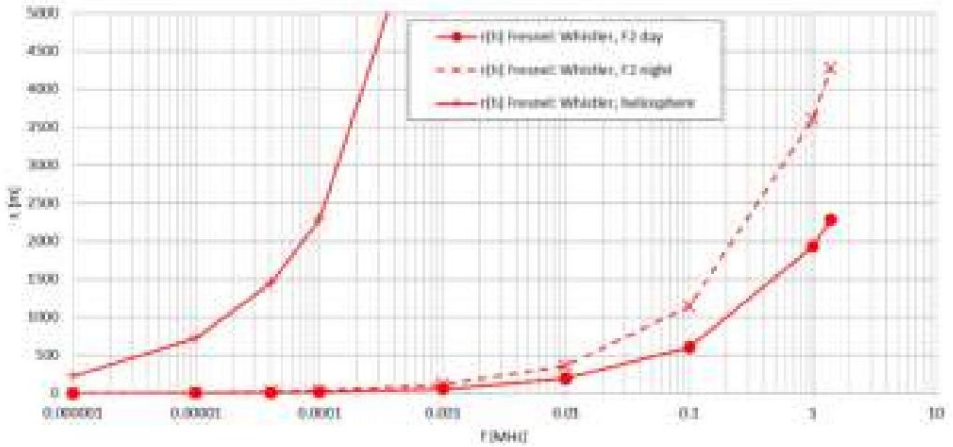


Figura 15. Radios de las zonas de radiación de Fresnel calculados para el modo de propagación de Whisler (kW) para h = my diferentes concentraciones de electrones.

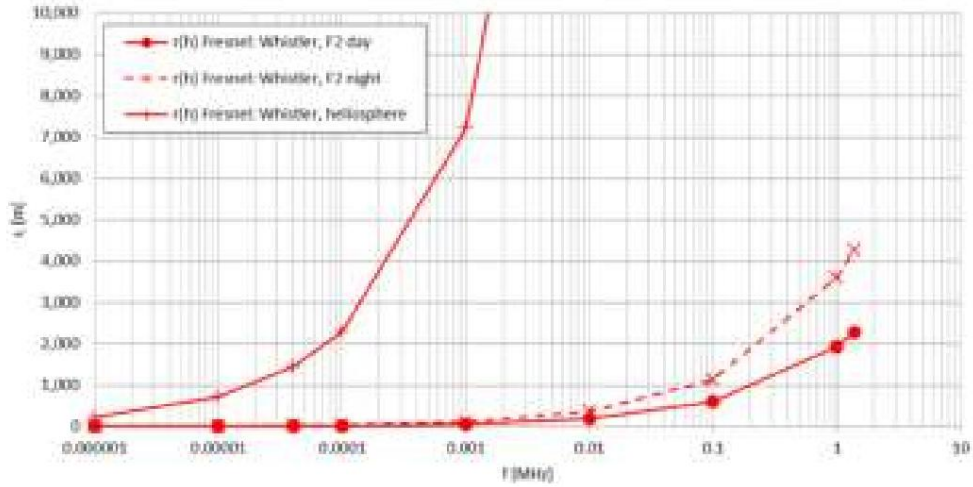
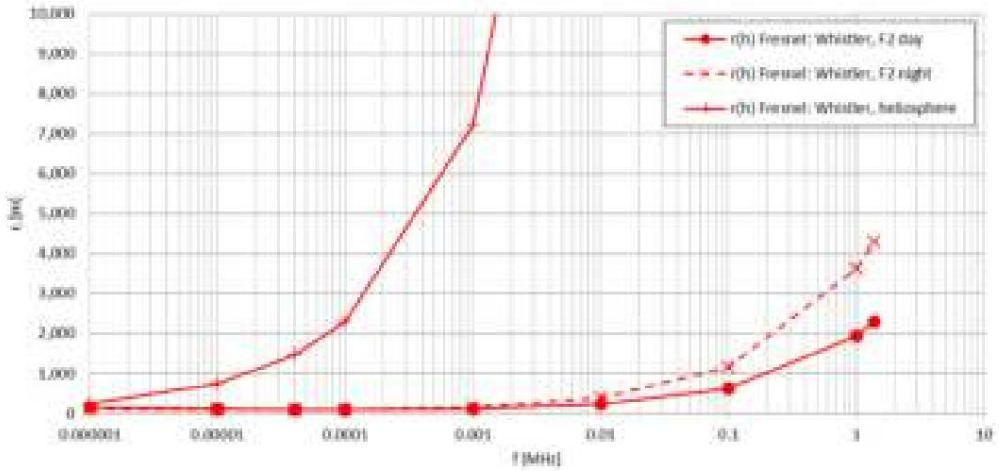


Figura 16. Radios de las zonas de radiación de Fresnel calculados para el modo de propagación de Whisler (kW) para h = 10 my diferentes concentraciones de electrones.

Machine Translated by Google



f

Figura 17. Radios de las zonas de radiación de Fresnel calculados para el modo de propagación de Whisler (kW) para ff h = 100 my diferentes concentraciones de electrones. f

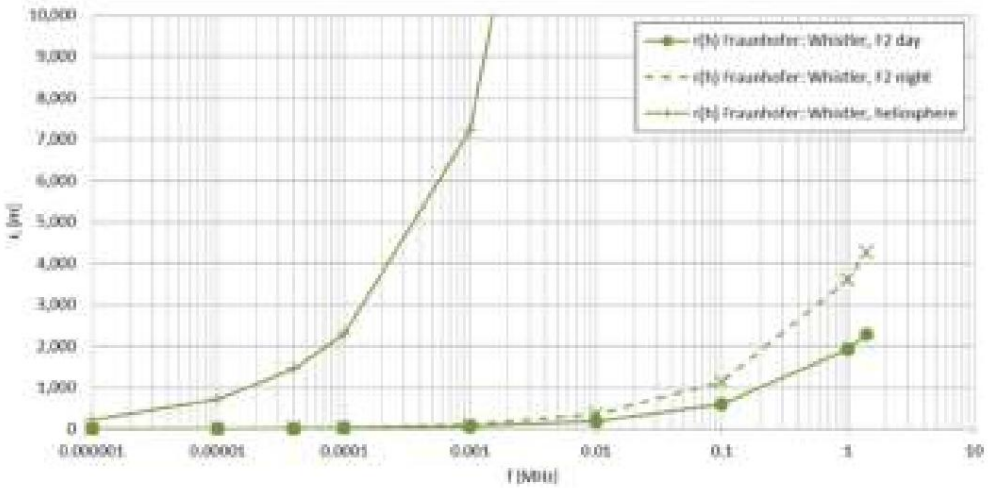


Figura 18. Radios de las zonas de radiación de Fraunhofer calculados para el modo de propagación de Whisler (kW) para h = 1 my diferentes concentraciones de electrones.

f

ff

ff

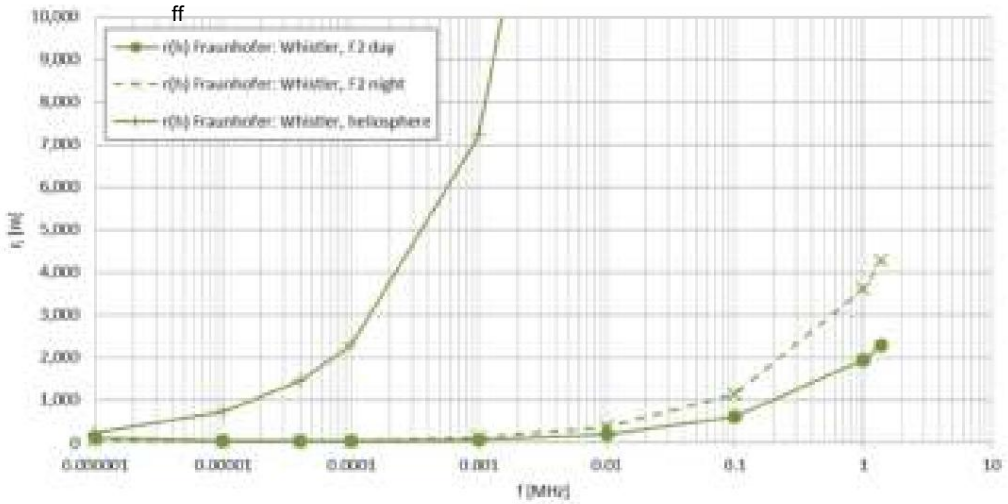


Figura 19. Radios de las zonas de radiación de Fraunhofer calculados para el modo de propagación de silbidos (kW) para h = 10 my diferentes concentraciones de electrones.

f

ff

ff

Machine Translated by Google

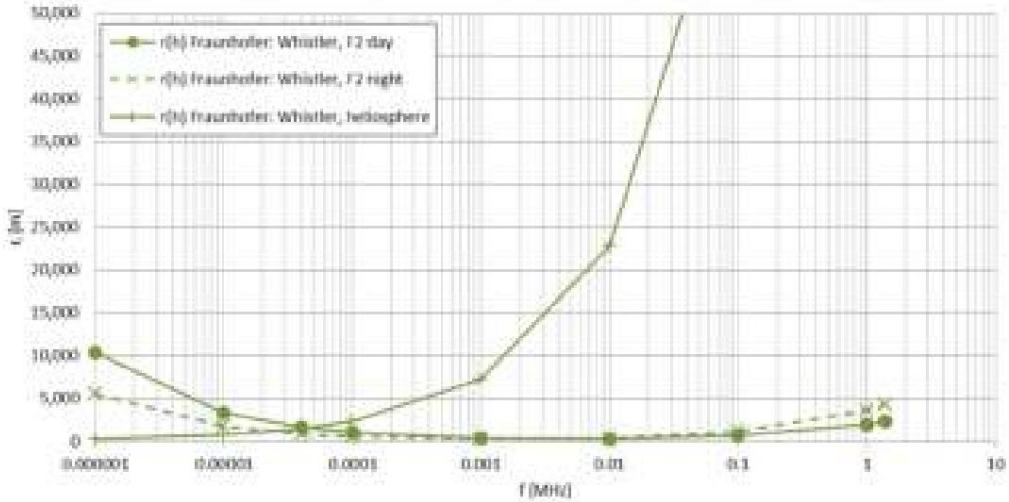


Figura 20. Radios de las zonas de radiación de Fraunhofer calculados para el modo de propagación de silbidos (kW) para h = 100 my diferentes concentraciones de electrones.

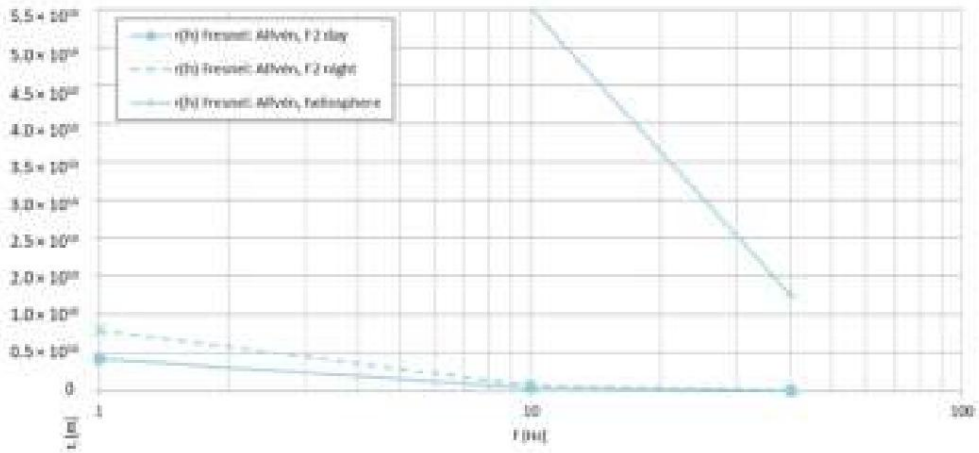


Figura 21. Radios de las zonas de radiación de Fraunhofer calculados para el modo de propagación de Alfvén (kA) para h = 1 my diferentes concentraciones de electrones.

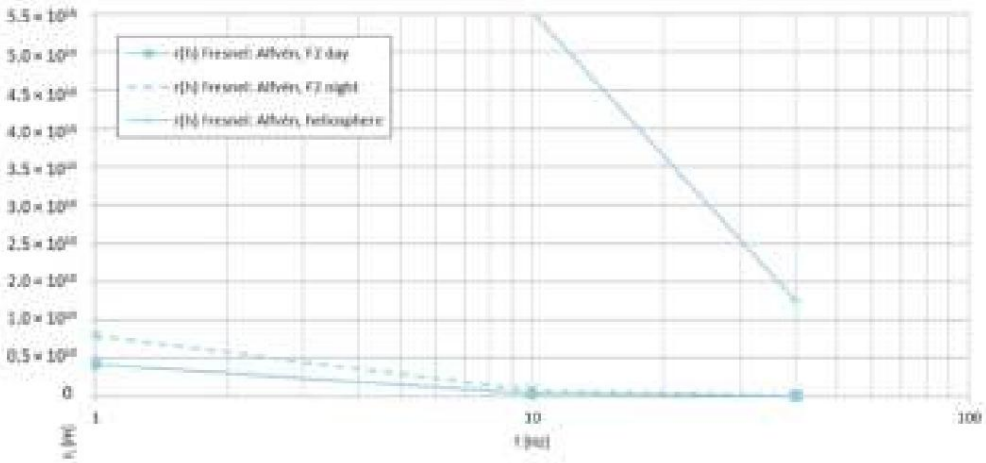


Figura 22. Radios de las zonas de radiación de Fraunhofer calculados para el modo de propagación de Alfvén (kA) para h = 10 my diferentes concentraciones de electrones.

Machine Translated by Google

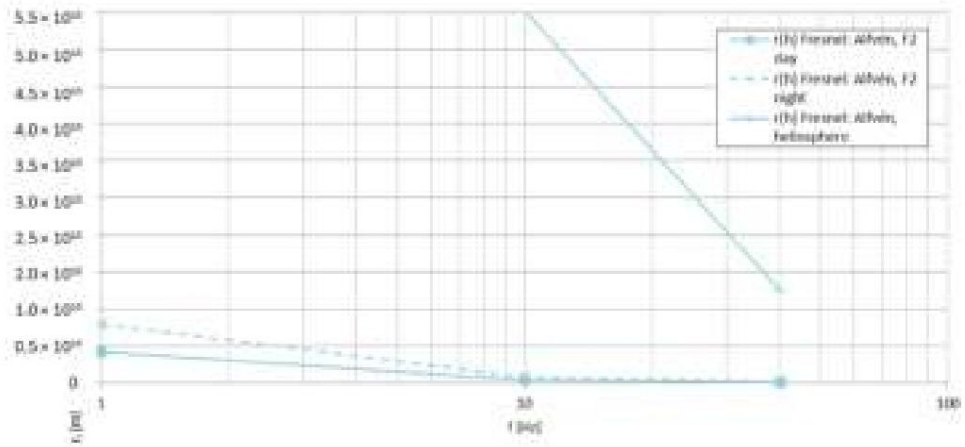


Figura 23. Radios de las zonas de radiación de Fraunhofer calculados para el modo de propagación de Alfvén (kA) para h = 100 my diferentes concentraciones de electrones.

Puede observarse que los radios aproximados de la zona de Fraunhofer (3) para condiciones heliosféricas siguen siendo muchos órdenes de magnitud más altos para una frecuencia determinada que para otros entornos ricos en electrones. Los radios de las zonas de Fraunhofer y Fresnel calculados utilizando fórmulas precisas muestran principalmente dependencia de la longitud de la antena y su orden de magnitud, manteniendo la relación general (y similar al caso anterior) entre los casos heliosféricos y ricos en electrones. El caso de la zona de Fraunhofer para la longitud de antena más grande (100 m) comienza a exhibir cambios/aumentos de longitud de radio para las frecuencias más bajas (~kHz e inferiores), a medida que la longitud de la antena se vuelve más proporcional a la longitud de onda de la señal.

3. Evolución del festoneado del patrón de radiación de la antena

El festoneado del patrón de radiación (y, según el teorema de reciprocidad [40], de la recepción) = − de la antena puede describirse como la aparición y reubicación de mínimos y máximos, dependientes de la longitud o la frecuencia, redirigiendo la potencia transmitida por el antena en ciertas direcciones o hacer que la antena sea más susceptible a la recepción de señales en ciertos ángulos. Si la solución exacta [36] que describe el número de máximos del patrón, es decir, los lóbulos, se adapta a condiciones ricas en electrones de manera similar a (3) y (7), la solución plasmática para el número nPlasma [-] del Las vieiras del patrón se pueden definir de la siguiente manera:

$$nPlasma = h\sqrt{\frac{4}{\lambda 2} - \frac{e\,2ne}{me\varepsilon\,0\pi\,2c\,2}} \quad (8)$$

donde los paréntesis definen el límite superior de la fórmula (es decir, el valor superior a 1 da nPlasma = 2, el valor superior a 2 da nPlasma = 3, etc.).

Las Figuras 24 y 25 presentan el número de lóbulos (valores de la fórmula entre paréntesis) para el entorno heliosférico (ne = 108 m−3) para todos los casos de propagación considerados (aproximación clásica, Whistler y Alfvén) y todas las antenas consideradas. longitudes h (1, 10 y 100 m); Figuras 26–28: para la capa F ionosférica en condiciones de luz diurna (ne = 1,4 ×1012 m−3) y Figuras 29–32: capa F ionosférica para condiciones nocturnas (ne = 4 ×1011 m−3).

Se puede observar que para las condiciones heliosféricas, el rango de MHz de las frecuencias de la señal experimenta un aumento exponencial en el número de lóbulos del patrón, el cual aumenta significativamente con el alargamiento de la antena; para otras frecuencias (más bajas), la forma del patrón permanece casi constante. Para las condiciones más densas en electrones (ionosférico F2 durante el día), las frecuencias más bajas comienzan a exhibir un fuerte aumento exponencial del número de lóbulos del patrón, aparte del caso de Alfvén, que permanece casi constante. Se puede observar un mecanismo similar , pero con valores más bajos en los valores alcanzados, para las condiciones de concentración de electrones nocturnas del F2 ionosférico; se puede vincular a que la longitud de la antena sea cac

Machine Translated by Google

proporcional a la longitud de onda de la señal para las frecuencias más bajas y rápidamente sobredimensionado para la longitud de onda de la señal para las frecuencias más altas: el primer mecanismo puede notarse como "amplificado" por el aumento de la densidad electrónica, y el último mecanismo aparece como presente globalmente.

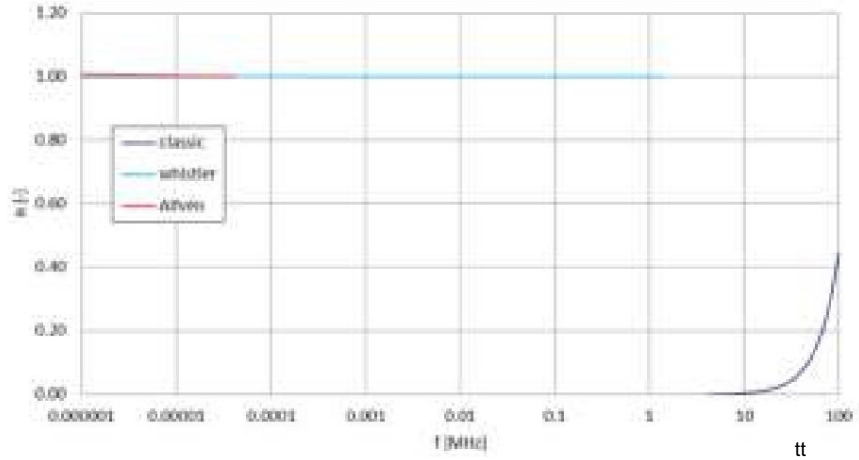


Figura 24. Número calculado de lóbulos del patrón de radiación/recepción de la antena para una longitud de antena h = 1 m y un entorno heliosférico (ne = 108 m−3).

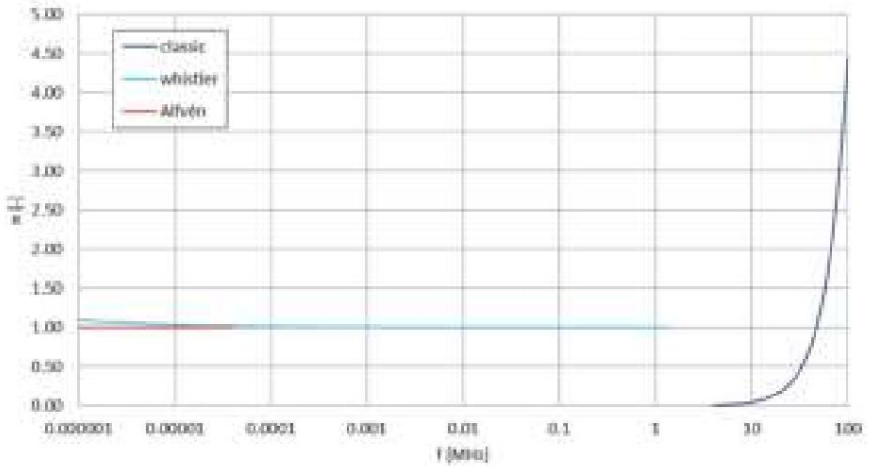


Figura 25. Número calculado de lóbulos del patrón de radiación/recepción de la antena para una longitud de antena h = 10 m y un entorno heliosférico (ne = 108 m−3).

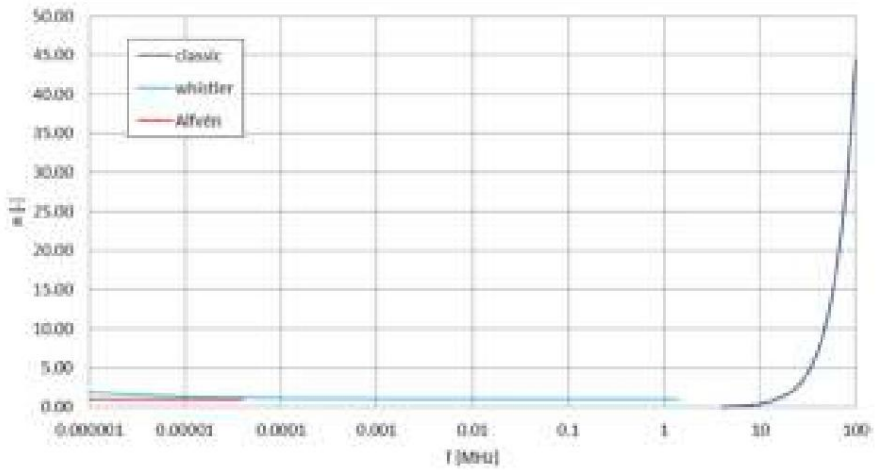


Figura 26. Número calculado de lóbulos del patrón de radiación/recepción de la antena para una longitud de antena h = 100 m y un entorno heliosférico (ne = 108 m−3).

Machine Translated by Google

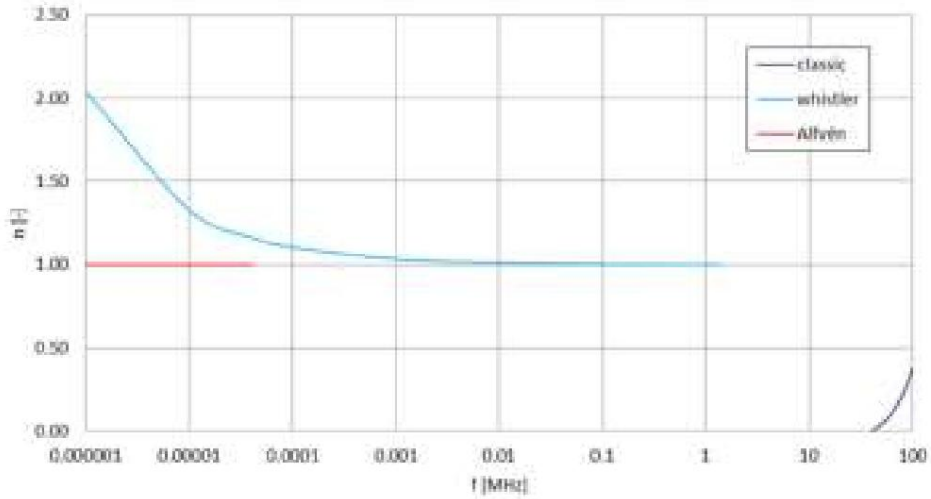


Figura 27. Número calculado de lóbulos del patrón de radiación/recepción de la antena para una longitud de antena h = 1 m y un entorno de luz diurna de capa F2 ionosférica (ne = 1,4 ×1012 m−3).

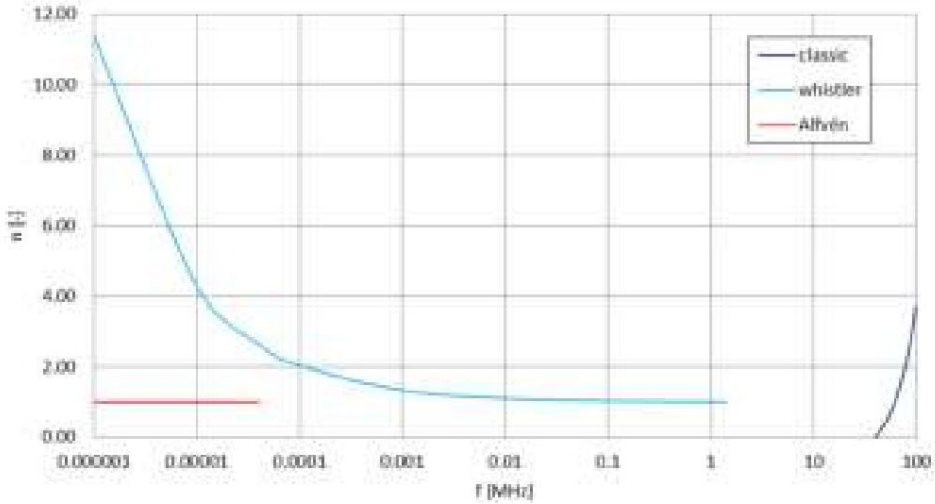


Figura 28. Número calculado de lóbulos del patrón de radiación/recepción de la antena para una longitud de antena h = 10 m y un entorno de luz diurna de capa F2 ionosférica (ne = 1,4 ×1012 m−3).

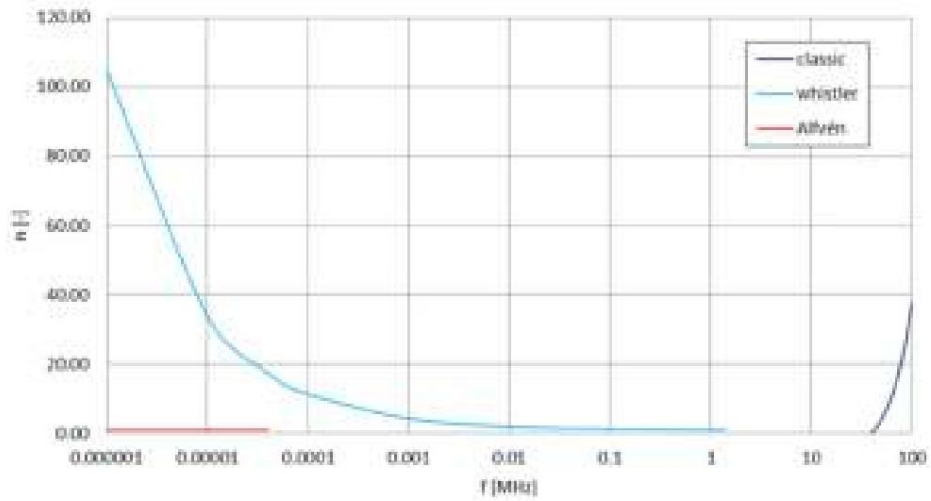


Figura 29. Número calculado de lóbulos del patrón de radiación/recepción de la antena para una longitud de antena h = 100 m y un entorno de luz diurna de capa ionosférica F2 (ne = 1,4 ×1012 m−3).

Machine Translated by Google

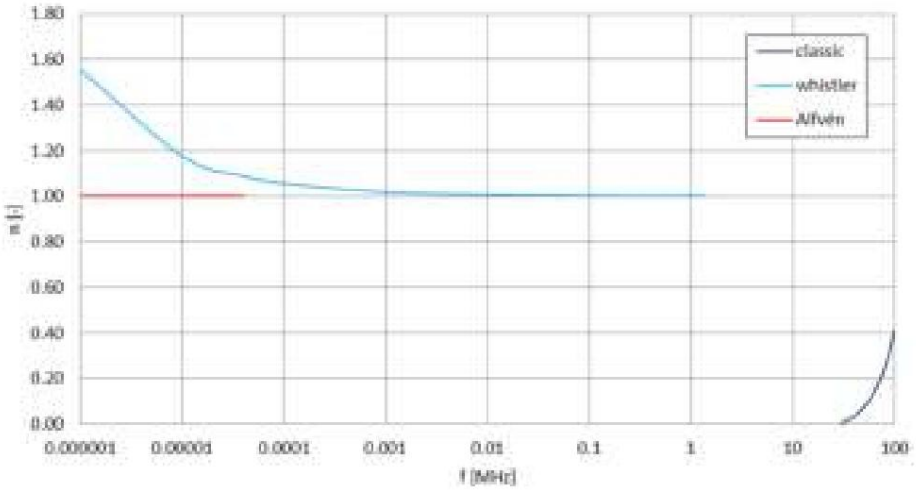


Figura 30. Número calculado de lóbulos del patrón de radiación/recepción de la antena para una longitud de antena h = 1 m y un entorno nocturno de capa ionosférica F2 (ne = 4 ×1011 m−3).

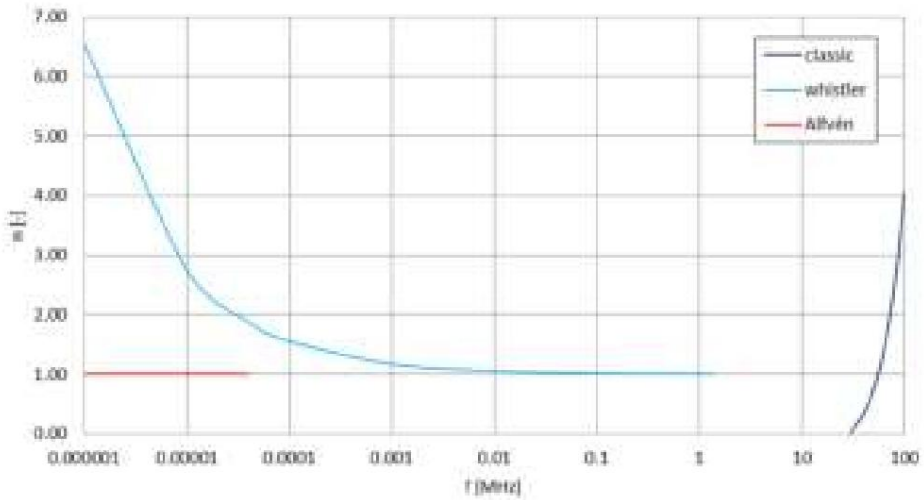


Figura 31. Número calculado de lóbulos del patrón de radiación/recepción de la antena para una longitud de antena h = 10 m y un entorno nocturno de capa ionosférica F2 (ne = 4 ×1011 m−3).

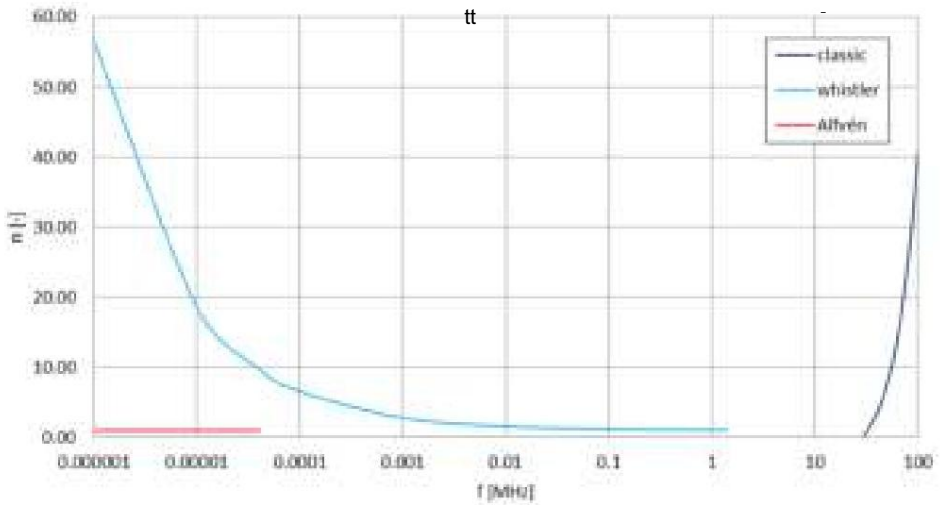


Figura 32. Número calculado de lóbulos del patrón de radiación/recepción de la antena para una longitud de antena h = 100 m y un entorno nocturno de capa ionosférica F2 (ne = 4 ×1011 m−3).

Machine Translated by Google

4. Evolución de la directividad del patrón de radiación de la antena.

El parámetro de directividad de la antena D [-] puede explicarse como la capacidad de la antena para formar un haz concentrado de energía radiada en un cierto ancho angular, definido como la intensidad de la radiación en una dirección/ángulo dado dividido por el promedio intensidad de radiación en todo el patrón de radiación (2π). Junto con la eficiencia de la antena ηA [-] (que depende de la resistencia a la radiación de la antena y su resistencia a las pérdidas), da la ganancia de la antena G [-]: G = DηA [40]; Por lo tanto, la ganancia de la antena es directamente proporcional a la directividad, y la eficiencia de la antena depende en gran medida de las pérdidas de radiación en la aplicación real de la nave espacial (la resistencia a la radiación de un dipolo en función de la relación longitud-longitud de onda sigue siendo bien conocida [40]). .

La fórmula de directividad se puede expresar como [36] a continuación:

$$Di = 2 \quad \frac{1}{3} - \frac{\text{porque}(2hki)}{(2hki)^2} \operatorname{sin}\frac{(2hki) +}{(2hki)^3}^{-1} \tag{9}$$

con ki definido para cada caso (ionosférico, whistler o Alfvén) mediante las Fórmulas (5), (6) y (7). Las Figuras 33 a 35 presentan la directividad calculada para el caso clásico (7) para diferentes concentraciones de electrones y longitudes de antena consideradas anteriormente h = 1, 10 y 100 m; de manera similar, las Figuras 36 a 38 emplean el número de onda de Whisper (5) y las Figuras 39 a 41: el número de onda de Alfvén (6).

Para los casos ionosféricos clásicos, cuanto más larga es la antena, más constante es la directividad, alcanzando un valor de 6 para frecuencias altas en MHz; para el rango de frecuencia de kHz e inferior, la directividad alcanza valores inferiores a 1, lo que indica la falta de lóbulos separados bien formados en el patrón de radiación (como en las figuras del párrafo anterior). Para el modo de propagación de silbidos, el comportamiento general de los cambios de directividad aumenta con los valores de frecuencia a medida que aumenta la longitud de la antena; Ambas condiciones ionosféricas muestran dos máximos en aproximadamente 6,5, mientras que el caso heliosférico comienza a dar valores mayores en la mayor longitud de antena considerada de 100 m. Para el modo de propagación y rango de frecuencia de Alfvén, en la Figura 40, las condiciones heliosféricas produjeron errores numéricos en la Fórmula (9) y no se incluyeron en el gráfico final; cuanto más pequeña es la antena, más susceptible parece a concentraciones de electrones más altas; la antena más grande considerada, de 100 m, muestra una alta variabilidad hasta la concentración de electrones más baja (heliosférica). Para todos los casos de Alfvén, el valor máximo de directividad alcanzó 4,1.

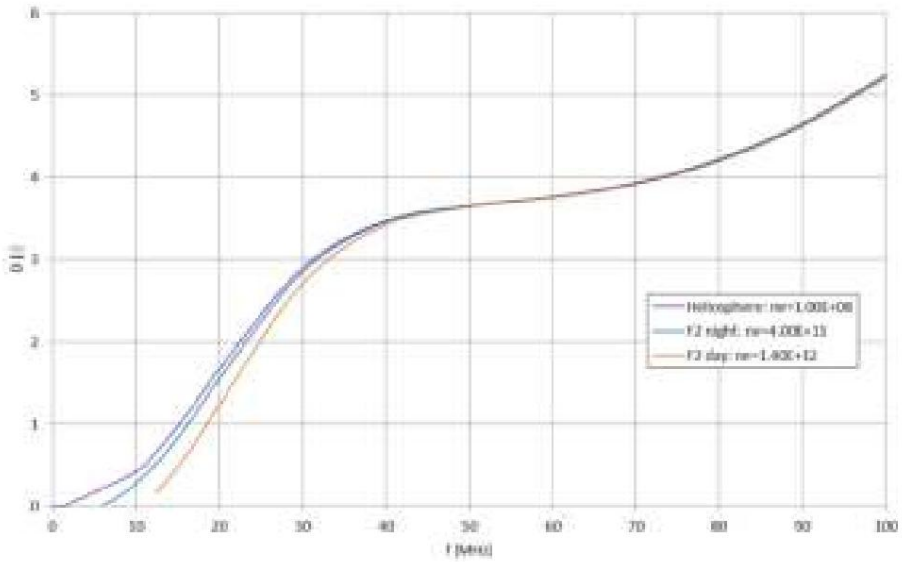


Figura 33. Directividad de antena calculada para una longitud de antena h = 1 my número de onda kJ (7).

Machine Translated by Google

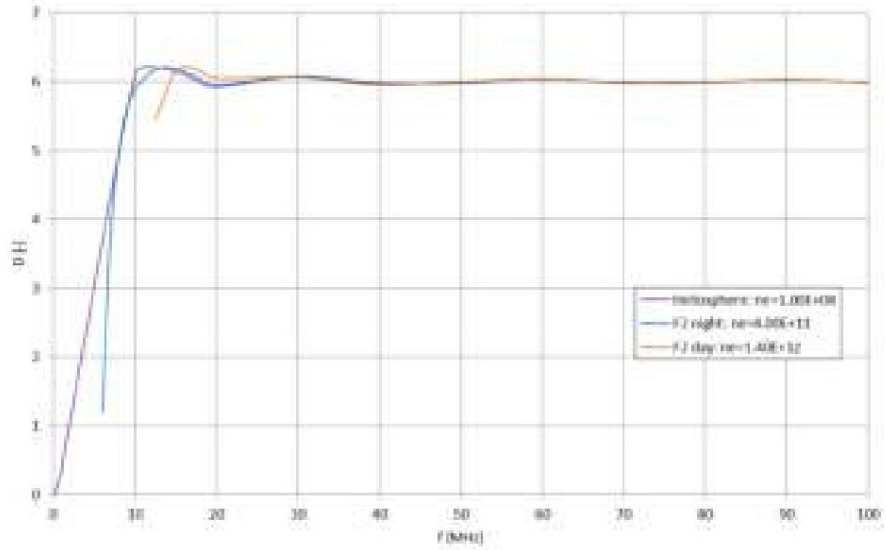


Figura 34. Directividad de antena calculada para una longitud de antena h = 10 my número de onda kJ (7).

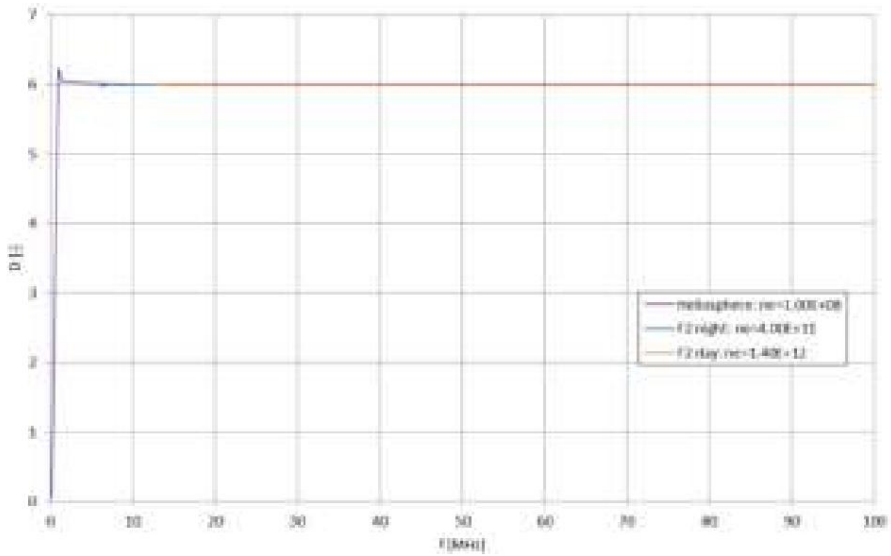


Figura 35. Directividad de antena calculada para una longitud de antena h = 100 my número de onda kJ (7).

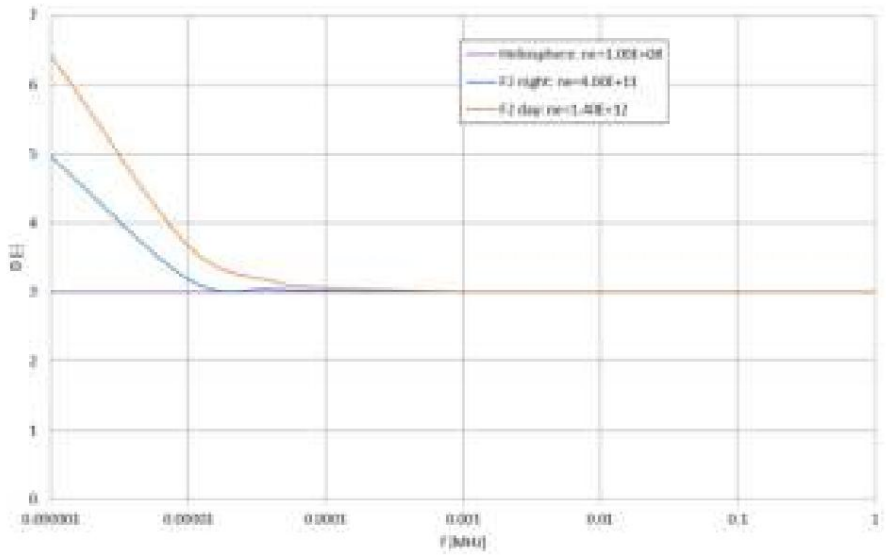


Figura 36. Directividad de antena calculada para una longitud de antena h = 1 my número de onda kW (5).

Machine Translated by Google

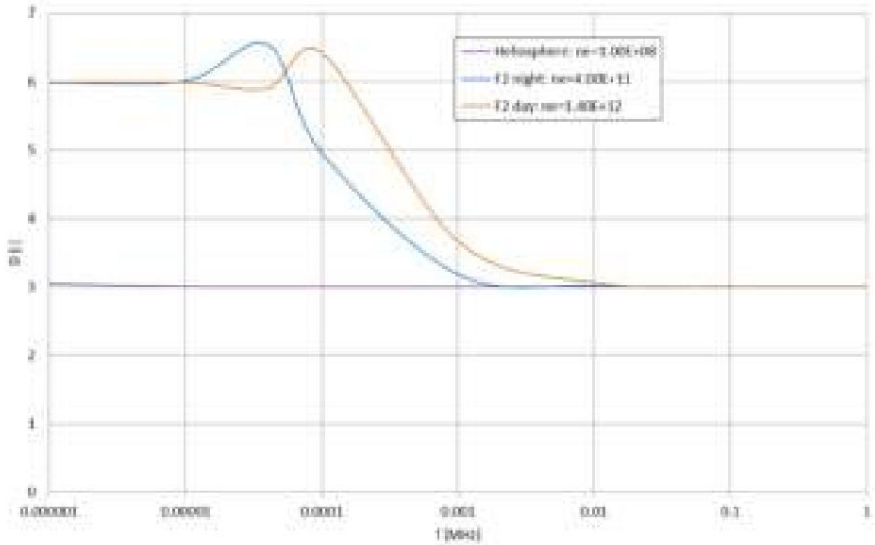


Figura 37. Directividad de antena calculada para una longitud de antena h = 10 my número de onda kW (5).

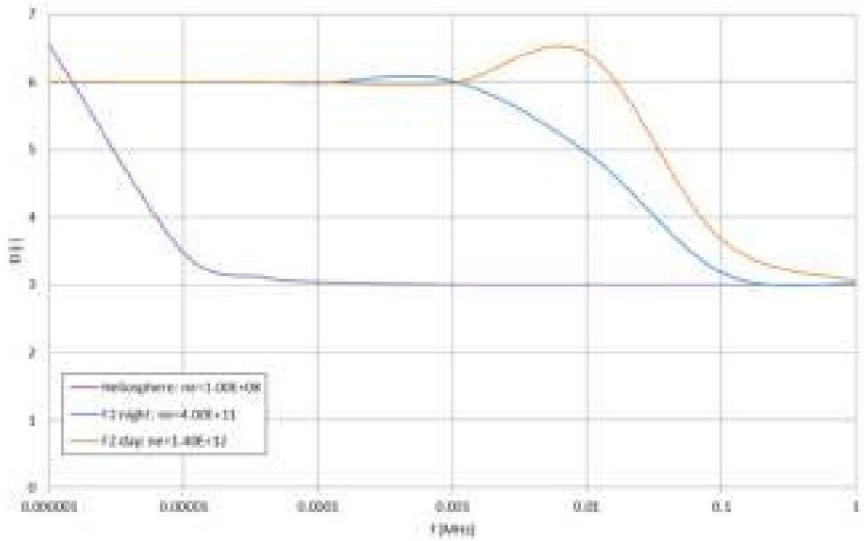


Figura 38. Directividad de antena calculada para una longitud de antena h = 100 my número de onda kW (5).

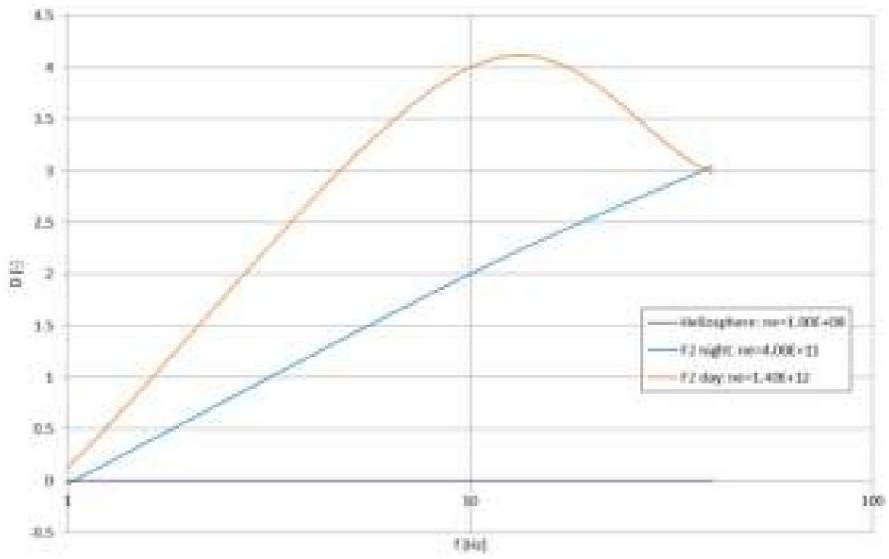


Figura 39. Directividad de antena calculada para una longitud de antena h = 1 my número de onda kA (6).

Machine Translated by Google

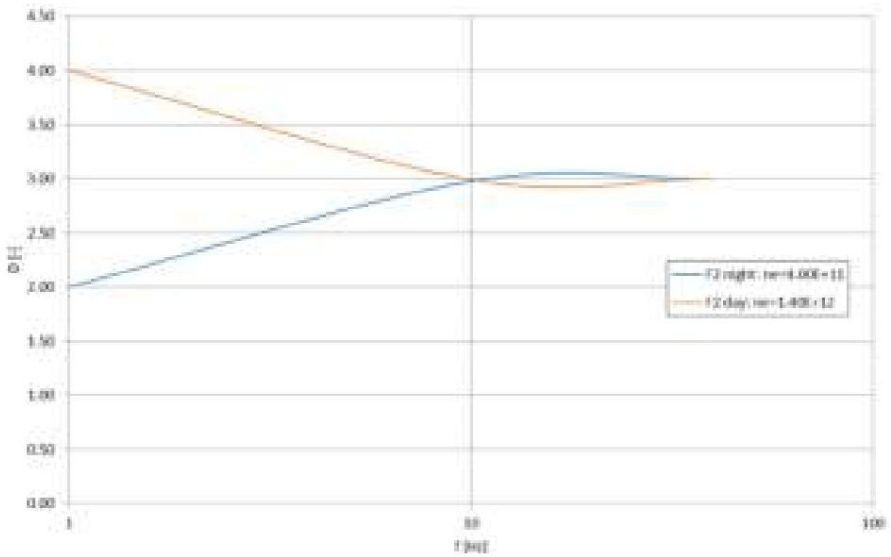


Figura 40. Directividad de antena calculada para una longitud de antena h = 10 my número de onda kA (6).

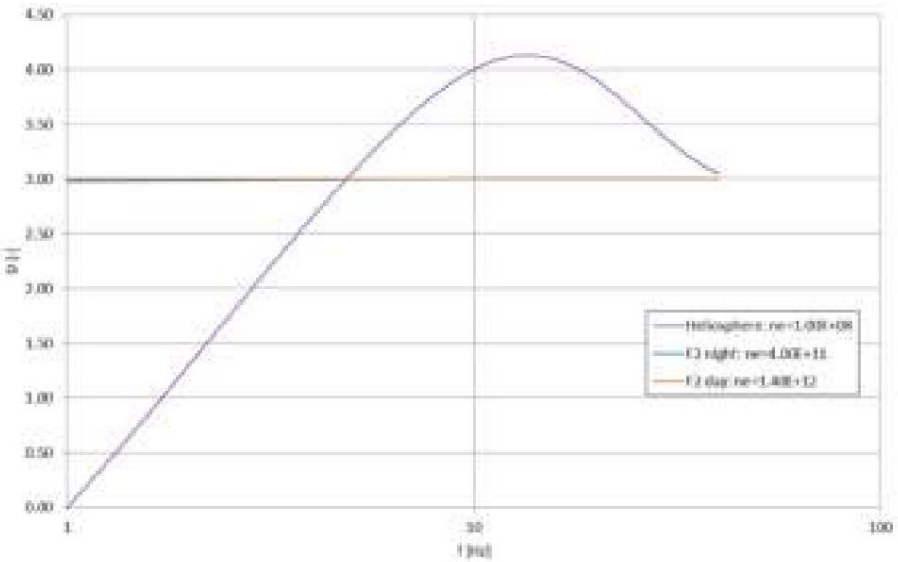


Figura 41. Directividad de antena calculada para una longitud de antena h = 100 my número de onda kA (6).

5. Coeficiente de transformación del patrón de radiación desde condiciones de aire/vacío a condiciones plasmáticas

La verificación experimental de la forma del patrón de radiación/recepción de la antena, que siempre incorpora la configuración mecánica real de la antena y el soporte de la antena (por ejemplo, en una nave espacial), es posible principalmente en condiciones atmosféricas terrestres o en condiciones cercanas. condiciones de vacío (si es necesario recrear la transferencia de calor adicional, típica del entorno espacial, para otros componentes). Se han desarrollado soluciones analíticas para el patrón de radiación/recepción de una antena dada sumergida en el plasma de parámetros dados ; por ejemplo, el patrón de radiación de Bannister et al. para el i-ésimo número de onda k [35]:

$$fP(\theta) = \frac{\operatorname{sen}\theta}{kih(1-\cos\theta)} \operatorname{sen}\left(\quad\right) = \operatorname{sen}\quad (1-)\,1-\cos\theta\,2 \tag{10}$$

donde θ[rad] es el ángulo entre el plano de simetría de la antena (considerado como un dipolo simétrico de la longitud total h [m]) y el eje principal de la antena. Este patrón de radiación muestra la propiedad común (para grandes antenas plasmáticas) de irradiar la energía en una dirección cercana al eje principal de la antena, lo que se manifiesta con más fuerza a medida que aumenta la longitud de la antena [24,34,35] y permanece totalmente inconsistente con la forma del patrón/comportamiento de la antena en condiciones no plasmáticas [23

Machine Translated by Google

La propiedad sigue siendo de interés no sólo para los fines de prueba de antenas y las aplicaciones reales de antenas de transmisión en plasma, sino también para las antenas receptoras sumergidas en plasmas, que, a medida que su patrón de recepción evoluciona en relación con el plasma que las rodea, pueden cambiar en un manera que excluirá algunas de las direcciones a la antena de recibir cualquier señal; esto seguirá siendo útil para la descripción precisa de, por ejemplo, las direcciones entrantes y las intensidades reales de las señales de la radiación kilométrica auroral.

Un método basado en una simple transformación de las definiciones analíticas de la forma del patrón de radiación desde las condiciones de aire/vacío a las condiciones plasmáticas (con el supuesto de que este enfoque sigue siendo válido para las formas del patrón definidas experimentalmente) para un valor de ángulo θ dado. se puede definir de la siguiente manera:

$$T\theta=\text{const.}(fA\ \text{real}(\theta) \rightarrow fP\ \text{real}(\theta)) : fP\ \text{real} = fA\ \text{real}(\theta)\ \frac{fP(\theta)}{fA(\theta)} \quad (11)$$

donde fi (θ) son las funciones de los diagramas de radiación de la antena y los subíndices P, A y real describen las condiciones de aire/vacío, plasmáticas y reales, posteriormente. La relación de las funciones del patrón de radiación plasma/aire/vacío requiere una división adicional de cada función fi (θ) por el valor máximo alcanzado por ella, para que los casos posteriores sean comparables en valores (esto, sin embargo, borraría la información precisa sobre la directividad). Naturalmente, para esta transformación, el valor de fA(θ) no debe llegar a cero (puede alcanzar un valor real de ε →0) y sigue siendo válido para la siguiente condición (de lo contrario, es una tautología):

$$\int_{\varepsilon \to 0}^{\pi-\varepsilon/2} fA(\theta)d\theta = \int_{\varepsilon \to 0}^{\pi-\varepsilon/2} fP(\theta)d\theta \quad (12)$$

Para las condiciones reales aplicadas en el espacio y las diferentes señales de radio medidas mencionadas en el apartado 1, no siempre se conoce la dirección precisa de la señal entrante, y la evolución del diagrama de radiación/recepción de la antena para diferentes condiciones plasmáticas introducirá incluso más variables a su definición. Si se obtiene un espectro de frecuencia bidimensional de dicha antena y se puede acceder a los parámetros básicos del plasma (como se describe en el párrafo 2), la relación de la Fórmula (11) se puede ampliar para formar un coeficiente general w dependiente de la frecuencia y el ángulo . (θ,f), que incluye el patrón de radiación plasmática (10) y el patrón de radiación de aire/vacío para antena lineal corta [36]; las diferencias entre los patrones de radiación de la antena de aire/vacío y de plasma se definen en el espacio alrededor del cable de la antena y en todo el rango posible de θ (con la suposición que facilita la integración de que la antena es un dipolo simétrico de longitud total h):

$$w(\theta, f) = 4\pi \int_{\varepsilon \to 0}^{\pi-\varepsilon/2} \frac{fP(\theta)}{máx[f_{PAG}(\theta)]} \frac{fA(\theta)}{máx[fA(\theta)]-1\, d\theta} = 4\pi \int_{\varepsilon \to 0}^{\pi-\varepsilon/2} \frac{\text{pecado}\ \frac{1}{2}kih(1-\text{porque}\ \theta)}{\text{sen}\ \theta(1-\cos\theta)\cos 2} \frac{máx[fA(\theta)]\, d\theta}{máx[f_{PAG}(\theta)]} \quad (13)$$

Una solución aproximada se puede calcular de la siguiente manera:

$$w(\theta, f) \approx \sum_{i=1}^{n} \frac{máx[fA(\theta)]\ 1\ \theta i}{máx[f_{PAG}(\theta)]} \frac{\text{pecado}\ \frac{1}{2}kih(1-\text{porque}\ \theta i)}{\text{sen}\ \theta i(1-\cos\theta i)\cos 2} + \frac{\text{pecado}\ \frac{1}{2}kih(1-\text{porque}\ \theta i-1)}{\text{sen}\ \theta i-1(1-\cos\theta i-1)\cos 2} \quad (14)$$

Como los números de onda ki pueden incorporar el compuesto del campo magnético B0 , es necesario aproximar este compuesto de manera que refleje la estructura y dirección del campo magnético alrededor de la antena. Para un caso en el que la inducción del campo magnético permanece constante a lo largo del eje Z de la antena, el parámetro B0 se puede formar de la siguiente mane

$$B0 = \int_0^{2\pi} B0\ máx.\ |\text{pecado}\ \varphi|\, d\varphi = 4B0\ máx. \quad (15)$$

Machine Translated by Google

donde φ [rad] es el ángulo que forma el plano paralelo al plano de simetría del dipolo. Si B0 no permanece constante a lo largo del cable de la antena y tiene una función de distribución conocida con el valor máximo de B0 máx. y el argumento de z, la fórmula se presenta de la siguiente manera:

$$B0(z) = \int_0^{\frac{h}{2}} \int_0^{2\pi} B0\ \text{máx.}(z)|\text{sen}\ \varphi\ |\, d\varphi\ dz = 4 \int_0^{\frac{h}{2}} B0\ \text{máx.}(z)\, dz \quad \text{(dieciséis)}$$

Las Figuras 42 a 45 presentan el coeficiente w(f) (después de la integración sobre θ) calculado para un amplio rango de frecuencia para diferentes concentraciones de electrones (como en los párrafos anteriores) y longitudes de antena posteriores: 1, 10 y 100 m. Como las Fórmulas (13) y (14) incorporan la Fórmula (10), que es esencialmente válida para el rango de frecuencia del modo de propagación de silbidos, la frecuencia máxima en estas figuras no excede el valor de 1,4 MHz; el cálculo supera este límite. sería posible después de aclarar la precisión de la Fórmula (10) por encima de esta frecuencia.

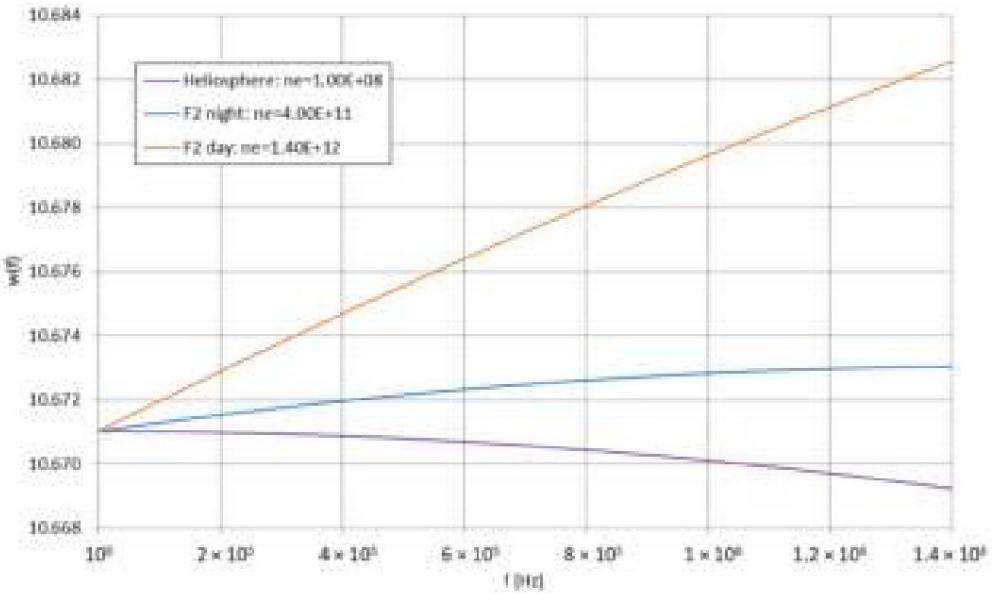


Figura 42. El parámetro de transformación w(f) calculado para una longitud de antena h = 1 m.

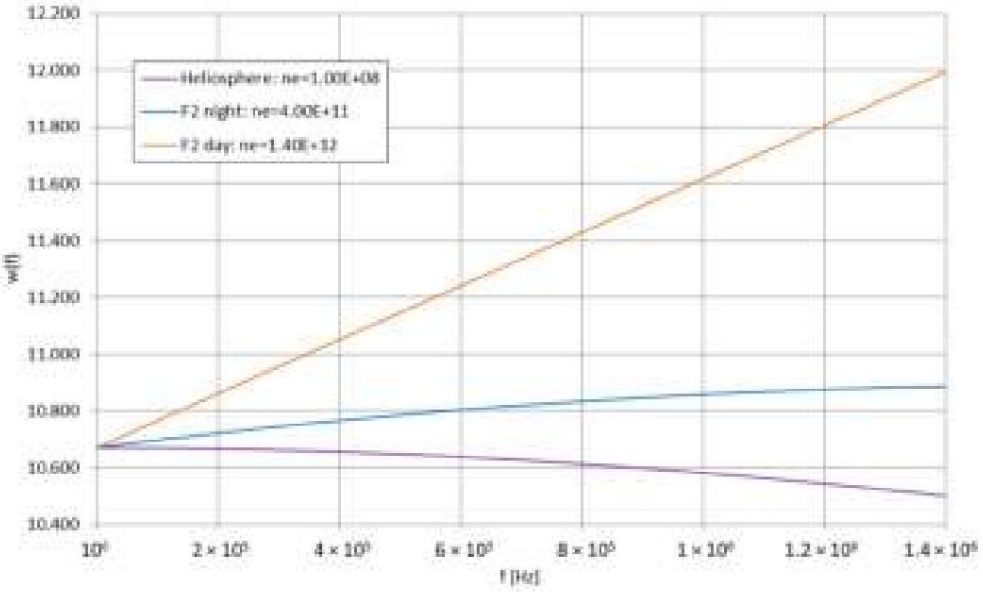


Figura 43. El parámetro de transformación w(f) calculado para una longitud de antena h = 10 m.

Machine Translated by Google

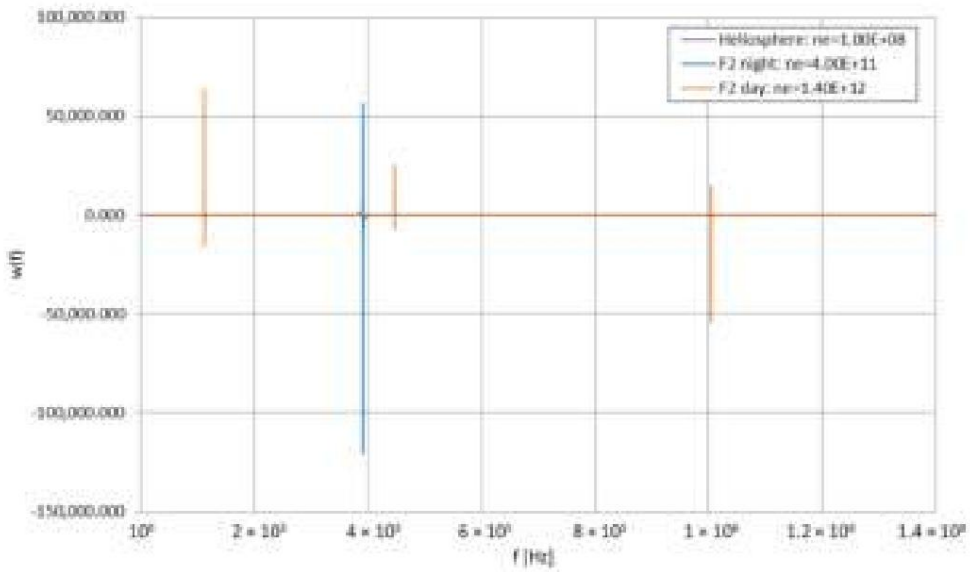


Figura 44. Parámetro de transformación w(f) calculado para una longitud de antena h = 100 m.

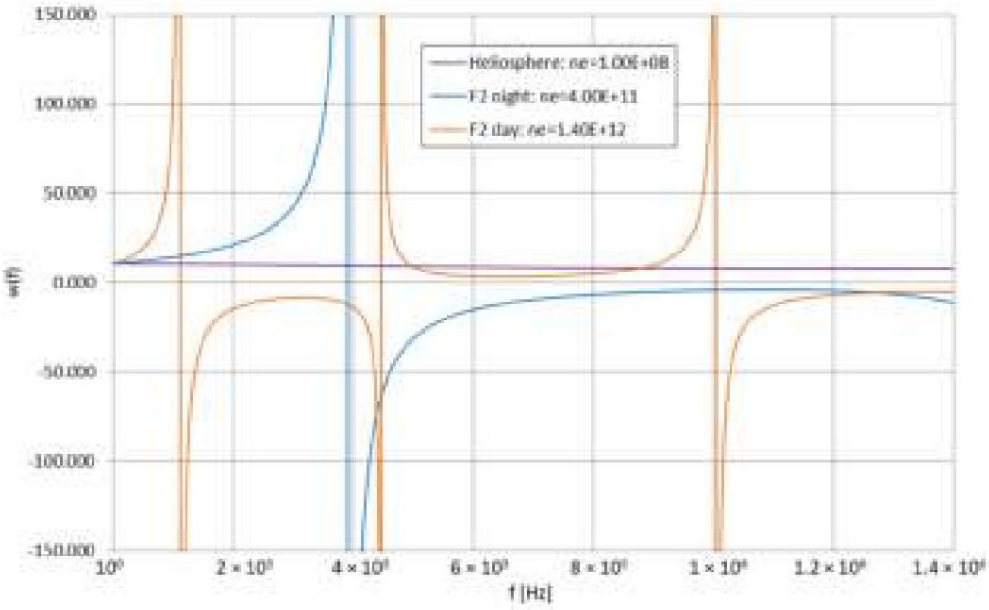


Figura 45. Parámetro de transformación w(f) calculado para una longitud de antena h = 100 m, ampliado.

Para longitudes de antena más pequeñas, los coeficientes calculados demuestran un comportamiento casi constante, aumentando ligeramente para las frecuencias más altas en condiciones de electrones más densos (capa F2 a la luz del día) y disminuyendo ligeramente en condiciones de electrones menos densos (heliosféricos). Para la mayor longitud de antena considerada de 100 m, el coeficiente muestra múltiples cambios significativos en los valores para las condiciones más densas en electrones, lo que demuestra las diferencias entre los diagramas de radiación de la antena para los casos de aire/vacío y plasmático. Como el coeficiente está destinado a llevar el valor del caso aire/vacío al caso plasmático, reacciona sobre la apariencia de los lóbulos en el patrón, incluyendo cualquier cambio de signo de la función, que, desde un punto de vista matemático, puede parecer .

6. Discusión

Las evoluciones presentadas de los parámetros básicos de la antena que describen sus capacidades para irradiar o recibir energía electromagnética muestran claramente la dependencia de las condiciones eléctricas o del espacio circundante; tal como se presentan, estas condiciones no solo influyen en la impedancia de la antena (como se muestra en varios estudios anteriores). investigaciones de las últimas décadas),

Machine Translated by Google

sino su funcionamiento en el espacio como radiadores de energía o receptores de energía. Es importante desde dos aspectos principales: el aspecto del diseño de la nave espacial y la antena y el aspecto de la interpretación y el uso de datos de la nave espacial existente y su instrumentación.

El aspecto del diseño se concentra principalmente en la ubicación de las antenas en las proximidades de la nave espacial de una manera que impida las mediciones del plasma influenciado directamente por la nave espacial (que aparece alrededor de la estructura de la nave espacial, a menos que se trate de un requisito específico para la misión). Esta influencia directa puede vincularse a la presencia de estructuras conductoras (barras/vigas, paneles solares, estructuras de naves espaciales, etc.) dentro de las zonas de Fresnel o Fraunhofer alrededor de la antena.

Los radios de las zonas, calculados utilizando diferentes fórmulas en el párrafo 2, muestran claramente la evolución con los parámetros cambiantes del plasma: siguen siendo muy sensibles a diferentes concentraciones de electrones ne . Para las antenas más pequeñas (~100 m de longitud), los radios de todas las zonas están relativamente condensados; Por lo tanto, no es difícil incluir en los requisitos de diseño mecánico de instrumentación el requisito de colocar estructuras más grandes más allá del radio de la zona de Fraunhofer (hasta una frecuencia máxima de interés).
Con la longitud cada vez mayor de la antena (~101–102 m), la precisión (basada en fórmulas)
La zona de Fraunhofer se vuelve demasiado grande para incluirla fácilmente como requisito dimensional; por lo tanto, se pueden considerar los radios de la zona de Fresnel, o la fórmula aproximada para el radio de la zona de Fraunhofer, derivada de las características de los campos EM alrededor de la antena .

En el caso de que la nave espacial ya esté diseñada, construida y en funcionamiento, estos radios pueden usarse como indicadores de si sería beneficioso verificar el patrón de radiación/recepción real de la antena de manera que incluya los elementos mecánicos de la nave espacial como Reflectores de antena pasivos. Esto es especialmente importante para la recepción de señales de radio que se propagan en los modos Whisper y Alfvén, que tienen radios de zonas de Fraunhofer y Fresnel significativamente mayores, del tamaño de una constelación de satélites completa.

El aumento de la concentración de electrones ne también influye en el festoneado del patrón de radiación/recepción de la antena; Para las concentraciones más altas consideradas, proporcionales a aquellas en la capa ionosférica F2 en condiciones de luz diurna (fotoionización, etc.), la apariencia de lóbulos de patrón separados (máximos y mínimos) está presente tanto para el modo de propagación de silbidos en frecuencias más bajas (~ kHz e inferiores) y para las frecuencias altas de MHz. El aumento del festoneado también está directamente relacionado con la proporción de la longitud de onda de la señal entrante con respecto a la longitud de la antena, que se manifiesta simultáneamente con la influencia del creciente ne .

Lóbulos suficientemente prominentes elevarán el parámetro de directividad, que puede usarse, junto con el parámetro de eficiencia de la antena, para definir la ganancia de la antena, o simplemente para describir la efectividad de la radiación de recepción de la antena a una frecuencia dada en un plasma de parámetros dados. . Los comportamientos de la directividad son significativamente diferentes para cada caso de modo de propagación y cada valor ne considerado ; esto requiere un enfoque cuidadoso para un conjunto preciso de requisitos de medición, por ejemplo, rango de frecuencia y parámetros de plasma esperados. En general, se puede observar que las antenas más pequeñas (longitud proporcional a 100 m) son más propensas a cambios de directividad, especialmente para rangos de frecuencia altos de MHz, de manera similar al comportamiento festoneado observado en estas antenas. Para valores altos de ne , el modo de propagación de silbidos exhibe dos máximos de directividad global, que aparecen en todos los casos de longitud de antena considerados, que no existen en el entorno de bajo contenido de electrones.

La Figura 45 muestra claramente los cambios que el entorno plasmático produce en los patrones de radiación/recepción de la antena para grandes aperturas de antena (~102 m). El coeficiente presentado destinado a transformar el patrón de aire/vacío en el patrón plasmático refleja el patrón plasmático evolucionado , rico en máximos. y mínimos (los diagramas de patrones de radiación plasmática reales, que muestran la radiación aparente a lo largo del eje principal de la antena, se pueden encontrar, por ejemplo, en [35]). Esto demuestra que las mediciones en tierra no proporcionan una comprensión completa del funcionamiento de la antena en un entorno espacial con una importante concentración

Machine Translated by Google

El método propuesto de transformación de patrón, sin embargo, permite una descripción básica del comportamiento aproximado de la antena en plasma, lo que será útil para el análisis de los datos electromagnéticos espectrales de los satélites existentes: la definición, por ejemplo, de la dirección de propagación de la señal recibida. o su fuerza real (teniendo en cuenta la variable directividad y festoneado de la antena).

7. Conclusiones

En este artículo, los parámetros básicos de la antena relacionados con su capacidad para irradiar o recibir energía electromagnética se presentan como variables dependiendo de las condiciones simplificadas del plasma en el que está sumergida la antena. Se consideran tres modos de propagación (ionosférico clásico, Whistler y Alfvén), junto con tres concentraciones de electrones ejemplares (heliosférico generalizado y capa ionosférica F2: diurna y nocturna) y una inducción de campo magnético constante. Los parámetros de antena considerados son las zonas de radiación (inductiva, Fresnel, Fraunhofer), festoneado y directividad.

Está demostrado que estos parámetros evolucionan intensamente con las condiciones plasmáticas cambiantes . Las zonas de radiación permanecen condensadas en los tamaños más pequeños de las antenas y se expanden considerablemente en las longitudes de antena más grandes, lo que puede considerarse una desventaja técnica a pesar del aumento de la apertura de la antena. Además, para antenas más grandes, las zonas de Fresnel se convierten en las zonas físicamente aplicables más grandes. El festoneado (número de lóbulos en el patrón de radiación) aumenta tanto por el aumento de la densidad electrónica como por la relación longitud-longitud de onda de la antena.

Este artículo también propone un método de transformación del patrón de radiación/recepción de la antena medido en tierra al que se esperaría en el entorno de plasma espacial. Se ha demostrado que este método funciona eficazmente para longitudes de antena más grandes (>10 m), proporcionando una transformación útil del patrón de radiación de la antena desde el entorno de aire/vacío (entorno de prueba) a las condiciones plasmáticas esperadas.

Los datos presentados, en una forma conveniente de gráficos para diferentes parámetros y variables , o en forma de fórmulas fáciles de adaptar a casos de plasma individuales, complementan efectivamente el trabajo existente sobre las impedancias, corrientes y vainas de las antenas plasmáticas y pueden usarse para la evaluación real del rendimiento de las antenas de los satélites meteorológicos espaciales existentes. Esto permitirá una triangulación mejorada de las señales entrantes registradas, así como requisitos/limitaciones adicionales para el diseño de instrumentación del nuevo satélite, lo que será útil, por ejemplo, para alejar el equipo de medición de la influencia directa del plasma que aparece alrededor. la propia nave espacial.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos están disponibles previa solicitud.

Conflictos de intereses: El autor declara no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Verde, JL; Inan, Efectos de los rayos estadounidenses en los plasmas espaciales y sus aplicaciones. En Física Del Plasma Aplicada; Señalización de investigación; Agarra, C., Ed.; Sociedad Estadounidense de Física: College Park, MD, EE. UU., 2007.
2. Morozova, EA; Mogilevsky, MM; Hanasz, J.; Rosanov, AA La estructura fina del campo electromagnético AKR medida por el satélite Interball-2. Cosmo. Res. 2002, 40, 404–410. [Referencia cruzada]
3. Chuchra-Konrad, A.; Matyjasiak, B.; Schreiber, R.; Rothkaehl, H. Una correlación entre emisiones similares a AKR y alineadas en el campo corrientes. En Actas de URSI GASS 2023, Sapporo, Japón, 19 a 26 de agosto de 2023.
4. Bresler, K.; Zawila, R.; Ciarka, M.; Shmyk, A.; Mi´s, TA; Mystkowski, R.; Martyniak, J.; Wiater, K. TOTORO Observaciones de prueba de objetos transitorios y radio a bordo de BEXUS 33. En actas del 26.º Simposio PAC de la ESA sobre programas europeos de cohetes y globos e investigaciones relacionadas, Lucerna, Suiza, 19 a 23 de mayo de 2024.
5. Gurnett, fiscal del distrito; Anderson, RR; Bufanda, Florida; Fredricks, RW; Smith, EJ Resultados iniciales de la investigación de ondas de plasma ISEE-1 y -2. Ciencia espacial. Rev. 1979, 23, 103–122. [Referencia cruzada]
6. Gallet, RM; Helliwell, RA Origen de las “emisiones de muy baja frecuencia”. J. Natl. Rebaba. Stand.—D Radio Propag. 1959, 63D, 21–27. [Referencia cruzada]
7. Ferencz, C.; Lichtenberger, J.; Hamar, D.; Ferencz, OE; Steinbach, P.; Székely, B.; Loro, M.; Lefeuvre, F.; Berthelier, J.-J.; Clilverd, M. Una firma VLF inusual registrada por el satélite DEMETER. J. Geophys. Res. 2010, 115, A02210. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

8. Siingh, D.; Singh, Alaska; Patel, RP; Singh, R.; Singh, RP; Veenadhari, B.; Mukherjee, M. Tormentas, relámpagos, duendes y ondas de radio magnetosféricas en modo Whistler. Sobrevivir. Geofís. 2008, 29, 499–551. [Referencia cruzada]
9. Xiao, F.; Zhou, Q.; Su, Z.; Él, Z.; Yang, Z.; Liu, S.; Ey.; Gao, Z. Explicando la aparición de radiación kilométrica auroral en Van Cinturones de radiación Allen. Geofís. Res. Letón. 2016, 43, 971–978. [Referencia cruzada]
10. Kishore, A.; Deo, A.; Kumar, S. Teledetección atmosférica superior utilizando Tweek y Whistler Sferics generados por rayos ELF-VLF. Pacto Sur. J. Nat. Aplica. Ciencia. 2016, 34, 12-20. [Referencia cruzada]
11. Bł ¸ecki, J. Turbulencia de plasma ULF/ELF asociada con estructuras de pequeña escala en las proximidades de la magnetopausa de la Tierra y arco de choque. En Actas del Segundo Simposio Nacional PLASMA '95 “Investigación y aplicaciones de plasmas”, Varsovia, Polonia, 26 a 28 de junio de 1995; Artículos invitados; Volumen 2.
12. Mansilla, GA Efectos ionosféricos de una intensa tormenta geomagnética. Semental. Geofís. Dios. 2007, 51, 563–574. [Referencia cruzada] 13. Šuli´c, DM; Sre´ckovi ´c, VA; Mihajlov, AA Un estudio de las variaciones de la señal VLF asociadas con los cambios del nivel de ionización en el Región D como consecuencia de las condiciones solares. Adv. Res. espacial. 2016, 57, 1029–1043. [Referencia cruzada]
14. Thomson, NR; Clilverd, MA; McRae, WM Parámetros de la región D ionosférica nocturna de fase y amplitud VLF. J. Geofís. Res. Atmos. 2007, 112. [Referencia cruzada]
15. Žigman, V.; Dominique, M.; Grubor, D.; Rodger, CJ; Clilverd, MA Densidad electrónica de la ionosfera inferior y coeficientes de recombinación efectivos a partir de observaciones espaciales con múltiples instrumentos y mediciones terrestres de VLF durante las erupciones solares. J. Atmós. Sol.-Terr. Física. 2023, 247, 106074. [Referencia cruzada]
16. Jarvinen, R.; Kallio, E. Modelado híbrido global del clima espacial de Mercurio y observaciones de BepiColombo. En Actas de la 4.ª URSI AT-RASC, Gran Canaria, España, 19-24 de mayo de 2024.
17. Mikhailov, YM; Mikhailova, GA; Kapustina, OV Fondo electromagnético ELF y VLF en la ionosfera exterior sobre regiones sismoactivas (satélite “INTERCOSMOS-24”). En Actas del Simposio Internacional PLASMA '97 “Investigación y aplicaciones de plasmas”, Jarnoł tówek cerca de Opole, Polonia, 10 a 12 de junio de 1997; Artículos contribuidos; Volúmen 1.
18. Klímov, S.; Romanov, S.; Savin, S.; Nikolaeva, N.; Skálsky, A.; Petrukóvich, A.; Nozdrachev, M.; Triska, P.; Amata, E.; Ciobanu, M.; et al. Sonda de cola INTERBALL. Estudio de los límites del plasma magnetosférico. En Actas del Simposio Internacional PLASMA '97 “Investigación y aplicaciones de plasmas”, Jarnoł tówek cerca de Opole, Polonia, 10 a 12 de junio de 1997; Artículos contribuidos; Volúmen 1.
19. Bł ¸ecki, J.; Kosacki, K.; Wronowski, R.; 'Savin, S.; Simunek, J.; Smilauer, J.; Juchniewicz, J.; Klímov, S.; Triska, P. Componentes electrostáticos y electromagnéticos de la onda de plasma observados en la cúspide polar a bordo de los satélites Prognoz-8 y Magion-4. En Actas del Simposio Internacional PLASMA '97 “Investigación y aplicaciones de plasmas”, Jarnoł tówek cerca de Opole, Polonia, 10 a 12 de junio de 1997; Artículos contribuidos; Volúmen 1.
20. Bł ¸ecki, J.; Kosacki, K.; Wronowski, R.; Nemeček, Z.; Safrankova, J.; Simunek, J.; Smilauer, J.; Borodkova, N.; Romanov, SA; Savin, SP; et al. Armónicos electrón-ciclotrón observados por el subsatélite Magion-4 en la lámina de plasma. En Actas del Simposio Internacional PLASMA '97 “Investigación y aplicaciones de plasmas”, Jarnoł tówek cerca de Opole, Polonia, 10 a 12 de junio de 1997; Artículos contribuidos; Volúmen 1.
21. Rothkaehl, H.; Bł ¸ecki, J.; Kł os, Z. La firma del acoplamiento ionosférico-magnetosférico investigada con el paquete de ondas de plasma PWP a bordo del satélite CESAR. En Actas del Simposio Internacional PLASMA '97 “Investigación y aplicaciones de plasmas”, Jarnoł tówek cerca de Opole, Polonia, 10 a 12 de junio de 1997; Artículos contribuidos; Volúmen 1.
22. Wooliscroft, LJC Mediciones de ondas de plasma con la misión CLUSTER de la ESA/NASA. En Actas del Segundo Simposio Nacional PLASMA '95 “Investigación y aplicaciones de plasmas”, Varsovia, Polonia, 26 a 28 de junio de 1995; Artículos invitados; Volumen 2.
23. McCollough, JP; Miyoshi, Y.; Ginet, médico de cabecera; Johnston, WR; Su, Y.-J.; Stark, MJ; Kasahara, Y.; Kojima, H.; Matsuda, S.; Shinohara, I.; et al. Transmisión de radio espacio-espacio de muy baja frecuencia en la magnetosfera utilizando los satélites DSX y Arase. Tierra Planetas Espacio 2022, 74, 64. [CrossRef]
24. Lauben, D.; Linscott, I.; Inan, U. El instrumento receptor de banda ancha (BBR) en demostraciones y experimentos científicos (DSX) Astronave; Informe final núm. AFRL-RV-PS-TR-2022-0114; Laboratorio de Física Experimental Hanson, Universidad de Stanford: Stanford, CA, EE. UU., 15 de diciembre de 2022.
25. Neuffer, A.; Lunk, A. Diagnóstico de una fuente de pulverización catódica de magnetrón planar con sondas Langmuir. En Actas del Simposio Internacional PLASMA '97 “Investigación y aplicaciones de plasmas”, Jarnoł tówek cerca de Opole, Polonia, 10 a 12 de junio de 1997; Artículos invitados ; Volumen 2.
26. Galejs, J. Impedancia de una antena cilíndrica aislada finita en un plasma frío con un campo magnético longitudinal. Traducción IEEE. Propagación de antenas. 1966, 14, 727–736. [Referencia cruzada]
27. Galejs, J. Impedancia de una antena aislada finita en plasma frío con un campo magnético perpendicular. Traducción IEEE. Propagación de antenas . 1966, 14, 737–748. [Referencia cruzada]
28. Wunsch, DA Radiación de una franja de corriente eléctrica en medio magnetoiónico. Poder. J. Física. 1967, 45, 1675–1691. [Referencia cruzada]
29. Bhat, B. Distribución de corriente en una antena tubular infinita sumergida en un magnetoplasma de colisión frío. Radio ciencia. 1973, 8, 483–492. [Referencia cruzada]
30. Seshadri, SR Admitancia de entrada de una antena cilíndrica en medio magnetoiónico. J. Aplica. Física. 1968, 39, 2407–2412. [Referencia cruzada]
31. Canción, P.; Reinisch, BW; Paznukhov, V.; Ventas, G.; Cocido.; Tu, J.-N.; Huang, X.; Bibl, K.; Galkin, I. Interacción antena-plasma de alto voltaje en la transmisión de ondas de silbato: efectos de la vaina de plasma. J. Geophys. Res. 2007, 112, A03205. [Referencia cruzada]
32. Soloviev, OV Propagación de ondas de radio de baja frecuencia en la guía de ondas de la ionosfera Tierra perturbada por una onda de tres a gran escala irregularidad dimensional. Radiofis. Electrón cuántico. 1998, 41, 392–402. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

33. Espera, Teoría de la radiación de fuentes inmersas en medios anisotrópicos de JR. J.Res. Nacional. Rebaba. Esperar. Matemáticas. Matemáticas. Física. 1964, 68, 119-136. [Referencia cruzada]
34. Ginet, GP VLF Radiación de campo lejano desde una antena dipolo lineal inmersa en un plasma: modelo de referencia para DSX; Reporte no. 95-0002; Laboratorio Lincoln, Instituto Tecnológico de Massachusetts: Lexington, MA, EE. UU., 15 de junio de 2020.
35. Bannister, PR; Harrison, JK; Rupp, CC; Rey, RWP; Cosmo, ML; Lorenzini, CE; Dyer, CJ; Grossi, MD Transmisor y antena en órbita para comunicaciones espaciales en ELF/VLF con submarinos sumergidos. En Actas de las Actas de la Conferencia AGARD 529: Aspectos de sistemas y propagación de radio ELF/VLF/LF, Simposio de paneles de propagación de ondas electromagnéticas, Bruselas, Bélgica, 28 de septiembre a 2 de octubre de 1992.
36. Poisel, sistemas de antenas RA y aplicaciones de guerra electrónica; Casa Artech: Boston, MA, EE. UU.; Londres, Reino Unido, 2012.
37. Modelski, J.; Jaszczyszyn, E.; Chací´nski, H.; Majchrzak, P. Mediciones de parámetros de antena; OFPW, Universidad Tecnológica de Varsovia: Varsovia, Polonia, 2004.
38. Bem, Antenas DJ y Propagación de Ondas de Radio; WNT: Varsovia, Polonia, 1973.
39. Celi ´nski, Z. Plasma; PWN: Varsovia, Polonia, 1980.
40. Bogdanov, AF; Vasin, VV; Dulin, VN; Ilin, Virginia; Krivitskiy, BH; Kuznetsov, VA; Labutina, VK; Molochkov, YB; Piertsov, SV; Stiepanov, BM; et al. Compendio sobre Radioelectrónica; Kulikovskiy, AA, Ed.; WKiŁ: Varsovia, Polonia, 1971.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Un precio dinámico basado en recursos y un reenvío forzado Algoritmo de incentivos en redes socialmente conscientes

Xuemin Zhang 1,2, Yuan Li 1,2,*, Zenggang Xiong 1,2,*, Yanchao Liu 1, Shihui Wang 2 y Delin Hou 1,2

1 Escuela de Informática y Ciencias de la Información, Universidad de Ingeniería de Hubei, Xiaogan 432000, China; zhxm9701@163.com (XZ); yanchaoliu@cuc.edu.cn (IL); hdl00@stu.hubu.edu.cn (DH)

2 Escuela de Ciencias de la Computación e Ingeniería de la Información, Universidad de Hubei, Wuhan 430062, China; wsh@hubu.edu.cn

* Correspondencia: 202221116012706@stu.hubu.edu.cn (YL); jkxxzg2003@163.com (ZX)

Resumen: En las redes socialmente conscientes, los nodos suelen comportarse de manera egoísta debido a limitaciones de recursos. y correlaciones sociales, lo que resulta en un bajo rendimiento de la red. Incentivar a los nodos egoístas a participar activamente participar en el reenvío de mensajes, este documento propone una fijación de precios dinámica basada en recursos y forzada algoritmo de incentivo de reenvío (DFIA). En primer lugar, el algoritmo introduce la moneda virtual como medio de transacción y luego diseña una función de fijación de precios basada en factores como el estado de los recursos del nodo, contribución a la participación, relevancia de la ubicación y conectividad social. Garantiza que el reenvío el servicio se realiza a un precio razonable mediante reglas de negociación. En segundo lugar, un reenvío forzoso. Se implementa una estrategia para obligar a los nodos egoístas, que no están dispuestos a participar en las actividades de otros nodos. reenvío de mensajes, para reenviar una cierta cantidad de mensajes no locales. Mientras tanto, para evitar que los nodos descarten mensajes y garantizar un reenvío exitoso al destino, Se utilizan reglas específicas para asignar valores de contribución a los nodos que participan con éxito en el mensaje. reenvío. Por último, para evitar comportamientos de cotizaciones falsas, se emplea la tecnología blockchain. La información de la transacción se empaqueta en bloques y se agrega a la cadena de bloques después de la validación por consenso. por otros nodos de la red, asegurando la transparencia e inmutabilidad de los datos de las transacciones. Los resultados de la simulación indican que, en comparación con los algoritmos de incentivos existentes, este algoritmo no solo mejora la probabilidad de entrega de mensajes pero también reduce efectivamente la latencia promedio.

Palabras clave: redes socialmente conscientes; nodos egoístas; cita falsa; moneda virtual

check for updates

Cita: Zhang, X.; Li, Y.; Xiong, Z.; Liu, Y.; Wang, S.; Hou, D.A. Precios dinámicos basados en recursos y Incentivo de reenvío forzoso Algoritmo en socialmente consciente Redes. Electrónica 2024, 13, 3044. https://doi.org/10.3390/electrónica13153044

Editor académico: Domenico Rosaci

Recibido: 25 de junio de 2024
Revisado: 23 de julio de 2024
Aceptado: 30 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Con el rápido desarrollo de la tecnología de la información en red, el entorno móvil formado por dispositivos inteligentes (teléfonos inteligentes, tabletas, dispositivos para vehículos) con la ayuda de tecnologías inalámbricas basadas en el vecindario (Bluetooth, WIFI) [1] han recibido cada vez más se les ha prestado más atención y, en consecuencia, han aparecido las Redes Socialmente Conscientes (SAN) [2,3] . SAN La investigación determina protocolos razonables para proporcionar servicios para aplicaciones de capa superior. detectando y analizando la información contextual del nodo móvil [4] en la red. Esto se logra mediante análisis de redes sociales y tecnologías de aprendizaje automático, que Analizar y aprender del comportamiento y la información ambiental de los transportistas obtenida. desde dispositivos móviles inteligentes. A partir de estos datos se derivan atributos sociales como comunidad, intensidad de interacción y patrones de movilidad. Al integrar estos atributos sociales con un comportamiento del operador, protocolos de enrutamiento efectivos y estrategias de reenvío de mensajes están diseñados para proporcionar servicios de alta calidad para aplicaciones de capa superior. Por ejemplo, los estudios en [5,6] tomaron decisiones de reenvío basadas en las características sociales de los usuarios y similitudes [7].

SAN (consulte la Figura 1) aprovecha los atributos sociales de los operadores de telefonía móvil (es decir, los suscriptores) para diseñar protocolos de red eficientes. Representa un nuevo enfoque en Delay Red Tolerante (DTN) [8] y Red Oportunista (OppNet) [9]. En términos de principio operativo, SAN es similar a DTN y OppNet [10]. Por un lado, debido a la

Machine Translated by Google

Debido a la topología dinámica causada por la movilidad de los nodos dentro de la red, existe una falta de rutas de comunicación estables de extremo a extremo entre los nodos de origen y de destino. Cuando se interrumpe el enlace entre nodos, los métodos de enrutamiento convencionales no logran reenviar los datos del mensaje y a menudo se utilizan encuentros probabilísticos para realizar el reenvío en forma de múltiples saltos . Por otro lado, durante el reenvío de mensajes, los nodos intermedios suelen utilizar el método "store-carry-forward" para almacenar mensajes temporalmente [11-13], utilizando sus dispositivos de corto alcance y bajo costo para comunicarse entre sí, compartiendo así objetos de datos (como imágenes, anuncios, etc.) entre nodos [7]. Sin embargo, a diferencia de DTN y OppNet, los dispositivos móviles en SAN generalmente son transportados por objetos como humanos, vehículos y animales, que se mueven a varios lugares y participan en diferentes actividades, lo que resulta en una topología de red en constante cambio. Por lo tanto, existen ciertos atributos sociales entre los nodos de SAN. Es extremadamente crucial desarrollar soluciones eficientes para motivar a los nodos a cooperar a través de estas características de atributos sociales.

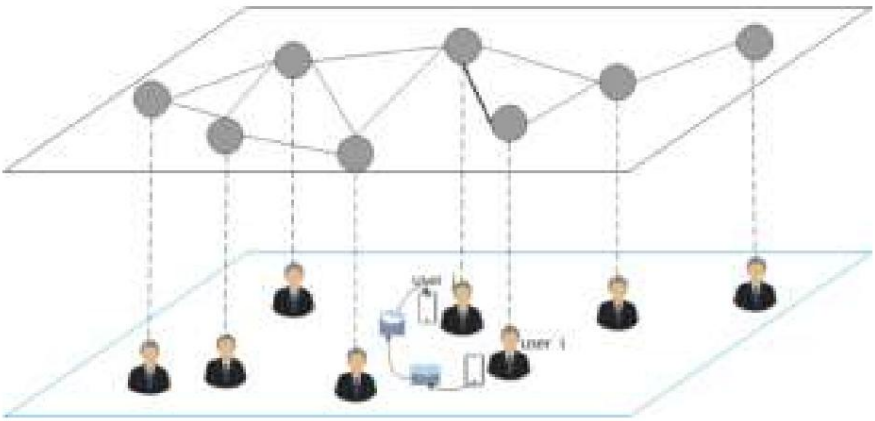


Figura 1. Redes socialmente conscientes.

Como modelo de red emergente, SAN todavía tiene numerosos desafíos para la investigación del egoísmo de los nodos, problemas de seguridad del reenvío de mensajes y otras tecnologías relacionadas . En SAN, algunos nodos pueden exhibir comportamientos egoístas debido a sus recursos limitados, lo que resulta en una capacidad de entrega deficiente o relaciones sociales deficientes con otros nodos. Estos comportamientos impactan negativamente en el rendimiento y la eficiencia general de la red. Los comportamientos egoístas de los nodos se manifiestan como egoísmo individual [14] y egoísmo soc Los nodos que exhiben egoísmo individual no reciben información ni la envían a otros nodos cuando sus recursos son escasos. Por el contrario, los nodos que muestran egoísmo social sólo brindan servicios de reenvío de datos a nodos familiares y se niegan a reenviar o recibir mensajes de datos de nodos con malas relaciones sociales. En SAN, además de los desafíos que plantea el egoísmo de los nodos, también se enfrentan riesgos de ataques maliciosos como la manipulación y el robo de mensajes reenviados y registros de transacciones [16]. Por tanto, está claro que se necesitan mecanismos de incentivos eficaces y medidas de seguridad estrictas para motivar a los nodos a participar en la cooperación y evitar que se produzcan ataques maliciosos, lo que, a su vez, garantiza un funcionamiento eficiente de la SAN y una transmisión segura de datos.

Actualmente, diseñar mecanismos de incentivos para los nodos es el método principal para abordar el problema del egoísmo de los nodos en SAN. Los mecanismos de incentivos de cooperación de nodos existentes se pueden clasificar en tres tipos: mecanismos de incentivos basados en la reputación, mecanismos de incentivos basados en moneda virtual y mecanismos de incentivos basados en la teoría de juegos.

Como se describe en el artículo [17], los autores calcularon con precisión la reputación combinando la credibilidad y la confianza de los recomendadores y evaluaron de manera justa cada recomendación. Emplearon un mecanismo de servicio diferencial justo para incentivar la participación activa.
En [18], Roy et al. valor de reputación de nodo definido y costo de reenvío de mensajes. Esta estrategia mejora la eficiencia de la entrega de mensajes al seleccionar nodos con un alto valor de reputación y bajo costo en la transmisión de datos de multidifusión como nodos del siguiente salto para el reenvío de mensajes. Bounouni et al. [19] combinó la reputación directa e indirecta para evaluar la confiabilidad del nodo.

Machine Translated by Google

ness, lo que permite que los nodos comprendan con precisión el estado de los nodos vecinos dentro de su vecindad. Luego, los nodos se clasifican en diferentes estados cooperativos según sus valores de reputación y se implementan los incentivos correspondientes para fomentar la cooperación en función de estos estados. Estos mecanismos de incentivos enfrentan desafíos a la hora de monitorear, almacenar y transmitir valores de reputación debido a posibles ataques de nodos maliciosos, que pueden causar inconsistencias en los valores de reputación. Además, los nodos cerca del umbral establecido pueden exhibir una mentalidad fortuita, manteniendo el valor de reputación suficiente para evitar participar activamente en el reenvío.

Wang y cols. [20] propusieron un modelo de juego evolutivo de incentivos, que animaba a los nodos normales y anormales a participar en la cooperación de la red a través del proceso evolutivo de supervivencia del más apto, asegurando un alto nivel de cooperación y manteniendo la estabilidad continua de la red. En la literatura se estableció un modelo de juego repetitivo (CGTFT) basado en la función de evaluación de la cooperación de nodos vecinos [21]. Para nodos racionales en la red, la función de evaluación del grado de cooperación se diseña combinando la energía residual y la tasa de reenvío exitosa de los nodos. Luego, el modelo CGTFT se utiliza para el juego, recompensando a los nodos que participan activamente en la cooperación y castigando a los nodos egoístas y que no cooperan. Además, se introduce un factor de olvido para facilitar la reconstrucción de la cooperación para los nodos que entran en el período de castigo. El estudio presentado en [22,23] propuso un modelo de precios teórico de juego basado en el modelo Rubinstein Bargain, que permite a los nodos de retransmisión fijar el precio de sus servicios de acuerdo con la energía residual y el valor de la información transmitida, mejorando así la distribución del contenido del mensaje dentro de la red. Estos mecanismos emplean la teoría de juegos para el análisis. Sin embargo, requieren altos costos de recursos y son más adecuados para redes simétricas, lo que los hace menos amigables para redes asimétricas.

Xiao y col. [24] propusieron un plan de incentivos para el envío de datos (EEIS) basado en el intercambio equivalente . EEIS combina el estado de los recursos y el estado de riqueza de los nodos para fijar el precio de los mensajes que deben reenviarse y revelar públicamente el estado de la riqueza y los recursos de ambas partes comerciales. En [25], Li et al. introdujo un algoritmo de incentivos de dos etapas (STIA) basado en precios de servicios. STIA fija el precio del servicio de reenvío considerando la calidad del servicio, los atributos del mensaje y el estado de los recursos, y los autores propusieron un mecanismo de incentivos de dos etapas. También formula un esquema de sobregiro de moneda y un mecanismo de penalización de dos etapas para evitar que los nodos incumplan después de sobregirar moneda. Durante la transacción del servicio, ambos nodos acceden a un Centro de Compensación de Crédito (CCC) para comprender la situación de cada uno, evitando cotizaciones falsas. Sin embargo, utilizar una institución de confianza externa para gestionar y evitar cotizaciones falsas aumenta el riesgo de fuga de datos si existen vulnerabilidades de seguridad o ataques maliciosos. Rao et al. [26] propusieron un algoritmo de incentivos socialmente egoísta (RSIA) con recursos limitados. Los nodos son recompensados con monedas virtuales mediante negociaciones y negociaciones como incentivo para que los nodos egoístas formen parte de la cooperación. El algoritmo introduce el coeficiente de Gini para evaluar el saldo de ingresos de los nodos y recompensa o penaliza a los nodos en función de su saldo de ingresos. RSIA configura cada nodo de la red con un módulo de seguridad confiable. Los nodos solo agregan el valor de moneda correspondiente cuando se verifica que la información de la transacción no está modificada, evitando así cotizaciones falsas. Sin embargo, este algoritmo no tiene en cuenta la relación posicional entre nodos. Al configurar el módulo de seguridad H para que los nodos realicen la validación ACK , la dependencia de los fabricantes para la confianza del nodo podría comprometer la seguridad de toda la red si la credibilidad de un fabricante se viera comprometida. Por lo tanto, garantizar la autenticidad y exactitud de las transacciones y evitar cotizaciones falsas siguen siendo cuestiones críticas que hay que abordar.

En resumen, con respecto al análisis anterior, para incentivar a los nodos egoístas a participar activamente en el reenvío de mensajes y evitar que los nodos hagan cotizaciones falsas, este documento propone un precio dinámico basado en recursos y un algoritmo de incentivo de reenvío forzado (DFIA). Este algoritmo analiza el comportamiento egoísta de los nodos y considera su situación de recursos, nivel de contribución, estado de riqueza y relevancia social para negociar los precios de reenvío de mensajes. Además, se introduce una estrategia de reenvío forzado para obligar

Machine Translated by Google

nodos egoístas para reenviar mensajes no locales, frenando así el comportamiento de nodos que se centran únicamente en sus propios intereses y no están dispuestos a participar en la cooperación de la red.
Para evitar cotizaciones falsas, la información de la transacción se registra en la cadena de bloques, aprovechando la naturaleza descentralizada y transparente de la tecnología de la cadena de bloques para garantizar que los precios no puedan ser manipulados.

El resto de este artículo está estructurado de la siguiente manera: La Sección 2 presenta el modelo de red y los supuestos del algoritmo. La Sección 3 detalla las definiciones relevantes y el proceso de implementación del algoritmo propuesto. La Sección 4 presenta el entorno de simulación. Establecemos Spray And Wait [27] como el algoritmo de enrutamiento subyacente y combinamos el DFIA propuesto, el RSIA del artículo [26], el STIA del artículo [25] y el EEIS del artículo [24] con el algoritmo de enrutamiento subyacente para una comparación experimental. . La parte final resume todo el documento y las perspectivas futuras.

2. Modelo de red y supuestos

Este artículo presenta una representación abstracta de las conexiones entre nodos en Socially Aware Networking (SAN) como un gráfico no dirigido G(D, E), donde D es el conjunto de todos los nodos y E representa el conjunto de bordes. Aquí, N denota el número de nodos en SAN.
El nodo de origen es el portador del mensaje antes de la transmisión y el nodo de retransmisión es el portador que recibe el mensaje. Tras el encuentro del nodo de origen y el nodo de retransmisión, se inicia la formación de un borde entre los nodos. E(i, j) representa el borde entre los nodos i y j, donde i = j.

Además, en la etapa inicial de la simulación de la red, este artículo crea un bloque de génesis. A medida que las transacciones para los servicios de reenvío de mensajes entre nodos se completan con éxito, los nuevos registros de transacciones se empaquetan en nuevos bloques y se vinculan secuencialmente después del bloque de génesis. Esto garantiza que todos los registros de transacciones se almacenen de forma segura y ordenada en la cadena de bloques formada a partir del bloque génesis. Los nodos de la red participan y mantienen colectivamente una cadena de bloques pública, transparente y a prueba de manipulaciones.

De acuerdo a las necesidades, este trabajo hace los siguientes supuestos y definiciones para el modelo:

1. Cada nodo de la red tiene una y sólo una identificación, y todos los nodos son racionales, lo que significa que persiguen la maximización de sus beneficios económicos u otros objetivos estratégicos mientras se adhieren a los protocolos y reglas de la red.
2. La red comprende dos tipos distintos de nodos: nodos normales y nodos egoístas.
   Los nodos normales participan en el almacenamiento, transporte y reenvío de mensajes como se esperaba; Los nodos egoístas son aquellos nodos que se niegan a aceptar y reenviar mensajes de otros nodos debido a bajos beneficios o conexiones sociales débiles.
3. Suponga que el posible comportamiento malicioso de los nodos en SAN se limita a citas falsas, en lugar de alterar mensajes o colusión.
4. Sólo un nodo de la red está autorizado a formar un nuevo bloque en un momento dado.

3. Un algoritmo de incentivos de reenvío forzado y fijación de precios dinámicos basado en recursos

En este artículo, el reenvío de mensajes entre nodos se trata como una transacción.
El comprador es el transportista del mensaje antes de reenviarlo y el vendedor es el transportista que recibe el mensaje. El servicio de reenvío proporcionado por el comprador es el producto básico y ambas partes utilizan moneda virtual como medio de transacción. Ambas partes ofrecen un precio inicial basado en una función de fijación de precios. Si la oferta es razonable, la transacción tiene éxito.
De lo contrario, los precios se ajustan de acuerdo con reglas de negociación específicas y se intenta nuevamente la transacción. Si la transacción aún falla, se procesa el siguiente mensaje. Una vez que una transacción es exitosa, la información de la transacción se escribe en un bloque y se vincula a la cadena de bloques, lo que garantiza la transparencia y la inmutabilidad de la información.

Machine Translated by Google

3.1. Definiciones relevantes

3.1.1. Urgencia de entrega de nodos

La urgencia de entrega de un nodo se refiere a la urgencia con la que un nodo puede recibir y reenviar mensajes, determinada principalmente por el espacio de búfer restante del nodo, la energía restante y el tiempo de vida (TTL) restante del mensaje. Cuando los tres son suficientes, indica que la urgencia de entrega del nodo es baja y que el nodo tiene amplios recursos y tiempo para reenviar y recibir mensajes. A medida que los mensajes se reciben y reenvían continuamente, el espacio de buffer del nodo, su energía y el TTL del mensaje inevitablemente disminuirán gradualmente, aumentando así la urgencia de entrega del nodo. En este artículo, utilizamos un índice de estado para representar la urgencia de entrega de un nodo.

El índice de estado del búfer del nodo es la relación entre el espacio de búfer restante del nodo en un momento dado y el espacio de búfer total inicial del nodo, lo que refleja la capacidad de almacenamiento en búfer del nodo. El índice de estado de energía del nodo es la relación entre la energía restante del nodo en un momento dado y la energía total inicial del nodo, lo que refleja la capacidad del nodo para reenviar mensajes. El índice TTL del mensaje es la relación entre el TTL restante del mensaje en un momento dado y el TTL inicial del mensaje, que es uno de los factores críticos que afectan la capacidad del nodo para entregar el mensaje. Por lo tanto, la urgencia de entrega $q^{h}_{x,m}$ del nodo x en el momento h se define de la siguiente manera:

$$q^{h}_{x,m} = (1-)\cdot \frac{Brx}{Binitx} + (1-)\cdot \frac{Erx}{Einitx} + \beta\cdot \frac{Trm}{Tinitm} + \gamma \quad (1)$$

Los valores de peso α, β y γ se introducen para equilibrar diferentes objetivos de optimización. Dado que el problema involucrado es NP-Hard, los valores de peso entre diferentes instancias tendrán un impacto significativo en el rendimiento del algoritmo. Por lo tanto, en nuestro estudio, ajustamos diferentes valores de peso a través de una gran cantidad de experimentos y luego encontramos la configuración de peso óptima para un caso de problema específico. Brx , Erx y Trm representan el espacio de búfer restante, el valor de energía restante y el TTL restante del mensaje m del nodo x en el momento de h, respectivamente. Binitx , Einitx y Tinitm representan el espacio de búfer total inicial, el valor de energía total inicial y el TTL inicial del mensaje m para el nodo x, respectivamente.

3.1.2. Relevancia posicional de los nodos

La relevancia posicional de los nodos se refiere a la situación relacionada con la distancia entre el nodo y el nodo de destino del mensaje. Se normaliza utilizando una función de similitud gaussiana en la función de atributo posicional del nodo, que sirve como medida de los atributos posicionales del nodo.

Los atributos de ubicación principales de un nodo incluyen la velocidad de movimiento del nodo, el ángulo con el nodo de destino y la distancia. La función de atributo de ubicación loc(x, d) de un nodo se define como

$$loc(x,d) = \frac{vx \cdot |\cos A|}{D(x,d)}, \quad (2)$$

donde vx denota la velocidad de movimiento del nodo x. Suponga que las coordenadas del nodo x y el nodo destino d son (ax,bx) y (ad ,bd), respectivamente. Entonces, $\cos A = \frac{ax \cdot ad + bx \cdot bd}{\sqrt{ax^2 + bx^2}\cdot\sqrt{ad^2 + bd^2}}$, donde $0 \le A \le \pi$, y A representa el ángulo entre el nodo x y el nodo de destino. $D(x,d) = \sqrt{(ax-ad)^2 + (bx-bd)^2}$, donde D(x, d) representa la distancia euclidiana entre el nodo x y el nodo de destino.

La función de similitud gaussiana [28] se utiliza para normalizar la ecuación (2), y la relevancia posicional de los nodos se calcula como

$$g(x) = e^{\frac{-(loc(x,d))^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

donde σ = 1 es el parámetro de escala. A medida que la función de atributo de ubicación del nodo x se hace más pequeña, el valor de g(x) se acerca a 1, lo que indica que el tiempo para que el nodo x llegue al destino

Machine Translated by Google

El nodo es más corto. En el modelo de precios, el nodo x estará dispuesto a pagar un precio más alto por el servicio de reenvío para reenviar rápidamente el mensaje.

3.1.3. Participación Contribución de Nodos

En una red, la contribución de participación de un nodo refleja su nivel de participación en el reenvío de mensajes y su contribución a la eficiencia general de la red. Este es un factor importante que influye en el precio de un nodo. Una mayor contribución de participación es indicativa de la voluntad de un nodo de proporcionar servicios a otros nodos, aumentando así la tasa de entrega de mensajes dentro de la red a través de sus actividades de reenvío. Por lo tanto, el algoritmo DFIA introduce el grado de cooperación y el grado de contribución promedio de los nodos para medir su contribución de participación durante el proceso de entrega del mensaje.

Si un nodo está dispuesto a cooperar se demuestra por su voluntad de consumir sus recursos para reenviar mensajes generados por otros nodos. La cantidad de mensajes no locales reenviados por un nodo es directamente proporcional a su participación. Por lo tanto, el grado de cooperación Xx(h) del nodo x en el momento h se define como

$$Xx(h) = \frac{FX}{mx}. \quad (4)$$

donde Fx denota el número total de mensajes no locales reenviados por el nodo x. Cada vez que el nodo x reenvía con éxito un mensaje no local, entonces Fx + 1. Mx representa el número de encuentros que el nodo x tiene con otros nodos. Cada vez que el nodo x encuentra otro nodo: el Mx + 1.

Cuando el mensaje que un nodo ayuda a reenviar se entrega exitosamente al nodo de destino, este documento asigna valores de contribución según el nodo en función de su posición en la ruta de reenvío para fomentar la participación activa en la comunicación de la red. Al primer nodo de retransmisión en la ruta de reenvío se le asigna el valor de contribución más alto, ya que determina la dirección de entrega del mensaje. Además, al último nodo de retransmisión se le asigna un valor de contribución relativamente grande porque completa la entrega del mensaje real y es quien realiza la tarea. Los otros nodos de retransmisión en la ruta de reenvío reciben valores de contribución decrecientes en función de sus posiciones en la ruta de reenvío. El valor de contribución C(i, n) asignado por el nodo i en la enésima ruta se representa de la siguiente manera:

$$C(yo, norte) = \begin{cases} (1 - r)^{yo-1} & r, \text{ si } 0 \le i < L \\ (1 - r)^{yo-1}, & \text{si yo} = L \end{cases}, \quad (5)$$

$$\text{promedioCx} = \frac{\sum_{t=1}^{\text{nom}} Ct(x, n)\, t}{}, \quad (6)$$

donde r (0 < r < 1) denota el factor de relación de asignación del valor de contribución y L representa el número total de nodos de retransmisión en la ruta. Tras la entrega exitosa de un mensaje al nodo de destino, el valor de contribución del nodo x se acumula de acuerdo con el esquema de asignación antes mencionado. A partir de entonces, el valor de contribución promedio del nodo x, avgCx , se calcula de acuerdo con la Ecuación (6).

Por lo tanto, la contribución de participación PCx del nodo x puede expresarse mediante las ecuaciones (5) y (6) como

$$PCx(h) = \rho \quad Xx(h) + (1 - \rho) \quad \text{mediaCx}, \quad (7)$$

donde ρ es el factor de ponderación por el cual Xx(h) y avgCx tienen influencia sobre PCx y ρ [0, 1].

3.1.4. Estado de riqueza de los nodos

Los nodos de la red poseen inicialmente una cantidad específica de moneda virtual, lo que refleja en cierta medida su capacidad de reenvío. Según la cantidad de moneda virtual disponible para un nodo, se puede clasificar en tres estados diferentes de moneda virtual: estado suficiente, estado general y estado insuficiente. Cuando Vx(h) > Vmax, el nodo está en suficiente

Machine Translated by Google

estado de riqueza, en cuyo momento Cx(h) > 1. Cuando Vx(h) < Vmin, el nodo está en un estado de riqueza insuficiente, en cuyo momento Cx(h) < 1. Cuando Vmin ≤ Vx(h) ≤ Vmax, el nodo se encuentra en un estado de riqueza general, en cuyo momento Cx(h) = 1. El cálculo relevante es el siguiente:

$$Cx(h) = \begin{cases} \frac{Vx(h)}{Vmax}, \text{ Estado Adecuado} \\ 1, \text{ Estado general} \\ \frac{Vx(h)}{Vmin}, \text{ Estado Inadecuado} \end{cases}. \quad (8)$$

donde Vx(h) representa la cantidad de moneda virtual que posee el nodo x en el momento h. Los umbrales de moneda virtual Vmax y Vmin, respectivamente, representan las cantidades máxima y mínima de moneda virtual que puede poseer un nodo.

3.1.5. Grado de correlación social entre nodos

En SAN, las correlaciones sociales entre nodos describen el grado en que existe algún tipo de conexión o influencia mutua entre nodos. Se utiliza la correlación social.

Reflejar la interacción y la vinculación entre nodos en la red mediante el análisis de los vecinos comunes y los registros históricos de encuentros entre nodos. Por lo tanto, este artículo evalúa de manera integral la correlación social entre nodos desde las dimensiones de superposición social de nodos y el grado de contacto entre nodos.

El grado de superposición entre dos nodos se cuantifica por el número de vecinos comunes que poseen en SAN. Estos nodos vecinos comunes son el puente que conecta dos nodos y representan la similitud entre nodos. Por lo tanto, la superposición social entre el nodo x y el nodo y se define como

$$\text{superposición}_{xy} = \frac{\text{cómodo}}{\text{vecino}_x + \text{vecino} - \text{comx}_y}, \quad (9)$$

donde comxy denota el número de nodos vecinos comunes entre los nodos xey ; neighx y neighy representan el número total de vecinos de los nodos xey , respectivamente.

El grado de contacto entre nodos cuantifica la intimidad del contacto entre estos nodos mediante el análisis de la frecuencia y duración de los encuentros. Si dos nodos se comunican entre sí con frecuencia, interactúan frecuente y profundamente, y el grado de contacto entre ellos es alto, entonces, basándose en la definición de amigo en la sociedad real, los dos nodos son amigos entre sí. El grado de contacto contactxy entre los nodos xey se calcula de la siguiente manera :

$$\text{contactoxy} = \frac{Nmcxy}{N} \frac{Tmxy}{\text{acutenteT}}. \quad (10)$$

Como se mencionó anteriormente, Nmcxy denota el número de encuentros entre los nodos xey hasta el momento, Tmxy denota la suma de todos los tiempos de encuentro entre los nodos xey hasta el momento, N denota el número de nodos en la red actual y accurentT representa la red actual.
momento.

Con base en las ecuaciones (9) y (10), se calcula la correlación social SCxy entre nodos. como sigue:

$$SCxy = \quad \text{solapamientoxy} + (1 - \quad) \quad \text{contactoxy}, \quad (11)$$

donde es el factor de peso que determina la influencia de solapamientoxy y contactoxy sobre SCxy, y [0, 1].

3.2. Modelo de transacción

En SAN, el reenvío de mensajes entre nodos encontrados se abstrae como un proceso de transacción, donde el servicio de reenvío se negocia y comercializa utilizando moneda virtual. En este proceso, el nodo que lleva el mensaje antes de reenviarlo actúa como comprador, mientras que el nodo que recibe el mensaje actúa como vendedor y el servicio de reenvío de mensajes actúa como

Machine Translated by Google

la mercancía. Ambas partes están obligadas a revelar su riqueza y recursos, así como sus ofertas de servicios de transporte en función de sus respectivas consideraciones.

3.2.1. Función de gasto del comprador Para

garantizar que el mensaje pueda entregarse al nodo del siguiente salto sin problemas, el comprador x debe considerar su propia reserva de riqueza, urgencia de entrega y atributos del mensaje transportados, a fin de determinar un precio de gasto razonable como compensación por proporcionar el reenvío. servicios al nodo del siguiente salto. Cuando la reserva de riqueza de x es suficiente, el comprador sintetizará su propia urgencia de entrega y reserva de riqueza para dar un precio razonable.
Cuando la reserva de riqueza de x es insuficiente, con el paso del tiempo, el tiempo de supervivencia del mensaje se acortará gradualmente, el caché y la energía restantes del nodo se agotará gradualmente y la urgencia de entrega del comprador aumentará. Por lo tanto, para aliviar su presión, el comprador ofrecerá un precio de transacción más alto. Cuando la contribución de participación de x es mayor, lo que indica un mejor desempeño del servicio, beneficiará a x al comprar el servicio de reenvío. Si el nodo transporta un mensaje más grande, la energía y el caché consumidos en el reenvío también aumentarán, y la urgencia de entrega de x también aumentará y, a su vez, afectará el precio de oferta por el mensaje. Además, x debe considerar su propia correlación de posición de nodo. Cuando su correlación de posición en el nodo de destino del mensaje es alta, significa que el tiempo que tarda x en llegar al nodo de destino es más corto y aumentará ligeramente el precio para reenviar el mensaje lo más rápido posible. En resumen, la función de gasto del comprador x para reenviar el mensaje m en el momento h se define como

$$BNpx(h) = Mtamaño \quad (Q^{h} + \sigma 1 \quad g(x)) \quad Cx(h) \quad PCx(h).\ (x,metro) \tag{12}$$

donde Msize denota el tamaño de m, g(x) denota la relevancia posicional de x, σ1 es el peso ocupado por la relevancia posicional de un nodo y satisface α + β + γ + σ1 = 1, Cx(h) denota la riqueza de x en el momento h, y PCx(h) denota la contribución de participación del nodo x en el momento h.

3.2.2. Función de ingresos del vendedor

Al recibir mensajes transmitidos por x, el vendedor y también debe considerar su propia reserva de riqueza, la urgencia de la entrega y los atributos del mensaje transmitido para fijarle el precio, con el objetivo de maximizar sus ingresos. Cuando la reserva de riqueza de y es suficiente, la disposición del nodo para proporcionar reenvío de mensajes disminuirá, por lo que tiene que combinarse con la urgencia de entrega de y para establecer un precio razonable. Cuando la reserva de riqueza de y es insuficiente, necesita obtener moneda virtual de otro lugar a un precio más bajo, y su disposición a proporcionar reenvío de mensajes aumenta. El reenvío de mensajes es más favorable cuando y tiene una mayor contribución de participación. El tamaño del mensaje es directamente proporcional a la energía y el caché necesarios para el reenvío del mensaje; cuando el mensaje es más grande, el consumo de energía y caché también aumenta para proporcionar un servicio de reenvío, lo que, a su vez, afecta el precio. Además, y tiene que considerar la correlación social en
Si la correlación entre nodos es alta, es decir, SCxy ≥ SCxymin, entonces indica que la relación entre dos nodos es mejor. El nodo y tiene una mayor disposición a reenviar el mensaje y el precio de oferta será relativamente bajo, como se muestra en la ecuación (13). Por el contrario, si la correlación entre nodos es baja, es decir, SCxy < SCxymin, el nodo reenviador ofertará relativamente alto, como se muestra en la Ecuación (14).

$$SNpy(h) = Mtamaño \quad (Q^{h} - \sigma 2 \quad (1 - SCxy)) \quad (1 - \frac{1}{Ci(h)} PCy\ (h)),\ (y,m) \tag{13}$$

$$SNpy(h) = Mtamaño \quad (Q^{h}_{(y,m)} + \sigma 2 \quad SCxy) \quad \frac{1}{Ci(h)} (1 - PCy\ (h)). \tag{14}$$

donde Msize denota el tamaño de m, SCxy denota la correlación social entre x e y, y σ2 denota el valor de peso ocupado por la correlación social entre x e y, satisfaciendo

Machine Translated by Google

α + β + γ + σ2 = 1. SCxymin denota el umbral mínimo de correlación social entre x e y, Cy(h) denota el estado de riqueza de y en el momento h, y PCy(h) denota la contribución de participación de y en el momento h.

3.2.3. Estrategia de reenvío forzado Dadas

las limitaciones de energía y recursos de caché disponibles para los nodos de la red, tienden a priorizar el reenvío de sus propios mensajes o se niegan a reenviar mensajes no locales para garantizar que los mensajes generados se entreguen con éxito. Este comportamiento perjudica enormemente los intereses generales de la red. Mantener los intereses colectivos de la red y

Para incentivar a los nodos de baja colaboración a participar en la cooperación, este artículo introduce una estrategia de reenvío forzado para restringir el comportamiento de aquellos nodos que sólo están preocupados por sus propios intereses y no están dispuestos a cooperar en la red. Esta estrategia promueve la cooperación entre nodos y optimiza el rendimiento de la red.

El tamaño del valor de reenvío forzado CFx del nodo x está determinado por el grado de colaboración Xx(h) y el valor de contribución C(i, n) del nodo x, que se calcula de la siguiente manera:

$$CFx = \quad 10 \quad (0{,}3 - Xx(h)) - C(i, n) \quad . \tag{15}$$

Forzar que el valor de reenvío se actualice automáticamente a una frecuencia fija garantiza que el comportamiento de reenvío de los nodos pueda monitorearse y regularse en ciertos nodos de tiempo. Cuando CFx > 0, el nodo x debe reenviar mensajes CFx generados por otros nodos antes de poder reenviar sus propios mensajes generados. Cuando el nodo x tiene restringido el reenvío, para reenviar sus propios mensajes sin problemas, solo puede mejorar el grado de colaboración participando en el reenvío de mensajes generados por otros nodos, y luego reducir gradualmente su propio valor de reenvío forzado hasta que finalmente restablezca el normal. capacidad de reenvío de mensajes .

3.2.4. Reglas de transacción

En SAN, cuando el comprador x se encuentra con el vendedor y, ambas partes deben negociar el precio del servicio de reenvío de datos de acuerdo con reglas específicas, y las reglas de transacción específicas del algoritmo son las siguientes:

(1) Tanto el comprador como el vendedor están plenamente informados del precio del mensaje y del estado patrimonial de la otra parte.

(2) Una vez iniciada la transacción, la riqueza del comprador es el precio del gasto dado por el comprador x como BNpx(h) y el precio dado por el vendedor y como SNpy(h). Si BNpx (h) ≥ SNpy (h), entonces el mensaje m se reenvía correctamente y se puede reenviar el siguiente mensaje. Si BNpx(h) < SNpy(h), el primer reenvío de negociación falla.

(3) Si la primera negociación entre comprador y vendedor fracasa, entre en la segunda etapa de negociación. Al comparar la riqueza de ambas partes, se ajustan los precios respectivos. El comprador ajusta BNpx(h) considerando su grado de cooperación, contribución promedio y relevancia posicional, y el vendedor ajusta SNpy(h) según su grado de cooperación, contribución promedio y correlación social entre nodos. Los factores de ajuste para la segunda negociación son k1 y k2, respectivamente. Las segundas reglas de negociación son las siguientes:

- Si Cx(h) > Cy(h), entonces SNpy(h) permanece sin cambios y BNpx(h) se ajusta según la ecuación BNpx(h) = BNpx(h) (1 + k1), donde k1 es calculado de la siguiente manera:

$$k1 = \omega1 \quad Xx(h) + \omega2 \quad avgCx + \omega3 \quad g(x), \text{ donde} \tag{dieciséis}$$

Xx(h) denota el grado de cooperación de x, avgCx denota el grado de contribución promedio de x, y g(x) denota el relevancia posicional del nodo x. Los pesos ω1, ω2 y ω3 denotan la influencia del grado de cooperación, el grado de contribución promedio y la relevancia posicional del nodo en el factor de ajuste k1, respectivamente, y la suma de los tres es 1. Aquí, los pesos se ajustan dinámicamente utilizando un método de ponderación adaptativo, y el valor de la ponderación se calcula utilizando la Ecuación (17):

Machine Translated by Google

$$\omega 1 = \frac{Xx(h)}{Xxh+promedioCx+g(x)}$$
$$\omega 2 = \frac{promedioCx}{Xxh+promedioCx+g(x)} \quad (17)$$
$$\omega 3 = \frac{gramo(x)}{Xxh+promedioCx+g(x)}$$

- Si Cy(h) ≥ Cx(h), entonces BNpx(h) no cambia y SNpy(h) se ajusta según la fórmula SNpy(h) = SNpy(h) (1 − k2), donde k2 se calcula de la siguiente manera:

$$k2 = \theta 1 \quad Xy(h) + \theta 2 \quad avgCy + \theta 3 \quad (18)$$

SCxy, donde Xy(h) denota el grado de cooperación de y, avgCy denota el grado de contribución promedio de y, y SCxy denota la correlación social entre los nodos x y y.

Los pesos θ1, θ2 y θ3 representan la influencia del grado de colaboración, promedio grado de contribución y correlación social entre nodos en el factor de ajuste k2, respectivamente, y la suma de los tres es 1. El ajuste dinámico de estos Los pesos también siguen el mismo método que en la ecuación (17).

(4) Si ambos nodos llegan a un consenso de que BNpx(h) ≥ SNpy(h) después de la segunda negociación, el mensaje se reenviará como en el paso (2). En caso contrario, se abandonará la transacción, y se continuará con la siguiente transacción. El flujo de transacciones del mensaje se muestra en Figura 2.

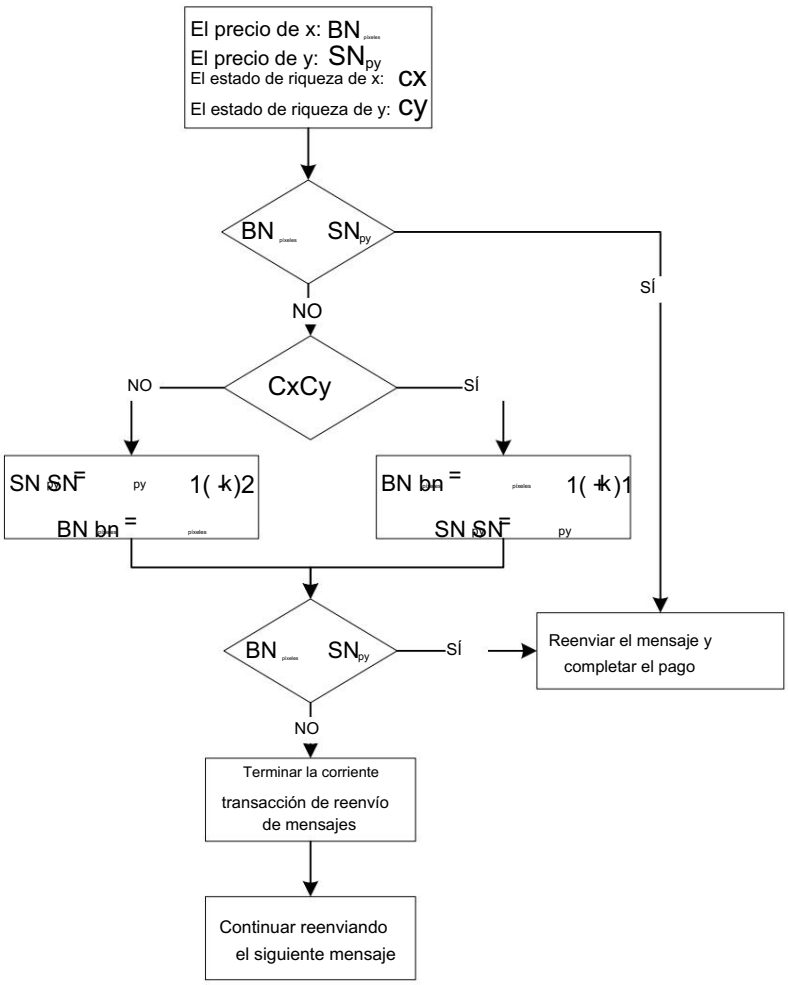


Figura 2. Diagrama de flujo de transacción de mensajes.

El proceso detallado del algoritmo de transacción de mensajes normal se muestra en el Algoritmo 1 , que describe el proceso de negociación completo para el reenvío de mensajes.

Machine Translated by Google

servicio cuando dos nodos se encuentran sin una penalización de reenvío forzado. El proceso de reenvío detallado es el siguiente: cuando los nodos x e y se encuentran, x e y dan su
respectivas primeras ofertas para el servicio de reenvío de acuerdo con las Ecuaciones (12) a (14), respectivamente. Si BNpx ≥ SNpy, entonces el mensaje se reenvía y el precio de la transacción se establece en el promedio de BNpx y SNpy. Y luego el registro de la transacción se empaqueta en la cadena de bloques. Por el contrario, de acuerdo con las reglas de transacción descritas anteriormente, el precio se ajusta basándose en el estado de riqueza de xey para hacer una nueva oferta. Si BNpx1 ≥ SNpy1, entonces uno la mitad de la suma de BNpx1 y SNpy1 es el precio de la transacción. Y el registro de la transacción es empaquetado en la cadena de bloques después del reenvío exitoso del mensaje. Si la negociación todavía falla después de que ambas partes reajustan sus precios, dejan de reenviar este mensaje m, y el siguiente mensaje se procesa para su reenvío.

Algoritmo 1 Algoritmo de transacción de mensaje normal

```
Entrada: BNpx, SNpy, Cx, Cy
Salida: el mensaje de reenvío exitoso m
si BNpx >= SNpy entonces
    Costo = (BNpx + SNpy)/2
    x envía el mensaje m a y, y recibe el mensaje m
    si la cantidad de moneda que x tiene actualmente es mayor que Costm entonces
        Transacción exitosa El                                  crearNuevoBloque
        bloque se agrega al final de la cadena de bloques.
        Actualizar la riqueza de x e y
        regresar m
    terminar si
más
    Vuelva a calcular el costo de m y las ofertas ajustadas de ambas partes.
    BNpx1 = obtenerPrecioDosveces_x(BNpx,SNpy Cx, Cy)
    SNpy1 = obtenerPrecioDosveces_y(BNpx,SNpy Cx, Cy)
    si BNpx1 >= SNpy1 entonces
        Costo = (BNpx1 + SNpy1)/2
        x envía el mensaje m a y, y recibe el mensaje m
        si la cantidad de moneda que x tiene actualmente es mayor que Costm , entonces
            Transacción exitosa El                              crearNuevoBloque
            bloque se agrega al final de la cadena de bloques.
            Actualizar la riqueza de x e y
            regresar m
        terminara si
    demás
        Continúe con la siguiente transacción.
terminar si
terminar si
```

3.3. Proceso del juego de reenvío de mensajes

En SAN, la transacción de reenvío de mensajes entre nodos se puede abstraer como una proceso de juego dinámico. Los participantes del juego en este proceso son el comprador x y el vendedor. y. Hay dos fases principales: si el comprador x envía una solicitud de reenvío de mensaje y si el vendedor recibe una solicitud de reenvío de mensaje en este momento. El comportamiento de ambas partes en las dos fases pueden ser cooperación o rechazo de cooperación. Es ser Se espera que los nodos racionales de la red seleccionen una estrategia que maximice sus propios beneficios. En este artículo utilizamos la inducción hacia atrás para analizar las dos etapas del juego. proceso y demostrar que la cooperación mutua es la estrategia óptima para ambas partes.

Supongamos que en el momento h, para el mensaje m, el precio de oferta de x es BNpx(h) y el el precio de oferta de y es SNpy(h), entonces el precio de transacción para el mensaje es Costm = $\frac{BNpx(h)+SNpy(h)}{2}$.

Machine Translated by Google

(1) Primero, analice la segunda etapa del proceso del juego, si el vendedor y recibe la solicitud de reenvío del mensaje o no, y su comportamiento determina las ganancias del nodo. Cuando y acepta una solicitud de reenvío de mensajes de x, es decir, elige un comportamiento cooperativo, la ganancia actual Ey de y se calcula de la siguiente manera:

$$Ey = SNpy(h) - Costo. \tag{19}$$

Cuando y se niega a recibir una solicitud de reenvío de mensaje de x, es decir, elige rechazar un comportamiento cooperativo, no hay ganancia. Además, dado que y no aceptó el mensaje mientras se encontraba con x, la cantidad de mensajes no locales reenviados por y es menor, mientras que la cantidad de encuentros aumenta y el grado de colaboración de y disminuye, lo que resulta en la participación de la contribución también. decreciente. De las ecuaciones (13) y (14), se puede ver que la próxima oferta de y por otros mensajes aumenta, lo que puede provocar el fracaso de la transacción. Por el contrario, estará dispuesto a recibir mensajes.

(2) A continuación, analice si el comprador x envía solicitudes de reenvío de mensajes o no. Si x envía solicitudes de reenvío de mensajes en el momento h, es decir, elige el comportamiento cooperativo, entonces la moneda que ahorra Ex se puede expresar como

$$Ej = BNpx(h) - Costm, \tag{20}$$

Si x no envía una solicitud de reenvío de mensaje en el momento h, es decir, se niega a cooperar, primero analice el costo que x tiene que pagar desde el punto de vista del mensaje a reenviar. En el momento h + 1, el tiempo de supervivencia del mensaje pasa con él, y para reenviar m exitosamente, el costo adicional H1 que x tiene que pagar se puede expresar como

$$H1 = Mtamaño \quad Cx(h+1) \quad PCx(h+1) \quad 1 \quad \frac{Tre(h) - Tre(h+1)}{TTL}, \tag{21}$$

donde Tre(h + 1) denota el TTL restante de m en el momento h + 1, y los significados de los otros símbolos corresponden a los de la Ecuación (12).

Además, el costo que debe pagar x se analiza en términos de energía y caché del comprador x. Dado que la energía de x disminuye estrictamente a medida que aumenta el tiempo y x se niega a cooperar, su caché también está parcialmente ocupada por el mensaje m. Por lo tanto, en el momento h + 1, si x quiere enviar una solicitud de reenvío y su precio propuesto también aumentará, entonces el precio adicional H2 que x tiene que pagar se puede expresar como

$$H2 = \quad 2 \quad \left(\frac{\text{talla grande}}{Brex(h+1)} + \frac{Mtamaño}{Erx(h+1)} \right) \quad Lx \quad Cx(h+1) \quad PCx(h+1). \tag{22}$$

donde Lx denota la longitud del mensaje que será reenviado por x en el momento h + 1, Brx (h + 1) denota la relación de buffer restante de x en el momento h + 1, Erx (h + 1) es la relación de energía restante de x en el momento h + 1, y los significados de los otros símbolos coinciden con los de la Ecuación (12).

En resumen, el costo adicional H que deberá pagar el comprador x por optar por rechazar La cooperación en el momento h es al menos.

$$H = mín\{H1, H2\}. \tag{23}$$

Obviamente, Ex > 0 > −H, por lo que x debe elegir enviar una solicitud de reenvío de mensaje.

Luego del análisis anterior, tanto compradores como vendedores elegirán el comportamiento cooperativo bajo la premisa de que ambos obtengan el máximo beneficio, es decir, (cooperación, cooperación) es la estrategia óptima.

3.4. Módulo de

seguridad Este documento adopta la estrategia de incentivo basada en moneda virtual para diseñar el algoritmo, por lo que es inevitable que se produzca el comportamiento de cotizaciones falsas de los nodos en el proceso de cada transacción, lo que socava gravemente el orden normal de la transac

Machine Translated by Google

Para evitar que los nodos alteren ilegalmente la cantidad de moneda, este documento utiliza la tecnología blockchain para crear un módulo de seguridad para garantizar transacciones de reenvío de mensajes abiertas y transparentes entre nodos. Blockchain es un libro de contabilidad digital descentralizado para transacciones económicas con las ventajas de transparencia y seguridad [29–32]. En la red, los registros de todas las transacciones exitosas se registran en una estructura de cadena de bloques, generalmente en un orden secuencial, y se garantiza criptográficamente que no serán manipulados ni falsificados. Cada nodo de la cadena es independiente e igual y se basa en un mecanismo de consenso para garantizar la coherencia de los datos, con las características de descentralización, apertura , transparencia y no manipulación [33].

3.4.1. Creación de módulos

Al almacenar datos de transacciones, cada nodo de la red genera una clave pública PK y una clave secreta SK mediante un algoritmo de cifrado de clave pública (por ejemplo, RSA). Entre ellos, el nodo mantiene la SK de forma segura, mientras que la PK está disponible públicamente en la red.
Para garantizar la seguridad del proceso de transacción y evitar cotizaciones falsas, este documento realiza el siguiente proceso para el registro de transacción generado entre el iniciador A y el aceptador B de una transacción, que contiene las partes de la transacción A y B, el precio de la transacción, el costo. , etc .: (1) Creación de bloque: cuando la

transacción del mensaje entre A y B se completa con éxito , use la función hash (SHA-256) para calcular el valor hash de cada elemento en el registro de transacción. Luego, la SK de A se utiliza para firmar el valor hash H(costo) del precio de la transacción, generando SigSK(H(costo)). Luego, el registro de transacción, el valor hash y la firma se empaquetan en un nuevo bloque y se transmiten a toda la red para que otros nodos puedan verificar.

(2) Verificación: B puede usar la PK de A para verificar la firma digital y recalcular el valor hash H′ (costo) del precio de la transacción. Si estos dos valores hash coinciden, entonces el proceso de verificación es exitoso, lo que indica que los datos de la transacción no han sido alterados en términos de precio durante la transmisión. Otros nodos de la red comprobarán si la transacción del bloque es válida después de recibir el nuevo bloque.

(3) Logro de consenso: cuando un número suficiente de nodos confirma que el
La transacción es válida y se llega a un consenso, el bloque se considera válido.

(4) Actualización de la cadena de bloques: una vez que un nuevo bloque ha obtenido el consenso de toda la red, se agrega al final de la cadena de bloques como se muestra en la Figura 3. Este proceso de actualización garantiza el consenso y la coherencia del historial de transacciones en toda la red.

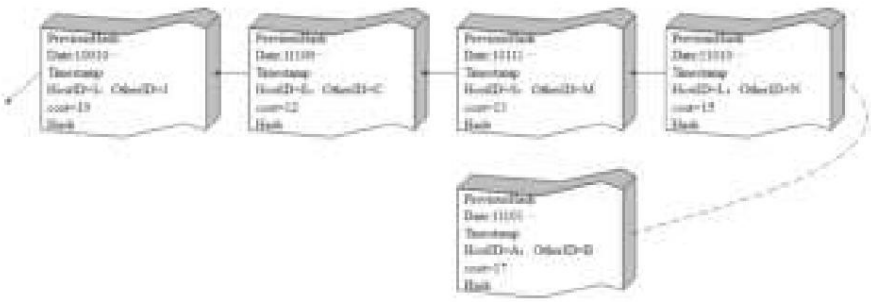


Figura 3. Diagrama esquemático de la blockchain.

La manipulación de los datos de las transacciones está garantizada mediante el uso de algoritmos hash en los módulos creados mediante el proceso anterior. Cada nuevo bloque contiene el valor hash del bloque anterior, y cualquier manipulación de los datos de la transacción cambiará su valor hash, interrumpiendo así la continuidad de toda la cadena de bloques y haciendo que cualquier comportamiento deshonesto sea fácil de reconocer y rechazar por otros nodos de la red. . Además, los datos de las transacciones son transparentes y confiables debido al hecho de que los registros de transacciones verificados se escriben en bloques y se agregan a la cadena de bloques, lo que, a su vez, logra transparencia y confiabilidad de los datos de las transacciones. Cualquier nodo que participe en la red puede acceder y verificar estos registros de transacciones, evitando nuevamente de manera efectiva la ocurrencia de un

Machine Translated by Google

comportamiento de cotización falsa. Todos los nodos siguen el principio de la cadena más larga, lo que significa que cuando Existen múltiples cadenas de sucursales en competencia, los nodos elegirán unirse a la cadena válida más larga como la cadena principal, garantizando la robustez y seguridad de la blockchain. Así, la equidad y la seguridad del proceso de transacción de mensajes en la red se garantiza mediante el uso de la cadena de bloques.

3.4.2. Esquema de reenvío

El proceso completo del servicio de reenvío de mensajes en DFIA se muestra en el Algoritmo 2. Supongamos que el nodo x se encuentra con el nodo y, x necesita reenviar el mensaje m a y, donde CFx denota el valor de reenvío forzado de x. CFx se juzga antes de la transacción de reenvío de mensajes.
Cuando CFx > 0, x entra en la fase de reenvío forzado; se ve obligado a reenviar mensajes no locales. Para cada transacción exitosa del servicio de reenvío de mensajes, el valor de CFx se reduce en uno y viceversa; continúa reenviando el siguiente mensaje.
Cuando CFx ≤ 0, x lleva a cabo la transacción normal de reenvío de mensajes de acuerdo con Algoritmo 1. Durante la transacción del servicio de reenvío de mensajes, el servicio de reenvío es el precio se fija de acuerdo con las ecuaciones (12) a (14), y la negociación se lleva a cabo de acuerdo con reglas de transacción. Si la negociación tiene éxito y el mensaje se envía correctamente, la información de la transacción, incluidas ambas partes x e y, el precio de la transacción, etc., está empaquetada en el bloque y se agrega a la cadena de bloques después de la verificación. De lo contrario, la transacción falla y se reenvía el siguiente mensaje.

Algoritmo 2 Algoritmo DFIA

```
Entrada: CFx, x, y
Salida: el mensaje de reenvío exitoso m
 1: si CFx > 0 entonces
 2: si el nodo fuente del mensaje no es el nodo x entonces
 3: si BNpx >= SNpy entonces
 4: Costo = (BNpx + SNpy )/2
 5: si la cantidad de moneda que x tiene actualmente es mayor que Costm entonces
 6: Transacción exitosa 7: El bloque se agrega al                                   crearNuevoBloque
 final de la cadena de bloques.
 8: Actualiza la riqueza de xey
 9: CFx = CFx − 1
10: volver m
11: terminar si
12: más
13: Vuelva a calcular el costo de my las ofertas ajustadas de ambas partes.
14: BNpx1 = obtenerPrecioTwice_x(BNpx,SNpy Cx, Cy)
15: SNpy1 = obtenerPrecioDosveces_y(BNpx,SNpy Cx, Cy)
16: si BNpx1 >= SNpy1 entonces
17: Costo = (BNpx1 + SNpy1)/2
18: si la cantidad de moneda que x tiene actualmente es mayor que Costm , entonces
19: Transacción exitosa 20: El bloque se agrega al final                           crearNuevoBloque
de la cadena de bloques.
21: Actualiza la riqueza de xey
22: CFx = CFx − 1
23: volver m
24: terminar si
25: más
26: Continuar con la siguiente transacción
27: terminar si
28: terminar si
29: terminar si
30: más
31:                                                   Algoritmo de transacción de mensajes normales
32: terminar si
33: función CREATENEWBLOCK(hostX, otro, m, costo)
34:         anteriorHash ← blockchain.getLastBlock().getHash()
35:         marca de tiempo ← SimClock.getTime()
36:         Firme el valor hash del costo de transacción utilizando la clave privada SK de A.
37:         nuevoBloque ← nuevo Bloque(hostX, otro, m, costo, anteriorHash, marca de tiempo, 0)
38:         blockHash ← nuevoBlock.calculateHash()
39:         nuevoBlock.setHash(bloqueHash)
40:         devolver nuevoBloque
41: función final
```

Machine Translated by Google

4. Evaluación del desempeño

4.1. Entorno y escenario de simulación

Los experimentos presentados en este capítulo se realizaron en una computadora personal. con una CPU de 3,60 GHz, 16,0 GB de RAM y sistema operativo Windows 11, ejecutando el simulador de Entorno de Red Oportunista [34] (ONE) a través de IntelliJ IDEA 2021.2.1 funcionamiento del software. En los experimentos, este estudio adoptó la ruta Spray and Wait. como algoritmo de enrutamiento subyacente y comparó DFIA con RSIA en [26], STIA en [25], y EEIS en [24] para simulación. Se diseñaron los siguientes cinco escenarios de simulación:

(1) S + nodos egoístas;

(2) S + nodos egoístas + DFIA;

(3) S + nodos egoístas + RSIA;

(4) S + nodos egoístas + STIA.

(5) S + nodos egoístas + EEIS.

La configuración de los parámetros experimentales específicos se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Configuración de parámetros para experimentos de simulación.

Parámetro	Valor
tiempo de simulación	12 horas
Número de nodos	180
Área de simulación	4500 mx 3400 m
Velocidad de transmisión	250kB/s
Rango de transmisión	10 metros
modelo de movimiento	Movimiento basado en mapa de ruta más corta
Protocolo de enrutamiento	Rociar y esperar
Tamaño del búfer	10M
Mensaje TTL	6 horas
Transmitir energía	4W
Energía inicial	2000J
Intervalo de creación de mensajes	25 s-35 s
Tamaño del mensaje	500 kB–1 MB
α	0.1
β, γ, σ1 , σ2	0.3
ρ	0,6
	0,45

4.2. Parámetros de rendimiento

Los experimentos de simulación utilizan principalmente los siguientes tres parámetros como evaluación. Criterios de evaluación para evaluar la eficacia y practicidad del algoritmo de incentivo.

Probabilidad de entrega de mensajes: es la relación entre el número total de mensajes entregados con éxito al nodo de destino y el número total de mensajes creados. A Una tasa de entrega de mensajes más alta indica una mayor tasa de éxito del nodo en el reenvío del mensaje. mensaje al nodo de destino. La probabilidad de entrega del mensaje es un factor extremadamente importante. Parámetro para evaluar el rendimiento de la red.

Latencia promedio: este es el tiempo promedio que consume un mensaje desde su inicio para un reenvío exitoso al nodo de destino. Una latencia más baja significa que menos red Los recursos se consumirán durante el reenvío de mensajes y el mensaje tardará menos. tiempo para llegar al destino.

Gastos generales de la red: está representado por el ratio de la diferencia entre el número de mensajes transmitidos por nodos en la red y el número de mensajes retransmitidos con éxito mensajes reenviados al número de mensajes reenviados exitosamente. Una reducción en La sobrecarga de la red es indicativa de una reducción en el consumo de energía por parte del nodo durante reenvío de mensajes.

Machine Translated by Google

4.3. Resultados de la simulación

En este estudio, los experimentos de evaluación se diseñaron en términos de diferentes porcentajes de nodos egoístas y diferentes TTL. En la primera evaluación, observamos los resultados experimentales estableciendo el porcentaje de nodos egoístas en 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 10 Las Figuras 4 a 6 ilustran el rendimiento comparativo de cada algoritmo en términos de probabilidad de entrega de mensajes, latencia promedio y sobrecarga de la red en tres dimensiones cuando existen diferentes porcentajes de nodos egoístas en los cinco escenarios anteriores. En la segunda evaluación, el porcentaje de nodos egoístas se estableció en 60% y el TTL del mensaje se estableció en 2 h, 4 h, 6 h, 8 h y 10 h, respectivamente. Las Figuras 7 a 9 muestran los cambios en la probabilidad de entrega de mensajes, la latencia promedio y la sobrecarga de la red de cada algoritmo para los cinco escenarios mencionados anteriormente bajo diferentes TTL de mensajes. Se realizaron un total de 30 ensayos para cada conjunto de experimentos de evaluación, y el valor medio de los datos de estos ensayos se tomó como resultado experimental final.

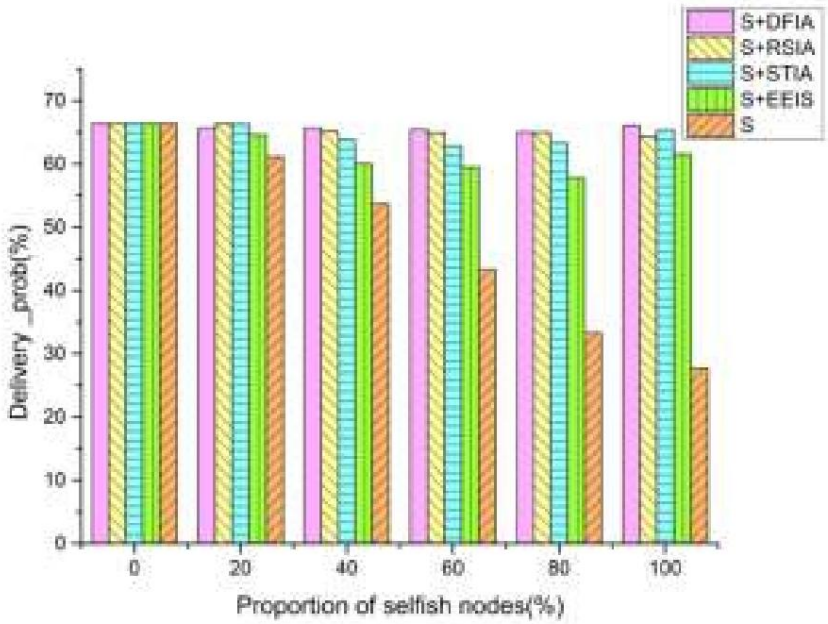


Figura 4. Probabilidad de entrega de mensajes con diferentes porcentajes de nodo egoísta.

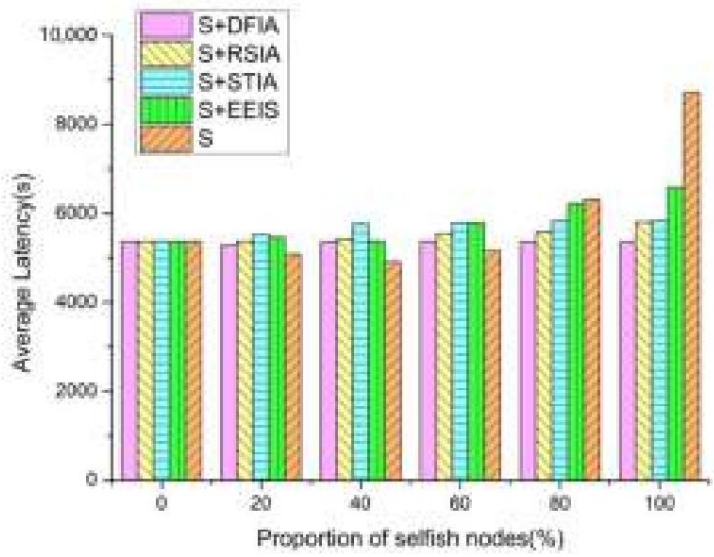


Figura 5. Latencia media con diferentes porcentajes de nodos egoístas.

Machine Translated by Google

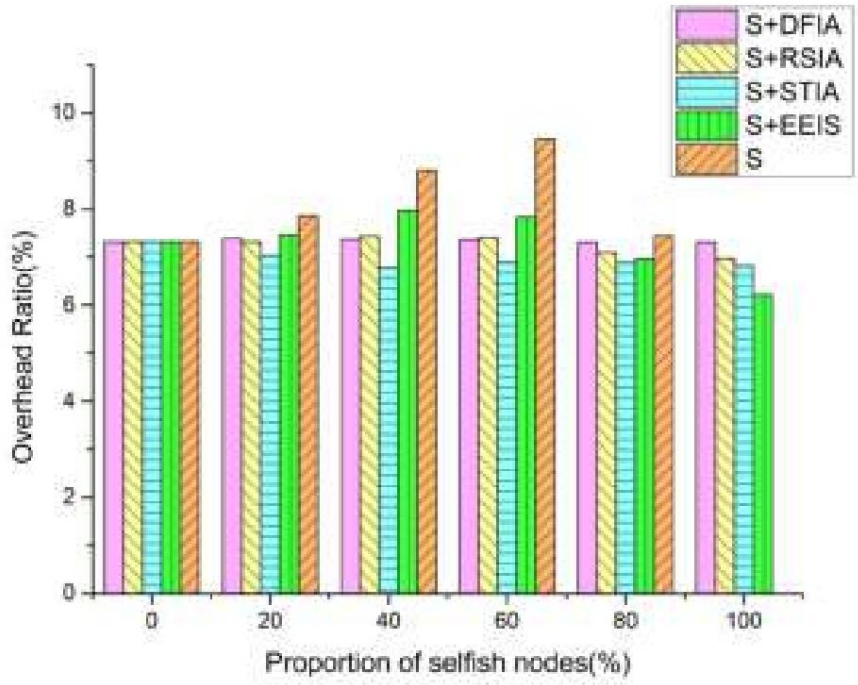


Figura 6. Gastos generales de la red para diferentes porcentajes de nodos egoístas.

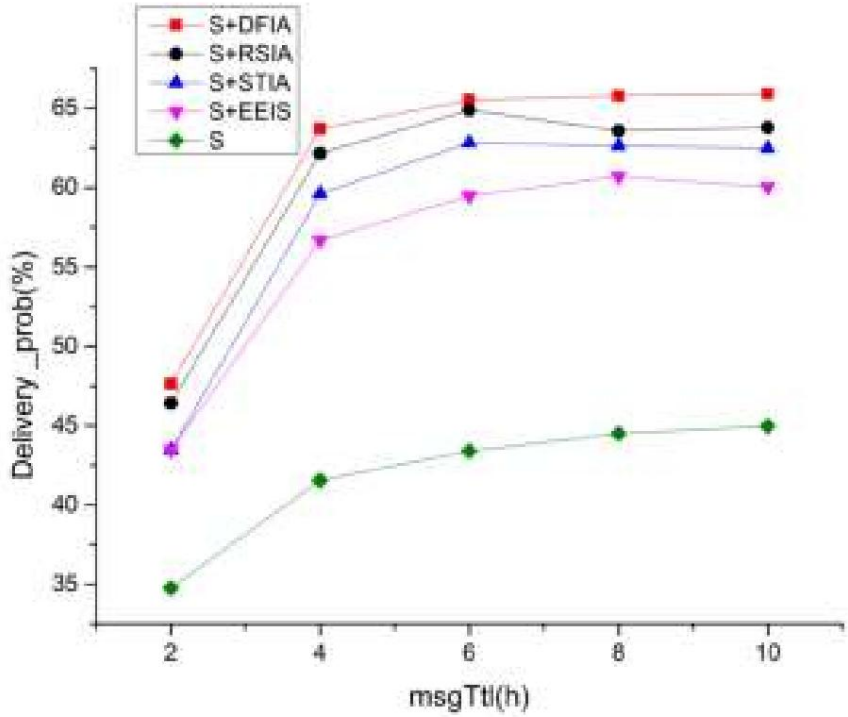


Figura 7. Probabilidad de entrega de mensajes bajo diferentes TTL de mensajes.

Machine Translated by Google

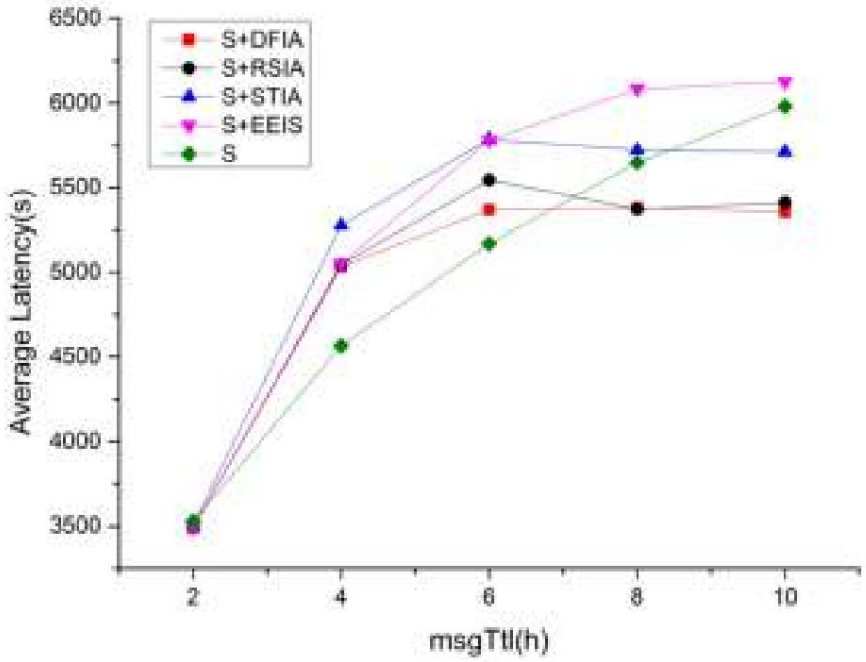


Figura 8. Latencia promedio en diferentes TTL de mensajes.

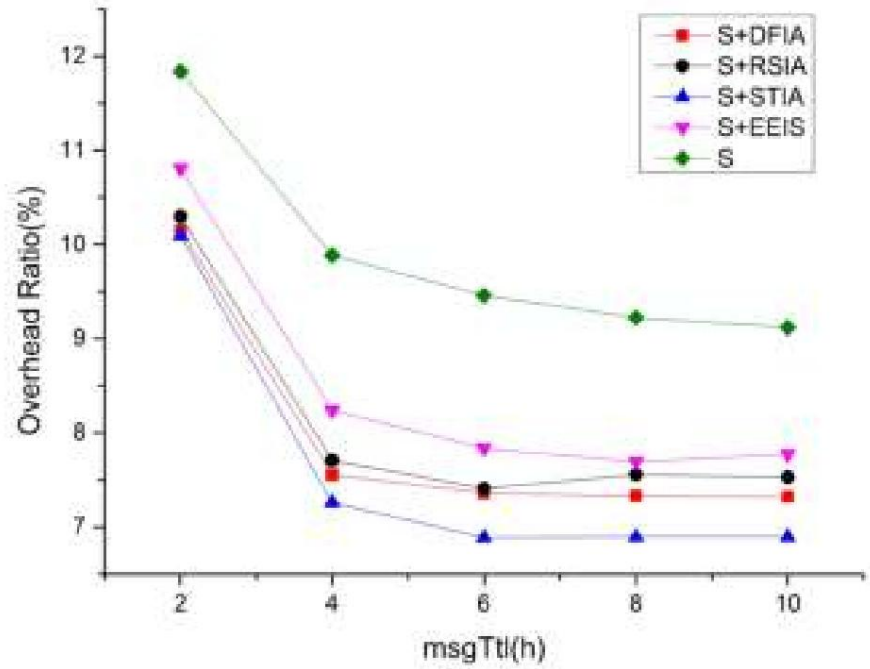


Figura 9. Gastos generales de la red en diferentes TTL de mensajes.

4.3.1. Diferentes porcentajes de nodos egoístas

Como se muestra en la Figura 4, se representa la probabilidad de entrega de mensajes para los cinco escenarios con diferentes porcentajes de nodos egoístas. La disminución en los porcentajes de entrega de mensajes se puede atribuir al hecho de que los nodos egoístas no participan en el comportamiento cooperativo de reenvío, lo que reduce la tasa de éxito de los mensajes que llegan al nodo de destino. La tendencia general indica que la adición de nodos egoístas da como resultado que DFIA, RSIA y STIA actúen como incentivo en el caso de nodos con un comportamiento egoísta. Sin embargo, DFIA es más eficaz en comparación con RSIA y STIA. S tiene una tendencia más pronunciada a disminuir la tasa de entrega de mensajes, ya que no utiliza ningún incentivo. RSIA se centra en las limitaciones de recursos y la posible presencia de limitaciones de recursos de los nodos muy prós

Machine Translated by Google

y el posible impacto del egoísmo preferido en la red. STIA tiene en cuenta la calidad del servicio de reenvío de los nodos, así como los posibles efectos de la escasez de moneda a corto plazo al tomar decisiones sobre el comportamiento de reenvío de los nodos. EEIS utiliza precios de recursos de nodos y adopta el modo de intercambio equivalente para realizar transacciones. Sin embargo, no consideran la influencia de la correlación de ubicación entre nodos y la influencia de correlaciones sociales fuertes y débiles entre nodos. DFIA considera de manera integral las características de la ubicación de los nodos y las correlaciones sociales. Aunque su probabilidad de entrega de mensajes es un 0,68% menor que la de RSIA cuando hay un 20% de nodos egoístas, con el aumento continuo de nodos egoístas, la probabilidad de entrega de DFIA es mayor que la de otros algoritmos. Según la evaluación del efecto general del experimento, DFIA demuestra el rendimiento óptimo en términos de probabilidad de entrega de mensajes.

La Figura 5 ilustra la latencia promedio para los cinco escenarios con diferentes proporciones de nodos egoístas. El aumento en el retraso promedio significa que la adición de nodos egoístas da como resultado un tiempo más largo para el reenvío de mensajes al destino. Los datos presentados en la Figura 5 revelan que a medida que la proporción de nodos egoístas aumenta del 0% al 100%, la latencia promedio aumenta en todos los escenarios, con distintos grados de aumento. S tiene el aumento más significativo en la latencia promedio, especialmente cuando la proporción de nodos egoístas alcanza el 60%; su valor de latencia promedio aumenta dramáticamente porque no se adoptan medidas de incentivo. En los cuatro escenarios restantes, el aumento de la latencia promedio es relativamente suave y no parece aumentar bruscamente. Entre ellos, la latencia promedio de DFIA es la más estable y su latencia promedio es menor que la de RSIA, STIA y EEIS. Esto indica que la adopción de la estrategia de incentivos DFIA es más propicia para mitigar el impacto de los nodos egoístas, mejora la probabilidad de entrega del mensaje y reduce la latencia promedio al mismo tiempo.

La Figura 6 muestra la sobrecarga de la red en los cinco escenarios bajo diferentes porcentajes de nodos egoístas. A partir de los datos de la figura, se puede ver que con la creciente proporción de nodos egoístas, la sobrecarga de la red de los otros cuatro escenarios, excepto S sin incentivos, generalmente está disminuyendo y cambiando de manera más estable. En el escenario S, la sobrecarga de la red disminuye drásticamente cuando la proporción de nodos egoístas excede el 60%, y disminuye directamente a 0 cuando la proporción de nodos egoístas en la red es del 100% porque hay cada vez más nodos egoístas en la red. y los nodos no pueden transmitir los mensajes ni entregarlos con éxito al nodo de destino en ausencia de estrategias de incentivos. Cuando la proporción de nodos egoístas aumenta al 60%, la sobrecarga general de la red de DFIA es alta en comparación con RSIA, STIA, EEIS y S sin incentivos. Esto se debe a que DFIA introduce la tecnología blockchain en el uso de RSA para cifrar los registros de transacciones, lo que genera una mayor sobrecarga general de la red a expensas de una mayor sobrecarga de la red al aumentar la probabilidad de entrega de mensajes y garantizar la seguridad de la transacción.

4.3.2. Diferentes TTL

La Figura 7 ilustra la probabilidad de entrega de mensajes para los escenarios anteriores bajo diferentes TTL de mensajes. Es evidente que la probabilidad de entrega del mensaje aumenta con cada aumento del TTL del mensaje. El aumento del TTL de mensajes significa que los nodos no están restringidos por demasiadas limitaciones de tiempo al reenviar mensajes. Hay tiempo suficiente para reenviar los mensajes, lo que puede evitar la situación de caída de mensajes y el consiguiente menor rendimiento de la red. En comparación con los otros cuatro algoritmos, la probabilidad de entrega de mensajes de DFIA es claramente óptima, lo que depende del hecho de que DFIA tiene en cuenta los factores que conducen al egoísmo de los nodos en muchos aspectos, lo que, a su vez, motiva a los nodos egoístas a tomar participar en la cooperación. Por el contrario, RSIA, STIA y EEIS no consideran el efecto de la relevancia de la ubicación de los nodos sobre los nodos y no distinguen obviamente la fuerza de la correlación social, lo que lleva a incentivos menos efectivos. Se puede ver que DFIA puede evitar eficazmente que los nodos descarten mensajes, haciendo que la probabilidad de entrega del mensaje sea óptima.

Machine Translated by Google

La Figura 8 ilustra la latencia promedio de los cuatro escenarios bajo diferentes TTL de mensajes. Está claro que la latencia media aumenta para todos ellos a medida que aumenta el TTL del mensaje. Un aumento en el TTL del mensaje significa que los mensajes tienen una mayor probabilidad de ser entregados a una mayor distancia en la red, lo que, a su vez, conduce a un aumento en el número de paquetes en los nodos congestionados cuando se realiza el reenvío de datos y una consiguiente aumento de la latencia de la red. El retraso promedio de estos cinco escenarios tiene una tendencia creciente significativa con el aumento del TTL del mensaje, y el aumento máximo en el retraso promedio se observa para S, que no recibe ning Comparativamente, DFIA, RSIA, STIA y EEIS tienen un aumento menor en la latencia promedio. Entre ellos, la latencia promedio de DFIA es menor en comparación con RSIA, STIA y EEIS, lo que se debe a que aunque STIA considera los recursos del nodo y la calidad del servicio, ignora el factor de correlación social del nodo, lo que aumenta la latencia promedio. del mensaje hasta cierto punto. RSIA solo considera las razones egoístas de los nodos, pero no considera las relaciones posicionales entre ellos y distingue entre correlaciones sociales fuertes y débiles, lo que conduce a una latencia promedio más alta. EEIS adopta la negociación cuadrática y no considera que el mensaje no se pueda transmitir a tiempo debido a la pérdida de paquetes del nodo, lo que afecta la latencia promedio. DFIA considera las relaciones posicionales entre nodos e introduce el factor de correlación social, mejorando así la tasa de entrega del mensaje y reduciendo la latencia promedio.

La Figura 9 ilustra la comparación de la sobrecarga de la red. A medida que aumenta el TTL del mensaje, la sobrecarga de la red en todos los escenarios disminuye gradualmente. Dado que S no toma ninguna medida de incentivo, la sobrecarga de su red es mayor que la de DFIA, RSIA, STIA y EEIS. STIA considera la calidad del servicio de los nodos y reduce las interacciones de mensajes durante el proceso de negociación, optimizando así el tiempo de encuentro para la entrega de mensajes y reduciendo la sobrecarga de la red. EEIS solo considera el precio de los recursos de nodo y utiliza el valor del crédito para préstamos monetarios, y no considera el comportamiento de pérdida de paquetes causado por la disminución de la capacidad de transacción debido al endeudamiento excesivo y la falta de pago, lo que genera una alta sobrecarga de la red. DFIA considera los recursos de los nodos, los atributos de ubicación y las correlaciones sociales para el juego de negociación, lo que hace que su efecto de incentivo sea más significativo que el de RSIA, y también tiene una sobrecarga de red menor. Debido a la consideración de múltiples factores durante la negociación en DFIA, se generan más interacciones de información y la sobrecarga de la red es mayor en comparación con STIA. Pero DFIA aumenta la probabilidad de entrega de mensajes y reduce la latencia promedio, y el efecto de incentivo general es mejor que el de STIA.

5. Conclusiones

En este artículo, proponemos un algoritmo de incentivo de reenvío forzado y precios dinámicos basado en recursos (DFIA). DFIA negocia el servicio de reenvío requerido por los nodos integrando la urgencia de entrega determinada por el estado de los recursos del nodo, la relevancia de la ubicación y distinguiendo entre correlaciones sociales fuertes y débiles. Durante el proceso de transacción, la estrategia de reenvío forzado está diseñada para mejorar el grado de colaboración de los nodos. Para evitar que los nodos tengan un comportamiento de cotización falsa, DFIA utiliza la tecnología blockchain para el cifrado y lograr transparencia y credibilidad de los datos de las transacciones. Los resultados del experimento de simulación muestran que DFIA reduce la latencia promedio al tiempo que aumenta la probabilidad de entrega de mensajes e incentiva efectivamente a los nodos egoístas a participar en la cooperación. Sin embargo, el algoritmo utiliza RSA para cifrar los registros de transacciones, lo que genera una mayor sobrecarga general de la red, que debe abordarse y optimizarse en trabajos futuros. A continuación, profundizaremos en las medidas de seguridad que se deben tomar ante posibles comportamientos maliciosos como la connivencia de nodos entre sí y la manipulación de mensajes en una SAN.

Machine Translated by Google

Contribuciones de los autores: Conceptualización, XZ, YL (Yuan Li) y ZX; metodología, YL (Yuan Li); software, YL (Yuan Li); validación, ZX, YL (Yuan Li) y XZ; recursos, XZ, YL (Yuan Li) y ZX; curación de datos, YL (Yuan Li); redacción: preparación del borrador original, YL (Yuan Li) y DH; redacción: revisión y edición, ZX, YL (Yanchao Liu) y SW; administración del proyecto, ZX Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China (número de subvención NO. 61972136) y la Fundación de Apoyo al Equipo de Innovación Científica Juvenil Destacada del Departamento de Educación de la Provincia de Hubei (número de subvención T201410, T2020017).

Declaración de disponibilidad de datos: los datos están contenidos en el artículo.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Wang, Z.; Liao, J.; Cao, Q.; Qi, H.; Wang, Z. Lograr la cobertura de la barrera k en redes de sensores direccionales híbridos. Traducción IEEE. Multitud. Computadora. 2014, 13, 1443–1455. [Referencia cruzada]
2. Tsugawa, S.; Ohsaki, H. Estructura comunitaria e interacción local en redes sociales. J.Inf. Proceso. 2015, 23, 402–410. [Referencia cruzada]
3. Ning, Z.; Liu, L.; Xia, F.; Jedari, B.; Lee, yo; Zhang, W. CAIS: un esquema de incentivos ajustable en copia en el ámbito social comunitario Redes conscientes. Traducción IEEE. Veh. Tecnología. 2017, 66, 3406–3419. [Referencia cruzada]
4. Xu, F.; Xu, Q.; Xiong, Z.; Xiao, N.; Xie, Y.; Deng, M.; Hao, H. Esquema de enrutamiento distribuido inteligente basado en similitud social para redes sociales móviles. Generación del futuro. Computadora. Sistema. 2019, 96, 472–480. [Referencia cruzada]
5. Zhu, K.; Li, W.; Fu, X. SMART: una estrategia de enrutamiento con reconocimiento social y móvil para redes tolerantes a las interrupciones. Traducción IEEE. Veh. Tecnología. 2014, 63, 3423–3434. [Referencia cruzada]
6. Annalisa, S.; Antonio, C.; Floriano, DR; Peppino, F. Enrutamiento en redes sociales oportunistas móviles con nodos egoístas. Alambre. Comunitario. Multitud. Computadora. 2019, 2019, 6359806.
7. Xia, F.; Liu, L.; Jedari, B.; Das, SK PIS: un protocolo de enrutamiento multidimensional para redes socialmente conscientes. Traducción IEEE. Multitud. Computadora. 2016, 15, 2825–2836. [Referencia cruzada]
8. Galati, A. Red tolerante al retraso; LAP Lambert Academic Publishing: Colonia, Alemania, 2010.
9. Luciana, P.; Andrea, P.; Marco, C. Redes oportunistas: reenvío de datos en redes móviles ad hoc desconectadas. IEEE Comunitario. revista 2006, 44, 134-141.
10. Xia, F.; Liu, L.; Li, J.; Mahoma, AA; Tianruo, YL; Jianhua, M. BEEINFO: Reenvío basado en intereses utilizando abeja artificial Colonia para establecer contactos con conciencia social. Traducción IEEE. Veh. Tecnología. 2015, 64, 1188–1200. [Referencia cruzada]
11. Wu, J.; Yu, G.; Guan, P. Método de predicción de probabilidad de característica de interés en redes sociales oportunistas. Acceso IEEE 2019, 7, 59002–59012. [Referencia cruzada]
12. Elnaz, N.; Nahideh, D. FTR: Funciones de enrutamiento basado en árboles en redes sociales móviles. Alambre. Neto. 2020, 26, 283–291.
13. Mao, Y.; Zhou, C.; Qi, J.; Zhu, X. Un mecanismo de incentivo justo basado en créditos para el enrutamiento en una red de sensores basada en DTN con nodos egoísmo. EURASIP J. Wirel. Comunitario. Neto. 2020, 2020, 232. [Referencia cruzada]
14. Loudari, SE; Benamar, N. Efectos del egoísmo en el consumo de energía en redes oportunistas: una evaluación del desempeño. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Tecnologías Inalámbricas, Sistemas Integrados e Inteligentes (WITS) de 2019, Fez (Marruecos), 3 y 4 de abril de 2019; págs. 1–7.
15. Li, Q.; Gao, W.; Zhu, S.; Cao, G. Un protocolo de enrutamiento para redes socialmente egoístas y tolerantes a retrasos. Red ad hoc. 2012, 10, 1619–1632. [Referencia cruzada]
16. Zhang, X.; Deng, H.; Xiong, Z.; Liu, Y.; Rao, Y.; Liu, Y.; Li, Y.; Hou, D.; Li, Y. Estrategia de enrutamiento seguro basada en atributos Confíe en el control de acceso en redes sociales. J. Proceso de Señal. Sistema. 2024, 96, 153–168. [Referencia cruzada]
17. Chang, J.; Pang, Z.; Xu, W.; Wang, H.; Yin, G. Un mecanismo de reputación compatible con incentivos para sistemas P2P. J. Supercomputadora. 2014, 69, 1382–1409. [Referencia cruzada]
18. Roy, A.; Acharya, T.; Das Bit, S. Reenvío de datos con reconocimiento de reputación basado en redes sociales para mejorar la entrega de multidifusión en presencia de nodos egoístas en DTN. En t. J. Común. Sistema. 2020, 33, e4235. [Referencia cruzada]
19. Bounouni, M.; Bouallouche-Medjkoune, L. Esquema de estimulación y castigo basado en reconocimiento para redes móviles ad hoc. J. Supercomputadora. 2018, 74, 5373–5398. [Referencia cruzada]
20. Wang, EK; Chen, CM; Yiu, SM; Hasán, MM; Alrubaian, M.; Fortino, G. Modelo de juego evolutivo de incentivos para oportunistas. redes sociales. Generación del futuro. Computadora. Sistema. 2020, 102, 14-29. [Referencia cruzada]
21. Wu, J.; Mo, W.; Yin, X.; Bai, G. Investigación sobre el mecanismo de incentivo de enrutamiento oportunista basado en juegos repetidos en WMN. Computadora. Ing. Aplica. 2018, 54, 5.
22. Haq, A.; Faheem, Y. Un protocolo de distribución de contenido basado en comunicación de igual a igual para tolerantes a retrasos con reconocimiento de incentivos. redes. Alambre. Neto. 2020, 26, 583–601. [Referencia cruzada]
23. Li, L.; Zhong, X.; Jiang, Y. IAR-GT: Una ruta consciente de incentivos basada en la teoría de juegos para redes oportunistas egoístas. KSII Trans. Inf. Internet. Sistema. 2019, 13, 152-171.

Machine Translated by Google

24. Xiong, Z.; Xiao, N.; Xu, F.; Zhang, X.; Xu, Q.; Zhang, K.; Ye, C. Un esquema de incentivos de reenvío de datos basado en intercambio equivalente para redes con conciencia social. J. Proceso de Señal. Sistema. 2021, 93, 249–263. [Referencia cruzada]
25. Xiong, Z.; Li, X.; Zhang, X.; Zhu, S.; Xu, F.; Zhao, X.; Wu, Y.; Zeng, M. Un algoritmo de incentivos de dos etapas basado en precios de servicios para Redes con conciencia social. J. Proceso de Señal. Sistema. 2022, 94, 1227–1242.
26. Zhang, X.; Rao, Y.; Xiong, Z.; Deng, H.; Xu, F.; Yuan, L. Algoritmo de incentivos socialmente egoísta y con recursos limitados para Redes con conciencia social. J. Proceso de Señal. Sistema. 2023, 95, 1439–1453.
27. Spyropoulos, T.; Psounis, K.; Raghavendra, CS Spray and wait: un esquema de enrutamiento eficiente para redes móviles conectadas de forma intermitente. En Actas del Taller ACM SIGCOMM de 2005 sobre redes tolerantes al retardo, Nueva York, NY, EE.UU., 26 de agosto de 2005; págs. 252-259.
28. Cui, J.; Liu, S.; Chang, Y.; Liu, Q.; Wu, Q. Algoritmo de enrutamiento eficiente basado en transacciones de moneda virtual en DTN. Computadora. Ciencia. 2024, 51, 300–308.
29. Li, X.; Jiang, P.; Chen, T.; Luo, X.; Wen, Q. Una encuesta sobre la seguridad de los sistemas blockchain. Generación del futuro. Computadora. Sistema. 2020, 107, 841–853. [Referencia cruzada]
30. Deng, M.; Liu, Y.; Yang, C.; Xu, F.; Ahmed, M.; Yang, N.; Xu, Z.; Ke, C. Esquema ligero de gestión de confianza basado en Blockchain en sistemas inteligentes de IoT con recursos limitados. IEEE Internet Things J. 2024, 11, 25706–25719. [Referencia cruzada]
31. Matsumoto, S.; Reischuk, RM IKP: Transformar una PKI con incentivos automatizados descentralizados. En Actas del 2017 Simposio IEEE sobre seguridad y privacidad (SP), San José, CA, EE. UU., 22 a 26 de mayo de 2017; págs. 410–426.
32. Él, Y.; Li, H.; Cheng, X.; Liu, Y.; Yang, C.; Sun, L. Un mecanismo de incentivo veraz basado en blockchain para aplicaciones P2P distribuidas. Acceso IEEE 2018, 6, 27324–27335. [Referencia cruzada]
33. Zhang, W.; Wang, H.; Hua, H.; Wang, Q. Minería egoísta y estrategias de defensa en Bitcoin. Intel. Automático. Computación suave. 2022, 34, 1861–1875. [Referencia cruzada]
34. Keränen, A.; Ott, J.; Kärkkäinen, T. El simulador ONE para la evaluación del protocolo DTN. En actas de la Segunda Internacional Conferencia sobre herramientas y técnicas de simulación, Roma (Italia), 2 a 6 de marzo de 2009; ICST: Bruselas, Bélgica, 2010; págs. 1–10.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Implementación FPGA de clasificación de objetos basada en pilares para Robot móvil autónomo

Parque Chaewoon [1], Seongjoo Lee [2,3] y Yunho Jung [1,4,*]

[1] Escuela de Ingeniería Electrónica e Informática, Universidad Aeroespacial de Corea, Goyang-si 10540, República de Corea; pcw0201@kau.kr
[2] Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Sejong, Seúl 05006, República de Corea; seongjoo@sejong.ac.kr
[3] Departamento de Ingeniería de Convergencia de Drones Inteligentes, Universidad Sejong, Seúl 05006, República de Corea
[4] Departamento de Movilidad Aérea Inteligente, Universidad Aeroespacial de Corea, Goyang-si 10540, República de Corea * Correspondencia: yjung@kau.ac .kr; Teléfono: +82-2-300-0133

Resumen: Con el avance de la tecnología de inteligencia artificial, los robots móviles autónomos se han utilizado en diversas aplicaciones. En escenarios de conducción autónoma, la clasificación de objetos es esencial para la navegación del robot. Para realizar esta tarea, se prefieren a los sensores de cámara los sensores de detección y alcance de luz (LiDAR), que pueden obtener información de profundidad y altura y tienen una resolución más alta que los sensores de alcance y detección de radio (radar). El método basado en pilares emplea un codificador de características de pilar (PFE) para codificar nubes de puntos LiDAR 3D en imágenes 2D, lo que permite la inferencia de alta velocidad utilizando redes neuronales convolucionales 2D. Aunque se emplea el método basado en pilares para garantizar la capacidad de respuesta en tiempo real de los sistemas de conducción autónoma, no se están realizando activamente investigaciones sobre la aceleración del PFE, aunque el PFE consume una cantidad significativa de tiempo de cálculo dentro del sistema. Por lo tanto, este artículo propone un acelerador de hardware PFE y un modelo de clasificación de objetos basado en pilares para robots móviles autónomos. El modelo de clasificación de objetos propuesto se entrenó y probó utilizando 2971 conjuntos de datos que comprenden ocho clases, logrando una precisión de clasificación del 94,3%. El acelerador de hardware PFE se implementó en una matriz de puertas programables en campo (FPGA) a través de un diseño de nivel de transferencia de registros, que logró una velocidad 40 veces mayor en comparación con el firmware para la unidad de microprocesador ARM Cortex-A53; La red de clasificación de objetos se implementó en la FPGA utilizando el marco FINN. Al integrar el PFE y la red de clasificación de objetos, implementamos un sistema de aceleración de clasificación de objetos basado en pilares en tiempo real en una FPGA con una latencia de 6,41 ms.

Palabras clave: conjunto de puertas programables en campo; robot móvil autónomo; clasificación de objetos; codificador de funciones de pilar ; FINLANDÉS

check for updates

Cita: Park, C.; Lee, S.; Jung, Y. Implementación FPGA de clasificación de objetos basada en pilares para autónomos Robot móvil. Electrónica 2024, 13, 3035. https://doi.org/10.3390/electrónica13153035

Editor académico: Nicola Lusardi

Recibido: 14 de junio de 2024
Revisado: 29 de julio de 2024
Aceptado: 30 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Los robots móviles autónomos se mueven reconociendo su entorno y realizando tareas físicas realizadas por personas en el pasado. Los avances en visión por computadora, control de robots e inteligencia artificial (IA) han mejorado la capacidad de los robots móviles autónomos para percibir y responder a su entorno. En consecuencia, estos robots se utilizan en varias áreas de la vida humana, incluida la fabricación, el transporte, la atención sanitaria y la vida diaria [1,2]. La clasificación de objetos es esencial para que los robots móviles autónomos identifiquen objetos y planifiquen rutas de viaje [3].

Se han utilizado varios tipos de sensores, como cámaras y sensores de radiodetección y alcance (radar), para percibir el entorno circundante en situaciones de conducción autónoma. Los sensores de la cámara no pueden obtener información de profundidad, lo que hace imposible determinar con precisión la distancia a un objeto, lo que puede provocar problemas graves cuando los dos objetos se superponen [4]. Además, los sensores de la cámara son sensibles al brillo y tienen un alcance limitado.

Machine Translated by Google

campo de visión, lo que resulta en limitaciones operativas [3]. Los sensores de radar no pueden determinar la información de altura de los objetos y tienen una resolución de ángulos muy baja, lo que impide la observación precisa de los objetos [5]. Por el contrario, las nubes de puntos adquiridas por sensores de detección y alcance de luz (LiDAR) contienen información de coordenadas físicas 3D que permite la adquisición de información de profundidad y altura de los objetos. Además, existen menos limitaciones operativas y la alta resolución permite una observación precisa de los objetos [3]. Por tanto, para la conducción autónoma se prefiere el uso de nubes de puntos adquiridas por sensores LiDAR .

Hay varios algoritmos de aprendizaje profundo disponibles para procesar nubes de puntos. MVCNN [6] proyecta una nube de puntos en múltiples direcciones y clasifica objetos utilizando una red neuronal convolucional (CNN) basada en las imágenes proyectadas. Aunque utiliza un método simple para convertir datos 3D en imágenes 2D y utiliza una CNN, se produce pérdida de información durante el proceso de proyección [7]. PointNet [8] es una red invariante de permutación diseñada utilizando una función de simetría para manejar conjuntos de puntos desordenados. VoxelNet [9] codifica características vóxel por vóxel utilizando PointNet y realiza inferencias utilizando una red de propuesta de región. Debido a que la inferencia se basa en una CNN 3D, se requiere un tiempo de inferencia prolongado de 225 ms [10]. SEGUNDO [11] logró una velocidad de inferencia mejorada de 50 ms aplicando una CNN escasa a VoxelNet, pero la complejidad del cálculo de la CNN 3D siguió siendo alta. PointPillars [12] propuso un método basado en pilares para codificar nubes de puntos 3D en imágenes 2D. A diferencia de MVCNN, que sólo utiliza información del elemento más alto, el método basado en pilares utiliza información de todos los puntos dentro del pilar. La realización de una inferencia 2D basada en CNN en una imagen codificada permite que los métodos basados en pilares logren una inferencia de alta velocidad y un rendimiento excelente [13-16].

Los robots móviles autónomos deben tener tiempo de respuesta en tiempo real para evitar accidentes físicos. Bajo estas limitaciones, ejecutar métodos basados en pilares basados en unidades de microprocesador (MPU) requiere mucho tiempo [17]. Las unidades de procesamiento gráfico (GPU) pueden acelerar la inferencia basada en CNN 2D; sin embargo, el uso de GPU en dispositivos perimetrales es ineficiente en términos de consumo de energía [18]. Por tanto, las refs. [19-21] implementaron un acelerador de hardware para métodos basados en pilares utilizando una matriz de puertas programables en campo (FPGA). Sin embargo, en [19] se calculó un codificador de características de pilar (PFE) en una MPU , que requirió 71,2 ms y representó el 19% del tiempo total de respuesta. De manera similar, se calculó un PFE en una MPU en 9,51 ms en [20], que fue el 22% del tiempo total de respuesta. Además, una parte del PFE se aceleró en [21], lo que requirió 37,7 ms para el cálculo, lo que representó el 59% del tiempo total de respuesta. Debido a que el PFE ocupa una parte importante del tiempo de respuesta general del método basado en pilares, resulta útil un acelerador de

El método basado en pilares puede realizar inferencias sobre una imagen codificada por el PFE con una red basada en una CNN separable en profundidad (DSCNN). El DSCNN utilizado en [22-24] ha sido ampliamente adoptado en modelos CNN recientes debido a su bajo costo de cálculo y número de parámetros. Debido a estas ventajas, las DSCNN se utilizan a menudo en aplicaciones con recursos limitados o sensibles a la latencia [25]. Además, a pesar de su baja complejidad , han demostrado un rendimiento exitoso en modelos de clasificación de imágenes al mejorar la eficiencia representacional [26].

En este estudio, proponemos un modelo eficiente de clasificación de objetos basado en pilares para robots móviles autónomos que utilizan un PFE y DSCNN, logrando una precisión de clasificación del 94,3% mediante entrenamiento y validación con conjuntos de datos adquiridos utilizando Ouster OS1-32 [27]. Además , proponemos un sistema de aceleración basado en FPGA para la operación en tiempo real del modelo de clasificación de objetos propuesto. El sistema de aceleración propuesto comprende un acelerador PFE y un acelerador de red de clasificación. Diseñamos el acelerador PFE para lograr un tiempo de cálculo de 0,23 ms y confirmamos un rendimiento de aceleración 40 veces mayor en comparación con la MPU. Se implementó un acelerador de red de clasificación en una FPGA utilizando FINN. Para la operación en entornos de borde, implementamos el sistema de aceleración propuesto en una FPGA y confirmamos un tiempo de respuesta en tiempo real de 6,41 ms.

El resto de este trabajo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 proporciona una descripción general del sistema de aceleración propuesto, incluida la clasificación basada en PFE y DSCNN.

Machine Translated by Google

redes, conjunto de datos utilizado, configuración del modelo y resultados de la evaluación. El diseño del sistema de aceleración propuesto se describe en la Sección 3. La Sección 4 presenta la implementación resultados y efectos de aceleración. Finalmente, la Sección 5 concluye el estudio.

2. Sistema propuesto

La Figura 1 muestra una descripción general del sistema de aceleración propuesto. La nube de puntos La entrada al sistema es codificada en una imagen por el PFE a través de tres pasos: (a) convertir la nube de puntos en un conjunto de unidades de pilares, (b) agregar características hechas a mano (HCF) y (c) expandiendo las características a través de convolución puntual (PW), comprimiéndolas a través de un operación max-pool, y dispersándolos de nuevo a su posición original en el plano x-y para generar una imagen. Luego, la imagen generada se introduce en una red de clasificación para clasificar los objetos. La red de clasificación comprende una red basada en DSCNN.

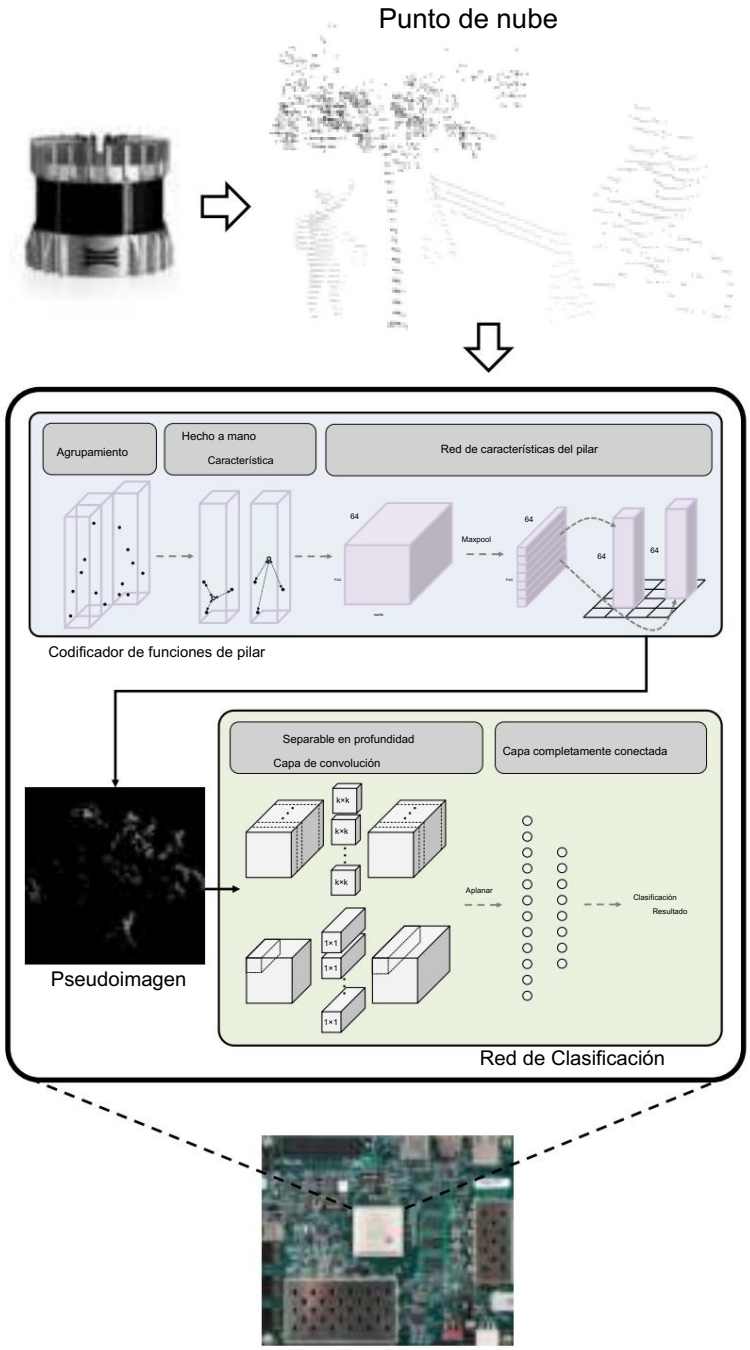


Figura 1. Descripción general del sistema de aceleración propuesto.

Machine Translated by Google

2.1. PFE

En [12] se propuso el PFE, que codifica nubes de puntos 3D en imágenes 2D para permitir la inferencia 2D basada en CNN . Primero, se genera una cuadrícula discretizando el plano x-y , y luego la nube de puntos se convierte en un conjunto de unidades de pilares. El conjunto de nubes de puntos g está definido por la ecuación (1).

$$gramo = [p1 , p2 ,. . . Pi , . . . páginas] \quad (1)$$

Establecemos g como un conjunto de pi , donde P es el número máximo de pilares que contienen puntos. Establecemos pi como se define en la ecuación (2).

$$pi = [n1, n2, . . . ni , . . . nN] \quad (2)$$

Establecemos pi como un conjunto de nj , donde N es el número máximo de puntos que puede contener un pilar. El conjunto nj se define como en la Ecuación (3).

$$ni = [x, y, z, r] \quad (3)$$

El conjunto nj comprende las coordenadas x, y, z y los valores de reflectividad de los puntos. Finalmente, la nube de puntos está representada por un tensor de tamaño (P, N, 4), donde P y N son hiperparámetros. Si el número de puntos en un pilar es mayor o igual a N, se utiliza muestreo aleatorio ; si es menor que N, se utiliza relleno cero.

Después de convertir la nube de puntos en un conjunto de unidades de pilares, se agrega un HCF al conjunto nj . El HCF comprende las diferencias xm, ym , zm entre las coordenadas medias aritméticas de los puntos dentro del pilar y las coordenadas x, y, z de cada punto, y las diferencias xc, yc entre las coordenadas centrales del pilar y las coordenadas x, y coordenadas de cada punto. La configuración de nj con el HCF adjunto viene dada por la ecuación (4).

$$ni = [x, y, z,r, xm, ym, zm, xc, yc] \quad (4)$$

Un tensor de tamaño (P, N, 9) con un HCF agregado se somete a convolución PW, normalización por lotes y una capa ReLU para transformarlo en un tensor de tamaño (P, N, 64). Posteriormente, se aplica la agrupación máxima a lo largo de la segunda dimensión para producir un tensor de tamaño (P, 64).
Finalmente, cada pilar se distribuye nuevamente al plano x–y original , completando los datos de la imagen 2D con 64 canales.

2.2. Red de clasificación

La red de clasificación propuesta se basa en la DSCNN. La Figura 2 muestra cómo funciona DSCNN. El DSCNN comprende los métodos en profundidad (DW) y PW. En DW, la cantidad de canales en la imagen de entrada, filtros y canales en la imagen de salida son los mismos. Cada filtro tiene solo un canal y realiza una operación de convolución en solo un canal en la imagen de entrada para crear una imagen de salida de un canal. Por ejemplo, en la convolución DW que se muestra en la Figura 2, a un canal de la imagen de entrada, separado por una línea discontinua, se le realiza una operación de convolución con un filtro para producir un canal de la imagen de salida, también separado por una línea discontinua. Sea iC el número de canales en la imagen de entrada y oC el número de canales en la imagen de salida; PW utiliza filtros oC de tamaño 1 × 1 con canales iC . Cada filtro realiza una operación de convolución en todos los canales de la imagen de entrada para crear un canal de la imagen de salida. Por ejemplo, en la convolución PW que se muestra en la Figura 2, un píxel de la imagen de entrada, separado por una línea discontinua, completa un píxel de la imagen de salida, separado por una línea discontinua, aplicando todos los filtros en la operación de convolución.

Machine Translated by Google

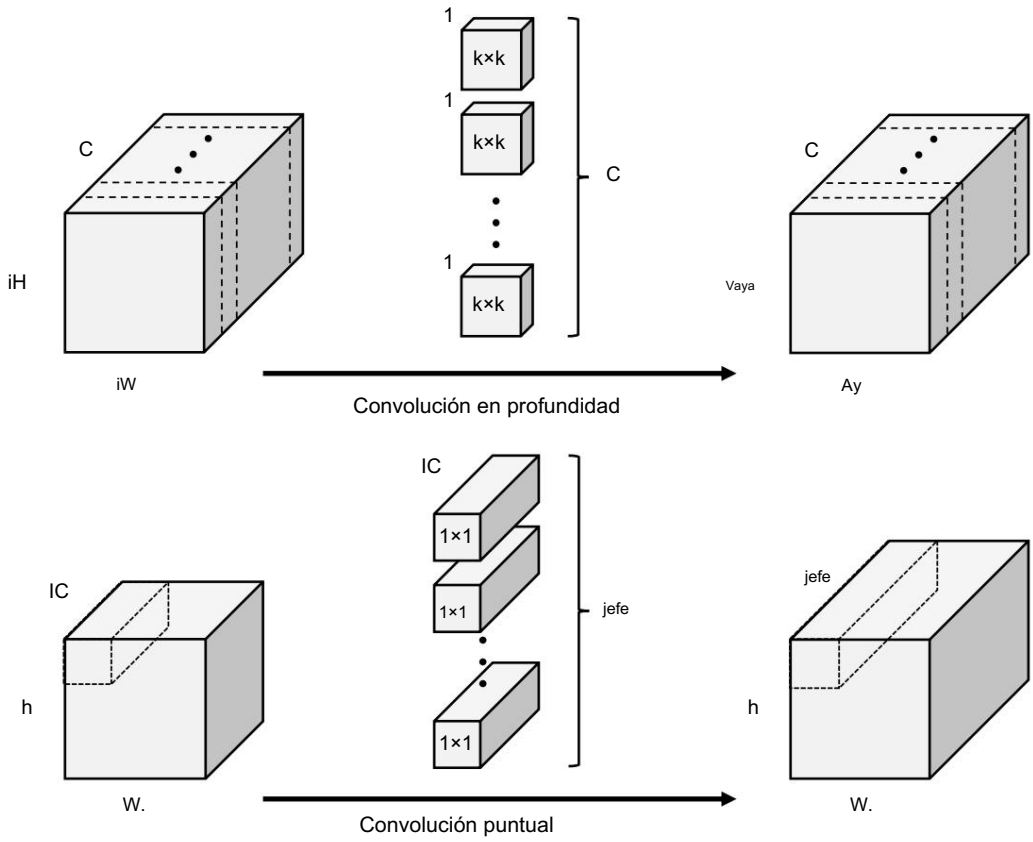
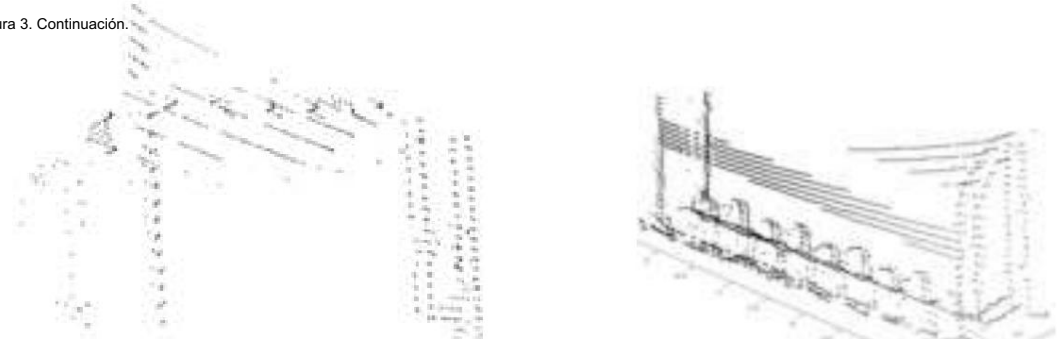


Figura 2. Mecanismo de operación de DSCNN.

2.3. Conjunto de datos

Para entrenar el modelo de clasificación de objetos propuesto, obtuvimos nubes de puntos utilizando un sensor Ouster OS1-32. La Figura 3 ilustra ejemplos de un conjunto de datos que comprende objetos que normalmente encuentran los robots móviles autónomos en sus entornos de conducción. Para mejorar la calidad del entrenamiento, aumentamos el conjunto de datos utilizando muestras del conjunto de datos nuScenes [28] . El conjunto de datos incluye clases como edificio, árbol, vehículo, bicicleta, obstáculo, vegetación , persona y elemento urbano (farola, portabicicletas, semáforo, etc.), como se muestra en la Figura 4, que muestra la configuración de el conjunto de datos. De un total de 2971 puntos de datos, 2617 se utilizaron para entrenamiento y 354 para validación.

Figura 3. Continuación.



Machine Translated by Google

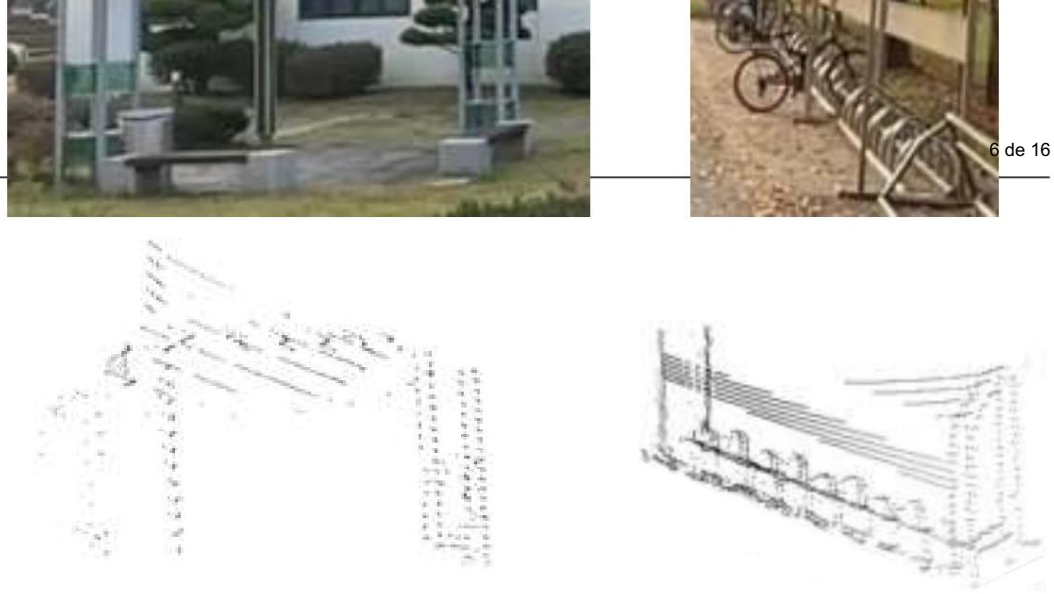


Figura 3. Ejemplos de conjuntos de datos.

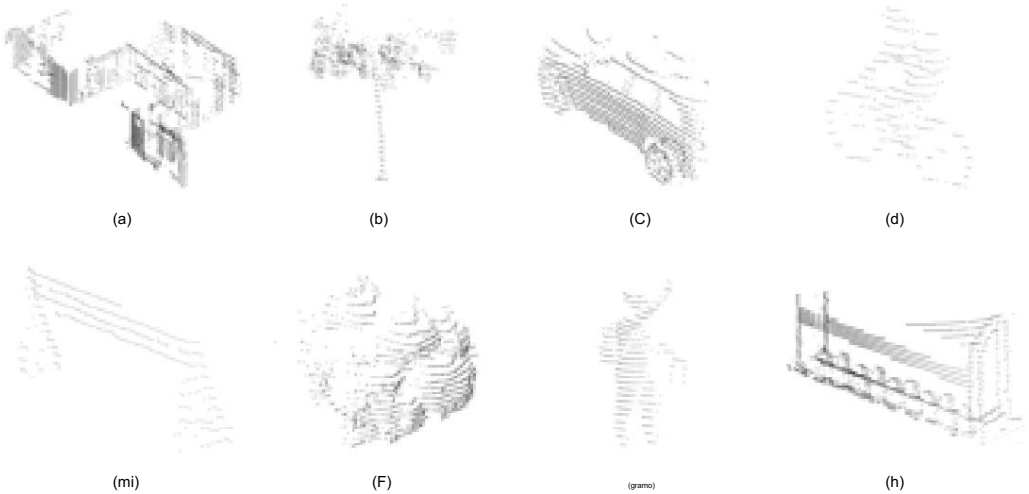


Figura 4. Configuración de clases de conjuntos de datos: (a) edificio; (b) árbol; c) vehículo; d) bicicleta; (e) obstáculo; f) zonas verdes; g) persona; h) equipamiento urbano.

2.4. Evaluación del desempeño

En el PFE, el tamaño de la imagen, el número de pilares y el número de puntos por pilar son hiperparámetros que influyen significativamente tanto en el rendimiento como en la complejidad del modelo. El tamaño de la imagen determina la resolución y las dimensiones de la imagen codificada. Un tamaño de imagen mayor da como resultado imágenes de mayor resolución; sin embargo, también aumenta la Demanda computacional de la CNN. Del mismo modo, aumentar el número de pilares y puntos por pilar permite capturar información más detallada desde la nube de puntos. Sin embargo, Esto también aumenta la carga computacional del PFE debido al mayor número de cálculos necesarios para procesar una mayor cantidad de datos. Así, encontrar un equilibrio La combinación de estos hiperparámetros es crucial para lograr un alto rendimiento y Cálculo eficiente en modelos de clasificación de objetos basados en pilares.

La Figura 5 ilustra las arquitecturas de las redes utilizadas para la evaluación del desempeño , todas las cuales se basaron en DSCNN. La Tabla 1 presenta las precisiones correspondientes. a varios hiperparámetros y estructuras de red, con la precisión general sirviendo como una métrica de evaluación para la clasificación de objetos. Entrenamos 300 épocas con un tamaño de lote de 16, y los resultados de las épocas de mejor desempeño se presentan en la Tabla 1. El entrenamiento se realizó con una tasa de aprendizaje de 0,001 y una tasa de disminución de peso de 0,0001. Primero, Se observó que las Redes 1 y 5 exhibieron un rendimiento menor que las Redes 2, 3, y 4. Entre las Redes 2, 3 y 4, la Red 4 destaca por su desempeño equilibrado, demostrando una precisión comparable a las Redes 2 y 3, al tiempo que cuenta con una menor complejidad computacional y menos parámetros. Además, el tamaño de imagen de 128 × 128 exhibido desempeño sobresaliente, mientras que el desempeño fue comparable cuando el número de pilares fueron 1024 y 512. El mejor desempeño se logró cuando 16 puntos estaban dentro

Machine Translated by Google

cada pilar. En consecuencia, el modelo de clasificación de objetos propuesto adoptó un tamaño de imagen de 128×128, 512 pilares, y 16 puntos dentro de cada pilar, con la red de clasificación estructurado según la Red 4.

Tabla 1. Precisión del modelo según varios hiperparámetros y redes.

Hiperparámetro			Red				
Tamaño de la imagen	Número de pilares	Número de Puntos por pilar	1	2	3	4	5
256 × 256	2048	32	91,8%	93,5%	93,5%	92,9%	89,7%
		dieciséis	92,9%	92,9%	92,4%	92,4%	88,0%
		8	92,9%	92,9%	92,9%	92,4%	89,7%
	1024	32	92,4%	92,4%	91,8%	92,9%	89,1%
		dieciséis	92,4%	92,9%	92,4%	92,9%	90,2%
		8	93,5%	93,5%	92,4%	92,4%	89,7%
	512	32	92,4%	92,9%	93,5%	93,5%	89,7%
		dieciséis	92,9%	94,0%	92,4%	93,5%	89,7%
		8	94,6%	92,9%	92,4%	91,8%	90,8%
128 × 128	1024	32	90,8%	91,8%	92,4%	94,6%	90,8%
		dieciséis	90,8%	94,6%	92,9%	92,4%	91,3%
		8	90,8%	91,8%	91,8%	94,0%	91,8%
	512	32	90,8%	94,0%	91,8%	93,5%	92,4%
		dieciséis	91,3%	92,9%	93,5%	94,6%	92,9%
		8	90,8%	93,5%	91,8%	92,9%	92,4%
	256	32	91,8%	93,5%	92,9%	91,8%	90,8%
		dieciséis	90,8%	92,9%	92,4%	91,3%	90,8%
		8	90,8%	94,0%	94,0%	92,4%	91,3%
64 × 64	512	32	89,7%	89,7%	92,9%	91,8%	91,3%
		dieciséis	88,6%	90,2%	93,5%	91,8%	91,8%
		8	88,6%	90,8%	92,9%	92,4%	92,4%
	256	32	88,6%	90,2%	93,5%	90,8%	90,8%
		dieciséis	87,5%	89,7%	93,5%	91,8%	91,8%
		8	87,5%	90,8%	93,5%	91,8%	90,8%
	128	32	88,6%	89,1%	89,7%	90,8%	89,7%
		dieciséis	89,1%	90,2%	91,3%	90,2%	90,8%
		8	86,4%	92,4%	91,3%	89,1%	91,8%

La Tabla 2 presenta una comparación de desempeño entre la red de clasificación propuesta y las otras redes de clasificación en este estudio. La clasificación propuesta La red logró la precisión de clasificación más alta del 94,6% según DSCNN, con un pequeño número de operaciones de acumulación múltiple (MAC) de 37 M y un pequeño número de parámetros de 50,8 K.

Machine Translated by Google

Tabla 2. Comparación de rendimiento con otras redes.

Red	Exactitud	Número de MAC	Número de parámetros
Lenet	92,2%	787,6 millones	2,0 millones
ResNet18	83,8%	1,4 gramos	11,4 millones
ResNet34	82,3%	2,0 gramos	21,5 millones
red móvil	85,7%	128,3 millones	3,2 millones
Nuestro	94,6%	37,0 millones	50,8 kilos

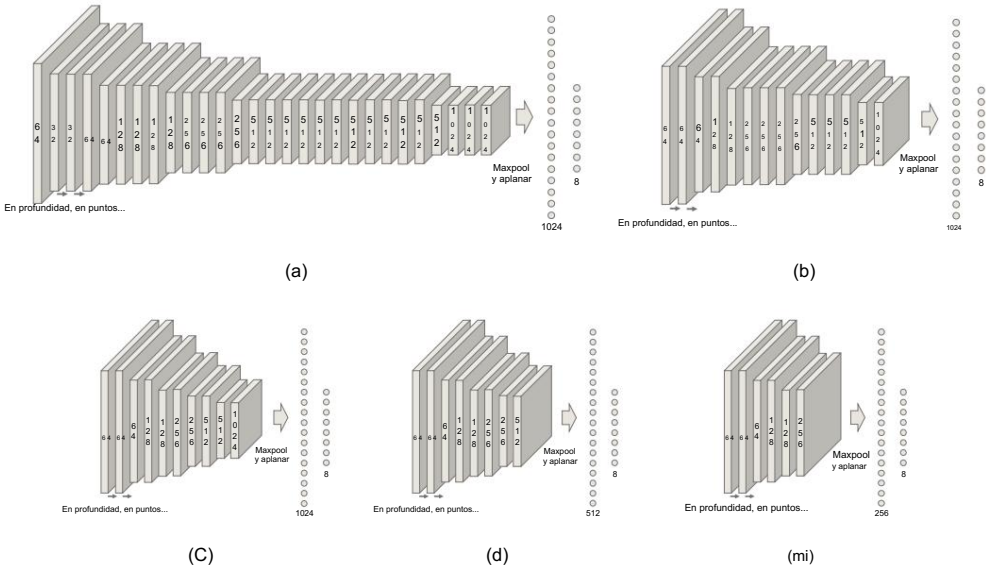


Figura 5. Arquitectura de la red de clasificación de objetos basada en DSCNN: (a) Red 1; b) Red 2; c) Red 3; d) Red 4; (e) Red 5.

3. Implementación del Sistema de Aceleración

El sistema de aceleración propuesto se implementó en una FPGA integrando la propiedad intelectual (IP) del acelerador de hardware de PFE y la IP del acelerador de hardware de red de clasificación con una MPU. La sección 3.1 presenta el ancho de bits de cada IP obtenido mediante experimentos de cuantificación. La Sección 3.2 describe la estructura y operaciones del sistema de aceleración propuesto. La Sección 3.3 describe la estructura y el comportamiento del acelerador de hardware PFE, y la Sección 3.4 describe el FINN utilizado para implementar el acelerador de hardware de red de clasificación de objetos.

3.1. Cuantización

En este estudio, cuantificamos el modelo de clasificación de objetos propuesto para implementar el sistema de aceleración propuesto en el hardware. Para minimizar la reducción del rendimiento debido a los errores causados por la cuantificación, realizamos un entrenamiento consciente de la cuantificación (QAT). Los resultados de los experimentos que utilizan diferentes formatos de bits para el PFE y las redes de clasificación se enumeran en la Tabla 3. El PFE es más preciso con 16 y 32 bits que con 8 bits, pero no hay diferencia en la precisión entre 16 y 32 bits. Por lo tanto, decidimos utilizar un formato de 16 bits para el PFE. La red de clasificación de objetos mostró mayor precisión con 4 y 8 bits, pero no hubo diferencia en el rendimiento; por lo tanto, utilizamos 4 bits.

Machine Translated by Google

Tabla 3. Precisión según formato de bits de PFE y redes de clasificación.

PFE	Red de Clasificación		
	2	4	8
8	90,3%	91,7%	92,3%
dieciséis	89,7%	94,3%	94,3%
32	88,7%	92,7%	94,3%

3.2. Arquitectura del sistema

La Figura 6 muestra la estructura del sistema de aceleración propuesto. Para validar el sistema en un entorno FPGA, los aceleradores se integraron con una MPU a través de un Interconexión de interfaz extensible avanzada (AXI) e implementada en una FPGA. Cada IP del acelerador es esclava de la MPU, y la MPU envía las direcciones DRAM de inicio y fin que la IP a la que accederá, el número de palabras a leer de la DRAM, los parámetros del protocolo AXI, y señales de inicio y parada a los registros esclavos del IP. La IP actúa como maestra de DRAM, Generar direcciones de lectura y escritura a través de su interfaz maestra para recuperar los datos requeridos. de la DRAM durante el cálculo y escribe los resultados en la DRAM.

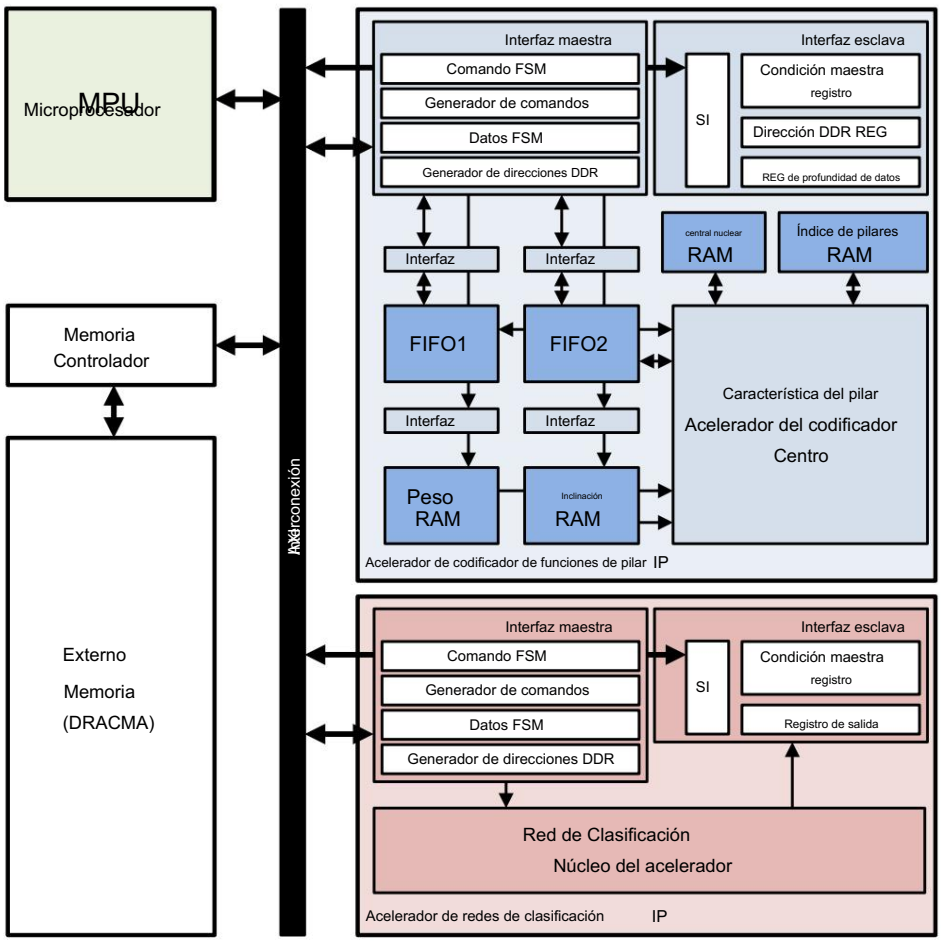


Figura 6. Arquitectura del sistema de aceleración propuesto en FPGA.

La MPU primero configura el registro esclavo de la IP del acelerador PFE, que comienza leyendo la nube de puntos desde DRAM a través de la interfaz maestra para organizar la nube de puntos en pilares. El acelerador PFE comprueba las coordenadas de la nube de puntos y almacena el punto. nube en FIFO1 uno tras otro. Para almacenar la nube de puntos en DRAM pilar por pilar, es genera las direcciones DRAM y las almacena en FIFO2. Cuando todas las direcciones DRAM

Machine Translated by Google

para la nube de puntos se generan y almacenan en FIFO2, la interfaz maestra hace referencia a FIFO1 y FIFO2 para almacenar la nube de puntos en una ubicación adecuada en DRAM.

El acelerador PFE organiza toda la nube de puntos en pilares almacenándola adecuadamente en DRAM, y luego lee la nube de puntos y la almacena en FIFO1 y FIFO2. También lee los pesos y sesgos para realizar la convolución PW desde DRAM y los almacena en la memoria de peso (WM) y la memoria de sesgo (BM). Después de agregar el HCF a la nube de puntos, se realiza una convolución PW para expandir las entidades y se realiza una operación de grupo máximo . Por lo tanto, un pilar está codificado con 64 características, que es un píxel con 64 canales en una imagen 2D. El píxel codificado se almacena en DRAM considerando su posición.

Después de que el acelerador PFE codifica todas las nubes de puntos en imágenes 2D, la MPU establece el registro esclavo de la IP del acelerador de la red de clasificación e inicia el acelerador para leer imágenes de DRAM a través de la interfaz maestra. Después de que el acelerador de la red de clasificación haya leído todas las imágenes y haya realizado todos los cálculos, escribe los resultados de la clasificación en el registro esclavo. La MPU completa la operación del sistema accediendo al registro esclavo de la IP del acelerador de la red de clasificación y leyendo los resultados de la clasificación.

3.3. Arquitectura de hardware PFE

La Figura 7 muestra un diagrama de bloques del acelerador PFE. El acelerador PFE propuesto comprende una unidad de agrupación (GU), una unidad HCF (HU), una unidad PFN (PU) y ocho memorias. Las memorias son FIFO1, FIFO2, buffer de número de puntos por pilar (NPPP) (NB), buffer de índice de pilar (PB), buffer1 HCF (HB1), HB2, WM y BM. HB1 y HB2 son utilizados en un esquema de ping-pong por HU y PU dentro de una estructura de tuberías. Mientras la HU opera, escribe los resultados en HB1, mientras que la PU accede simultáneamente a los datos de HB2. Posteriormente, la HU pasa a escribir los resultados del cálculo en HB2, mientras que la PU utiliza los datos almacenados en HB1 durante esta fase.

Las nubes de puntos se almacenan en orden FIFO1 y el localizador de cuadrícula en la GU verifica las coordenadas de los puntos para obtener las coordenadas de los pilares que contienen los puntos. Por ejemplo, si el ancho de una celda de la cuadrícula es un valor entero de 25, el pilar, las coordenadas del que contiene un punto se puede determinar dividiendo las coordenadas del punto por 25, la operación de . Este división se reemplaza por una operación de desplazamiento a la derecha de 5 bits. Las coordenadas de los pilares se utilizan como dirección de lectura del NB para determinar el NPPP. Si el NPPP es 0, se crea un nuevo pilar; por lo tanto, el contador del pilar se incrementa en uno y el valor se escribe en el PB para usarlo como índice del pilar. Si el NPPP es inferior a 16, se incrementa en 1 y se vuelve a escribir en el NB; de lo contrario, permanece sin cambios. La dirección se genera utilizando el índice del pilar multiplicado por 16 (el NPPP máximo) como compensación y luego sumando el NPPP a esta compensación. La dirección generada se almacena en FIFO2. Con la nube de puntos en FIFO1 y la dirección DRAM en FIFO2, la nube de puntos se almacena en la ubicación correcta en DRAM.

Después de que todas las nubes de puntos se almacenen en DRAM en los pilares, se vuelven a leer en FIFO1 y FIFO2. En FIFO2, la dirección de escritura de DRAM se almacena durante la operación de agrupación, mientras que los datos de lectura de DRAM se almacenan en otros momentos. Luego, el acelerador PFE realiza cálculos en todas las nubes de puntos en forma de pilares. La unidad promediadora (AU) del HU suma las coordenadas x, y y z de todos los puntos del pilar y se divide por el NPPP para obtener las coordenadas medias aritméticas de los puntos. La unidad de desplazamiento en la HU calcula xm, ym , zm restando las coordenadas centrales de los puntos obtenidos de la AU de las coordenadas x, y, z de cada punto, y xc, yc restando las coordenadas centrales del pilar de las Coordenadas x, y de cada punto. Los x, y, z, r, xm, ym , zm, xc, yc de los puntos con el HCF agregado se almacenan en el HB.

Machine Translated by Google

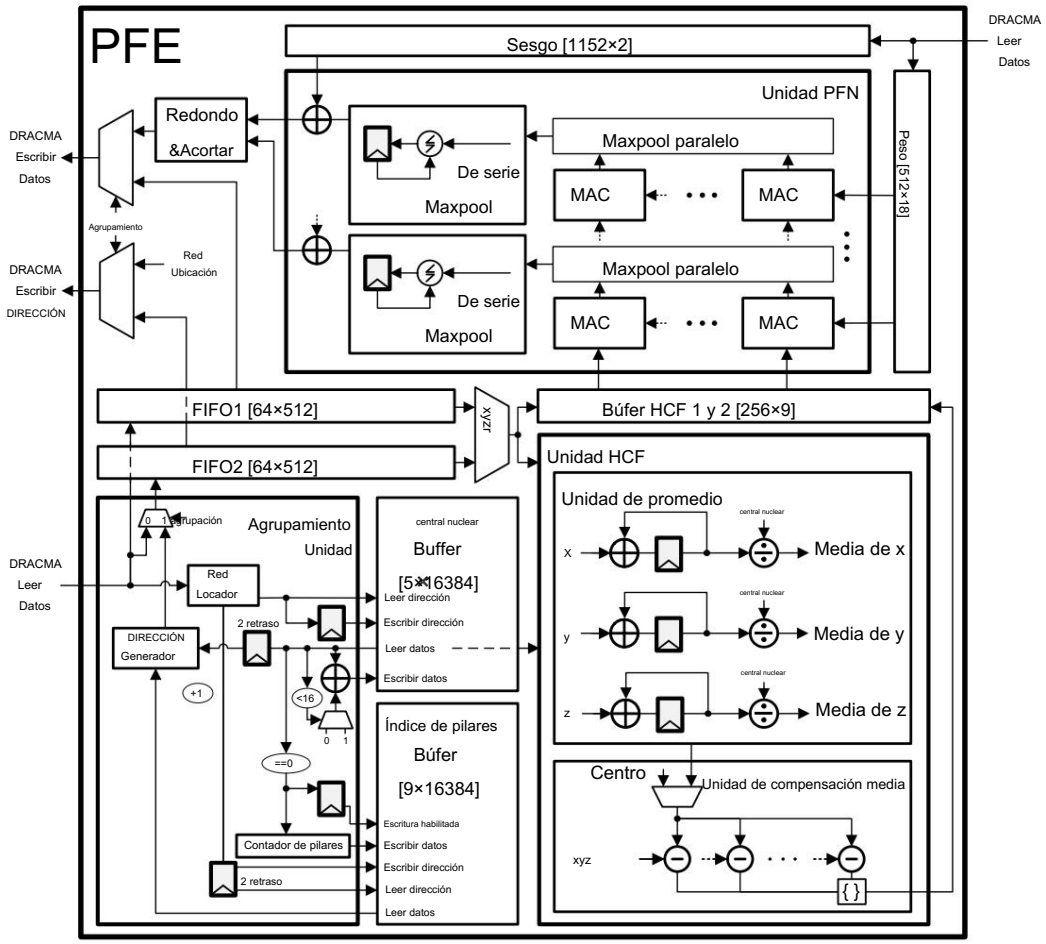


Figura 7. Diagrama de bloques del acelerador PFE.

La Figura 8a muestra la operación a nivel de tensor realizada por la PU. La PU ejecuta operaciones de convolución PW, normalización por lotes, grupo máximo y ReLU en el HCF. Los pesos y sesgos de la normalización por lotes se pueden combinar con los de la capa de convolución PW. En la convolución PW, solo se utilizan los pesos y los sesgos se agregan después de una operación ReLU sesgada, que establece valores umbral en -bias en lugar de 0.

La Figura 8b representa la operación de la Figura 8a a nivel de matriz. La PU realiza la multiplicación de la matriz HCF de tamaño (16, 9) y la matriz de peso de tamaño (9, 64) utilizando una matriz MAC de 8 × 32. Para ello, se divide la matriz HCF en dos matrices de tamaño (8, 9), y la matriz de peso se divide en dos matrices de tamaño (9, 64), realizando toda la multiplicación de matrices en cuatro partes. Por ejemplo, la multiplicación matricial del mosaico HCF 2 y el mosaico de peso 1 produce el mosaico de resultado 2, y estos mosaicos se agrupan al máximo para crear el mosaico 1 con agrupación máxima.

La Figura 8c ilustra el funcionamiento a nivel de hardware de la PU en orden cronológico. La PU lee el mosaico 1 de HCF y el mosaico de peso 1 de HB y WM, respectivamente. La PU lee el mosaico HCF 1 columna por columna y pesa el mosaico 1 fila por fila durante 9 ciclos, introduciéndolos en la matriz MAC. La matriz MAC procesa el HCF y las entradas de peso durante 9 ciclos y genera el mosaico de resultados 1 de tamaño (8, 32). Luego, la unidad paralela de grupo máximo procesa el mosaico de resultado 1 para realizar operaciones de grupo máximo, produciendo el mosaico intermedio 1 de tamaño (1, 32). Debido a que la unidad paralela max-pool realiza inmediatamente operaciones max-pool en la salida de la matriz MAC, ahorra ciclos y espacio de memoria intermedia al no almacenar ni recargar el mosaico de resultado El mosaico intermedio 1 se compara con el valor de polarización en la unidad de grupo máximo en serie y el valor mayor se almacena en el registro. Al realizar operaciones ReLU sesgadas en la unidad serial max-pool, la operación ReLU podría integrarse en la operación max-pool. Después de crear la loseta intermedia 1, la PU lee HCF la loseta 2 y pondera la loseta 1 para producir la loseta intermedia.

Machine Translated by Google

2. El mosaico intermedio 2 se somete a operaciones de grupo máximo con el mosaico intermedio 1 almacenado en el registro de la unidad de grupo máximo en serie, lo que da como resultado el mosaico 1 de grupo máximo. El mosaico 1 de grupo máximo tiene medio píxel cuando se agrega, se redondea y se recorta el sesgo. . Este medio píxel se almacena en la ubicación correcta en DRAM según sus coordenadas en la imagen. Para crear la dirección de escritura DRAM, la coordenada x del píxel multiplicada por el ancho de la imagen se utiliza como desplazamiento y la coordenada y se agrega a este desplazamiento. Cuando la PU ha creado los mosaicos 1 y 2 con agrupación máxima , hay un píxel completo en la DRAM.

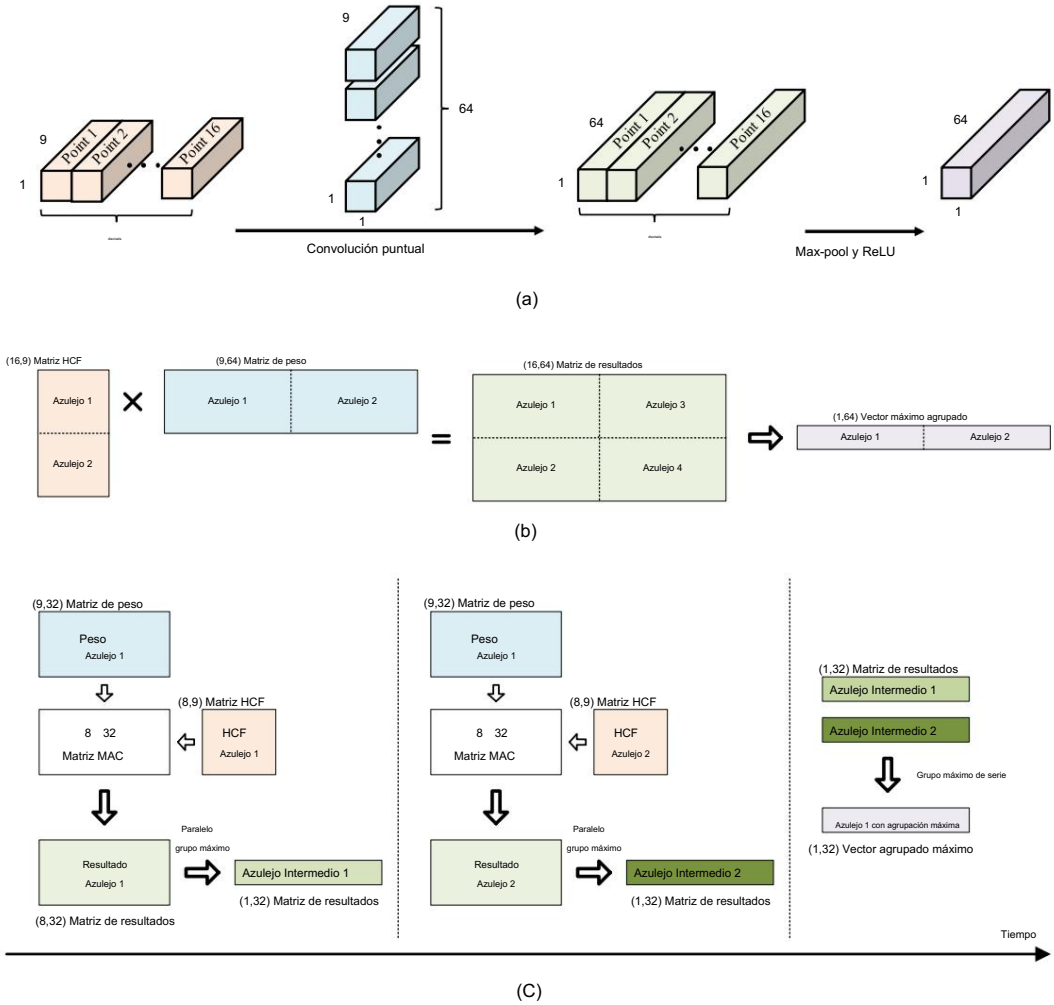


Figura 8. Operación de la PU: (a) operación a nivel de tensor; (b) operación a nivel de matriz; (c) operación a nivel de hardware.

3.4. Acelerador de redes de clasificación con FINN

Xilinx ofrece varias herramientas para implementar redes de aprendizaje profundo. Vitis AI es una plataforma utilizada para implementar y optimizar aplicaciones de inteligencia artificial y aprendizaje automático en FPGA y plataformas de sistema en chip adaptativos. Vitis AI admite varios marcos y bibliotecas de inteligencia artificial y aprendizaje automático, y genera una IP de unidad de procesamiento de aprendizaje profundo (DPU). FINN es un marco de código abierto para la inferencia de redes de aprendizaje profundo cuantificado basado en FPGA. FINN utiliza un modelo de intercambio de red neuronal abierta como entrada, optimiza la red y genera un acelerador de hard

En este estudio, utilizamos FINN para implementar una versión de hardware de una red de clasificación de objetos. Mientras que la DPU sirve como un acelerador de propósito general para operaciones de aprendizaje profundo , FINN optimiza la arquitectura del hardware y el flujo de datos específicamente para la red de aprendizaje profundo. En consecuencia, FINN ofrece una latencia más baja, permite velocidades de respuesta en tiempo real y puede lograr un alto rendimiento optimizando la canalización

Machine Translated by Google

Los trabajos de baja complejidad, como la red de clasificación propuesta, pueden reducir el uso de recursos de hardware. Además, FINN admite números enteros de 4 bits, lo que proporciona una ventaja sobre las DPU. Aprovechando los beneficios de FINN, ref. [19] implementó una columna vertebral capa de PointPillars usando FINN.

4. Resultados de la implementación

El sistema de aceleración propuesto se implementó en un Xilinx Zynq Ultrascale+ ZCU104 [30]. La Tabla 4 resume el uso de recursos de hardware y la frecuencia operativa. del sistema de aceleración propuesto. El sistema de aceleración propuesto utilizó 75,548 tablas de búsqueda (LUT) de bloques lógicos configurables (CLB), 56,931 registros CLB, 374 señales digitales procesadores (DSP) y RAM de 65 bloques. La frecuencia de funcionamiento fue de 187,5 MHz, lo que permite la operación de alta velocidad y el tiempo de respuesta de la clasificación de objetos propuesta sistema fue de 6,41 ms.

Tabla 4. Recursos de hardware del sistema de clasificación de objetos propuesto.

Unidad	CLB LUT	CLB Registros	DSP	Bloquear RAM	Frecuencia (Megahercio)
PFE	35.567	28.513	302	10.5	
Red de Clasificación	34.788	21.625	72	54,5	
Interconexión AXI	5193	6793	0	0	
Total	75.548	56.931	374	—	187,5

La Tabla 5 compara los tiempos de respuesta de la implementación de PFE basada en firmware en un ARM Cortex A53 (línea de base) que funciona a 1,2 GHz y el hardware PFE propuesto acelerador (propuesto) en términos del tiempo de ejecución de cada operación. la agrupacion operación, responsable de convertir una nube de puntos en un conjunto de unidades de pilares, experimentado una notable aceleración de 23,67 veces, reduciéndose de 0,71 ms a 0,03 ms. Notablemente, el Las operaciones de HCF y PFN lograron una aceleración significativa de aproximadamente 42,6 veces, disminuyendo de 8,52 ms a 0,20 ms. Esta notable aceleración fue posible aprovechando el capacidad de cálculo paralelo de la matriz MAC en el acelerador PFE y la tubería estructura de las operaciones HCF y PFN. El tiempo total de ejecución de las operaciones de ZFP se redujo de 9,23 ms a 0,23 ms, lo que demuestra un efecto de aceleración 40 veces mayor en comparación con la implementación basada en firmware.

Tabla 5. Comparación del tiempo de respuesta de PFE con el valor inicial.

Operación	Línea de base (firmware)	Propuesto (hardware)
Agrupamiento	0,71 ms	0,03 ms
HCF	0,20 ms	0,20 ms
PFN	8,32 ms	
Total	9,23 ms	0,23 ms

La Tabla 6 presenta una comparación entre el sistema de clasificación de objetos propuesto y métodos basados en pilares implementados en estudios anteriores. En [19-21], un sistema heterogéneo entre la MPU y la FPGA, mientras que nuestro sistema representa una implementación de hardware de extremo a extremo de todas las operaciones en una FPGA. En [19], cálculo de PFE se realizó en una MPU y el cálculo de la red de aprendizaje profundo se ejecutó utilizando un acelerador implementado a través de FINN. Árbitro. [20] calcularon el PFE en una MPU y ejecutó una red de aprendizaje profundo en un acelerador implementado mediante una transferencia de registros Diseño de niveles (RTL). Árbitro. [21] utilizaron tanto una MPU como una DPU para el cálculo de PFE, y una DPU para computación de redes de aprendizaje profundo. Calculamos el PFE con un acelerador.

Machine Translated by Google

implementado a través de un diseño RTL y una red de aprendizaje profundo con un acelerador implementado a través de FINN.

Nuestro método logró el tiempo de respuesta más rápido de 6,41 ms, porque era el único uno que aceleró el PFE, y se diseñó el modelo de clasificación de objetos propuesto tener baja complejidad computacional a través de varios experimentos. Es más, estos Los experimentos dieron como resultado un modelo de clasificación de objetos con menos parámetros. Nuestro método utilizó más DSP que en [19], pero significativamente menos LUT, registros y memoria. Árbitro. [19] utilizó la misma plataforma FPGA dirigida a entornos de borde que la nuestra, la ZCU104, logrando un bajo consumo de energía. Sin embargo, todavía consumía más energía que el nuestro. que implementó una red eficiente de aprendizaje profundo. En comparación con el método de [20], Nuestro método utilizó menos recursos en todos los ámbitos, con diferencias particularmente notables en DSP y uso de memoria. Árbitro. [20] también consumió poca energía al implementar un sistema eficiente Red de aprendizaje profundo. Además, desde la ref. [20] diseñó la red de aprendizaje profundo acelerador en el nivel RTL, consumía incluso menos energía que el nuestro, que fue diseñado basado en HLS. Además, nuestro método utilizó más LUT pero menos registros y DSP, y sustancialmente menos BRAM y URAM que en [21]. Además, nuestro método consumió significativamente menos energía que en [21]. Árbitro. [21] utilizó la plataforma FPGA U280 dirigidos a entornos de servidores, que tenían un consumo de energía mucho mayor y no son Adecuado para entornos de borde.

Tabla 6. Comparación con otras implementaciones basadas en pilares.

	[19]	[20]	[21]	Nuestro
Plataforma	ZCU104	ZC706	U280	ZCU104
Cálculo Dispositivo	MPU y FPGA (FINLANDÉS)	MPU y FPGA (RTL)	MPU y FPGA (DPU)	FPGA (RTL y FINN)
Ejecución Tiempo (ms)	377.1	43.26	64.1	6.41
LUT CLB	189.074	128,721	48.006	75.548
Registros CLB	150,187	111,118	85.801	56.931
DSP	88	883	525	374
Bloquear RAM	159	382,5	131,5	[illegible]
Ultra RAM	-	-	64	1
Frecuencia (MHz)	150	150	300	187,5
Potencia (W)	6.5	3.6	73,8	4.4

5. Conclusiones

En este estudio, proponemos un modelo de clasificación de objetos de aprendizaje profundo basado en un Método basado en pilares para respuestas en tiempo real de robots móviles autónomos. El objeto La red de clasificación del modelo de aprendizaje profundo se basa en DSCNN, que tiene un baja complejidad y pocos parámetros, lo que lo hace adecuado para entornos de dispositivos periféricos. El modelo de clasificación de objetos se entrenó utilizando un conjunto de datos que consideró el funcionamiento Entorno de robots móviles autónomos. Para minimizar la reducción de rendimiento debida Para la cuantificación, cuantificamos y probamos el modelo usando QAT, logrando una clasificación precisión del 94,3%. Debido a que el cálculo del PFE en modelos de clasificación de objetos basados en pilares consumía mucho tiempo, propusimos un acelerador de hardware para el PFE. El El acelerador PFE se implementó mediante diseño RTL y logró un tiempo de respuesta de 0,23 ms, que era 40 veces más rápido que el programa de firmware. El acelerador del objeto. La red de clasificación del modelo de aprendizaje profundo propuesto se implementó a través de la FINN framework y logró un tiempo de ejecución de 6,18 ms. También propusimos un objeto. Sistema de clasificación que integra el acelerador PFE propuesto y la clasificación de objetos. acelerador de red a través de una interconexión AXI. El sistema de clasificación de objetos propuesto.

Machine Translated by Google

se implementó y verificó en una FPGA y logró un tiempo de respuesta en tiempo real de 6,41 ms.

El acelerador PFE propuesto se puede combinar con otros aceleradores de redes de aprendizaje profundo para acelerar modelos de aprendizaje profundo más diversos. Sin embargo, en este estudio, solo realizamos aceleración en los modelos de clasificación de objetos. En trabajos futuros, planeamos implementar un sistema que admita la aceleración de modelos de aprendizaje profundo más diversos y desafiantes.

Contribuciones del autor: CP diseñó e implementó el sistema de aceleración propuesto, realizó el experimento y la evaluación, y escribió el artículo. SL evaluó el sistema de aceleración propuesto y revisó este manuscrito. YJ concibió y dirigió la investigación, analizó los resultados experimentales y redactó el artículo. Todos los autores leyeron y aceptaron la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Este trabajo fue apoyado por la subvención del Instituto de Planificación y Evaluación de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (IITP) financiada por el gobierno coreano (MSIT) (No. 2022-0-00960), y las herramientas CAD fueron respaldadas por IDEC.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: No aplicable.

Declaración de Consentimiento Informado: No aplicable.

Declaración de disponibilidad de datos: conjunto de datos disponible a pedido de los autores.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Varlamov, O. “Cerebros” para robots: aplicación de los sistemas expertos Mivar para la implementación de sistemas inteligentes autónomos Robots. Res. de Big Data 2021, 25, 100241. [Referencia cruzada]
2. Liu, Y.; Li, Z.; Liu, H.; Kan, Z. Aprendizaje por transferencia de habilidades para robots autónomos y cooperación entre humanos y robots: una encuesta. Robot. Auton. Sistema. 2020, 128, 103515. [Referencia cruzada]
3. Yoshioka, M.; Suganuma, N.; Yoneda, K.; Aldibaja, M. Clasificación de objetos en tiempo real para vehículos autónomos mediante LIDAR. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Informática Inteligente y Ciencias Biomédicas (ICIIBMS) de 2017, Okinawa, Japón, 24 a 26 de noviembre de 2017; págs. 210-211.
4. Gao, H.; Cheng, B.; Wang, J.; Li, K.; Zhao, J.; Li, D. Clasificación de objetos utilizando Fusion of Vision y LIDAR basado en CNN en Entorno de vehículos autónomos. Traducción IEEE. Indiana Informar. 2018, 14, 4224–4231. [Referencia cruzada]
5. Zhou, Y.; Liu, L.; Zhao, H.; López-Benítez, M.; Yu, L.; Yue, Y. Hacia la percepción de radar profundo para la conducción autónoma: conjuntos de datos, Métodos y desafíos. Sensores 2022, 22, 4208. [CrossRef] [PubMed]
6. Su, H.; Maji, S.; Kalogerakis, E.; Learned-Miller, E. Redes neuronales convolucionales de múltiples vistas para el reconocimiento de formas 3D. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE sobre Visión por Computadora, Santiago, Chile, 7 a 13 de diciembre de 2015; págs. 945–953.
7. Hoang, L.; Lee, SH; Lee, EJ; Kwon, KR GSV-NET: una red multimodal de aprendizaje profundo para la clasificación de nubes de puntos 3D. Aplica. Ciencia. 2022, 12, 483. [Referencia cruzada]
8. Qi, CR; Su, H.; Mo, K.; Guibas, LJ Pointnet: Aprendizaje profundo sobre conjuntos de puntos para clasificación y segmentación 3D. En Actas de la Conferencia IEEE sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Honolulu, Hawaii, EE. UU., 21 a 26 de julio de 2017; págs. 652–660.
9. Zhou, Y.; Tuzel, O. Voxelnet: Aprendizaje de un extremo a otro para la detección de objetos 3D basada en nubes de puntos. En Actas de la Conferencia IEEE sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Salt Lake City, UT, EE. UU., 18 a 22 de junio de 2018; págs. 4490–4499.
10. Bhanushali, D.; Relyea, R.; Manghi, K.; Vashist, A.; Hochgraf, C.; Ganguly, A.; Kwasinski, A.; Kuhl, ME; Ptucha, R. Cámara LiDAR Fusión para la detección de objetos 3D. Electrón. Imágenes 2020, 32, 1–9. [Referencia cruzada]
11. Yan, Y.; Mao, Y.; Li, B. Segundo: Detección convolucional escasamente integrada. Sensores 2018, 18, 3337. [CrossRef] [PubMed]
12. Lang, AH; Vora, S.; César, H.; Zhou, L.; Yang, J.; Beijbom, O. Pointpillars: Codificadores rápidos para la detección de objetos a partir de nubes de puntos. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Long Beach, CA, EE. UU., 15 a 20 de junio de 2019; págs. 12697-12705.
13. Lis, K.; Kryjak, T. Selección del tipo de columna vertebral de PointPillars para una detección de objetos LiDAR rápida y precisa. En actas de la Conferencia internacional sobre gráficos y visión por computadora, Varsovia (Polonia), 19 a 21 de septiembre de 2022; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2022; págs. 99-119.
14. Shu, X.; Zhang, L. Investigación sobre el algoritmo PointPillars basado en una red troncal con funciones mejoradas. Electrónica 2024, 13, 1233. [Referencia cruzada]
15. Wang, Y.; Han, X.; Wei, X.; Luo, J. Frustum-PointPillars de segmentación de instancias: un algoritmo de fusión liviano para cámara: percepción LiDAR en conducción autónoma. Matemáticas 2024, 12, 153. [CrossRef]
16. Agashe, P.; Lavanya, R. Detección de objetos utilizando PointPillars con DarkNet53 modificado como columna vertebral. En Actas de la 20.ª Conferencia Internacional del Consejo de la India (INDICON) del IEEE de 2023, Hyderabad, India, 14 a 17 de diciembre de 2023; págs. 114-119.

Machine Translated by Google

17. Choi, Y.; Kim, B.; Kim, análisis de rendimiento de software de PointPillars en plataformas CPU y GPU. En Actas de la 36.ª Conferencia Técnica Internacional sobre Circuitos/Sistemas, Computadoras y Comunicaciones (ITC-CSCC) de 2021, Jeju, República de Corea, 27 a 30 de junio de 2021; págs. 1–4.

18. Silva, A.; Fernández, D.; Nevoa, R.; Monteiro, J.; Novais, P.; Girón, P.; Alfonso, T.; Melo-Pinto, P. Inferencia integrada con recursos limitados de detección y localización de objetos 3D en nubes de puntos dirigidas a aplicaciones de conducción autónoma. Sensores 2021, 21, 7933. [Referencia cruzada] [PubMed]

19. Stanisz, J.; Lis, K.; Gorgon, M. Implementación de la red Pointpillars para la detección de objetos 3D en reprogramables Dispositivos heterogéneos que utilizan FINN. J. Proceso de Señal. Sistema. 2022, 94, 659–674. [Referencia cruzada]

20. Li, Y.; Zhang, Y.; Lai, R. TinyPillarNet: Red basada en diminutos pilares para la detección de objetos de nubes de puntos 3D en el borde. Traducción IEEE. Sistema de circuitos. Tecnología de vídeo. 2023, 34, 1772–1785. [Referencia cruzada]

21. Latotzke, C.; Kloeker, A.; Schoening, S.; Kemper, F.; Slimi, M.; Eckstein, L.; Gemmeke, T. Aceleración basada en FPGA del procesamiento y detección de nubes de puntos Lidar en el borde. En Actas del Simposio sobre vehículos inteligentes (IV) del IEEE de 2023, Anchorage, Alaska, EE. UU., 4 a 7 de junio de 2023; págs. 1–8.

22. Tan, M.; Le, Q. Efficientnet: Repensar el escalado de modelos para redes neuronales convolucionales. En Actas de la Internacional Jornada sobre Aprendizaje Automático. PMLR, Long Beach, CA, EE. UU., 9 a 15 de junio de 2019; págs. 6105–6114.

23. Chollet, F. Xception: aprendizaje profundo con convoluciones separables en profundidad. En Actas de la Conferencia IEEE sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Honolulu, Hawaii, EE. UU., 21 a 26 de julio de 2017; págs. 1251-1258.

24. Howard, AG; Zhu, M.; Chen, B.; Kalenichenko, D.; Wang, W.; Weyand, T.; Andreetto, M.; Adam, H. Mobilenets: redes neuronales convolucionales eficientes para aplicaciones de visión móvil. arXiv 2017, arXiv:1704.04861.

25. Lu, G.; Zhang, W.; Wang, Z. Optimización de operaciones de convolución separables en profundidad en GPU. Traducción IEEE. Distribución paralela. Sistema. 2021, 33, 70–87. [Referencia cruzada]

26. Káiser, L.; Gómez, AN; Chollet, F. Convoluciones separables en profundidad para traducción automática neuronal. arXiv 2017, arXiv:1706.03059.

27. Derrocamiento. Sensor Lidar Ouster OS1. Disponible en línea: https://ouster.com/products/hardware/os1-lidar-sensor (consultado el 22 mayo de 2024).

28. César, H.; Bankiti, V.; Lang, AH; Vora, S.; León, VE; Xu, Q.; Krishnan, A.; Pan, Y.; Baldán, G.; Beijbom, O. nuscenes: un conjunto de datos multimodal para la conducción autónoma. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Seattle, WA, EE. UU., 14 a 19 de junio de 2020; págs. 11621-11631.

29. Preguntas frecuentes sobre la documentación de Xilinx Inc. Vitis™ AI. Disponible en línea : https://xilinx.github.io/Vitis-AI/3.0/html/docs/reference/faq.html#what-is-the-difference-between-the-vitis-ai-integrated-development-environment -y-el- flujo-de-trabajo-finn (consultado el 22 de mayo de 2024).

30. DMAE. UltraSclae+ ZCU104. Disponible en línea: https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/zcu104.html (consultado el 22 mayo de 2024).

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Swin-Fake: un aprendizaje de coherencia basado en transformadores Detector de vídeos falsos

Liang Yu Gong *,†,‡ , Xue Jun Li *,†,‡ y Peter Han Joo Chong †

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Tecnológica de Auckland, Auckland 1010, Nueva Zelanda; peter.chong@aut.ac.nz *
Correspondencia: liangyu.gong@autuni.ac.nz (LYG); xuejun.li@aut.ac.nz (XJL)
† Dirección actual: 6 Saint Paul Street, Auckland 1010, Nueva Zelanda.
‡ Estos autores contribuyeron igualmente a este trabajo.

Resumen: Deepfake se ha convertido en los últimos años en una tecnología emergente que afecta a la ciberseguridad con sus aplicaciones ilegales . La mayoría de los detectores de deepfake utilizan modelos basados en CNN, como Xception Network, para distinguir medios reales o falsos; sin embargo, su desempeño en conjuntos de datos cruzados no es ideal porque sufren de sobreajuste en la etapa actual. Por lo tanto, este artículo propone un método de aprendizaje de consistencia espacial para aliviar este problema en tres aspectos. En primer lugar, aumentamos la selección de métodos de aumento de datos a 5, que es más que los métodos de aumento de datos de nuestro estudio anterior. Específicamente, capturamos varios cuadros de video iguales de un video y seleccionamos aleatoriamente cinco aumentos de datos diferentes para obtener diferentes vistas de datos para enriquecer la variedad de entrada. En segundo lugar, elegimos Swin Transformer como extractor de funciones en lugar de una red troncal basada en CNN, lo que significa que nuestro enfoque no lo utilizó para tareas posteriores y pudo codificar estos datos utilizando un Swin Transformer de extremo a extremo, con el objetivo de aprender el correlación entre diferentes parches de imágenes. Finalmente, esto se combinó con el aprendizaje de consistencia en nuestro estudio, y el aprendizaje de consistencia pudo determinar más relaciones de datos que la clasificación supervisada. Exploramos la consistencia de las características de los cuadros de video calculando su distancia coseno y aplicamos la pérdida de entropía cruzada tradicional para regular esta pérdida de clasificación. Amplios experimentos en conjuntos de datos y entre conjuntos de datos demostraron que Swin-Fake podría producir resultados relativamente buenos en algunos conjuntos de datos deepfake de código abierto, incluidos FaceForensics++, DFDC, Celeb-DF y FaceShifter. Al comparar nuestro modelo con varios modelos de referencia, nuestro enfoque muestra una solidez relativamente fuerte en la detección de medios d

Palabras clave: aprendizaje de consistencia; Transformador giratorio; pérdida de consistencia; detección de deepfake

check for updates

Cita: Gong, LY; Li, XJ; Chong, PHJ Swin-Fake: un detector de video deepfake basado en transformador de aprendizaje de consistencia. Electrónica 2024, 13, 3045. https://doi.org/10.3390/electrónica13153045

Editores académicos: Petia Georgieva, Krasimir Tonchev y Ágata manolova

Recibido: 1 de julio de 2024
Revisado: 26 de julio de 2024
Aceptado: 29 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.
Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

La generación y detección de deepfake siguieron desarrollándose en un juego de atacante-defensor de 2019 a 2021; sin embargo, con el rápido desarrollo de los métodos basados en GAN [1,2] y los modelos de difusión (DM) [3], las poderosas capacidades generativas de estos modelos con posprocesamiento avanzado, como la combinación de colores, hacen que las caras sintéticas parezcan más realist
Por lo tanto, hoy en día es más difícil distinguir la autenticidad de un solo cuadro de video con ojos humanos en un video deepfake.

Aunque los detectores basados en redes neuronales convolucionales (CNN) [4–6] han tenido un efecto notable en el trabajo de clasificación de deepfake, todavía dependen en gran medida de los datos de entrenamiento, lo que resulta en una caída de la precisión o del área bajo la curva (AUC). considerablemente en experimentos con conjuntos de datos cruzados. Así, en los últimos años, los detectores de deepfake tienden a diseñarse como métodos de aprendizaje de coherencia para explorar la coherencia espacial o temporal, la autoconsistencia o la inconsistencia entre representaciones o parches. Además, se ha demostrado que Vision Transformers [7,8] tiene aplicaciones sólidas, especialmente en la clasificación de imágenes. Los detectores de deepfake basados en transformadores se están generalizando en este campo debido a sus mecanismos de atención únicos que pueden aplicarse para ge

Machine Translated by Google

características temporales. En comparación con otros Vision Transformers [9,10], Swin Transformer puede mejorar considerablemente el rendimiento de clasificación estableciendo mecanismos de partición de ventana, cambio cíclico y polarización de posición relativa.

En este artículo, propusimos un marco de aprendizaje de coherencia simple que utiliza Swin Transformer [11] como extractor de funciones para extraer y aprender explícitamente la coherencia entre fotogramas de vídeo capturados. En comparación con los detectores de deepfake tradicionales, nuestro enfoque también contiene un bloque de preprocesamiento de datos y un modelo principal para la extracción de características, pero nuestra pérdida combina la consistencia de los fotogramas y la pérdida de clasificación. En cuanto al trabajo de preprocesamiento de datos, dividimos un video en varios cuadros como grupo para clasificar videos deepfake, que pueden considerarse como una técnica de conjunto. A diferencia de otras técnicas de aprendizaje conjunto, enriquecimos la extracción de características para ayudar al modelo a aprender diferentes características de falsificación con métodos de aumento de datos aleatorios y diferentes. Además, los detectores tradicionales de deepfake siempre utilizan algunos métodos de aumento de datos sin cambios, como la transformación básica y la normalización; sin embargo, para nuestro bloque de preprocesamiento de datos, elegimos múltiples métodos avanzados de aumento de datos para aumentar la aleatoriedad de la mejora de datos y demostrar que no importa cuánto se mejoren los datos, la misma categoría de datos se puede mantener con buena coherencia. Como se muestra en la Figura 1, cada video se dividió equitativamente en fotogramas para garantizar que el área facial se distribuya uniformemente a lo largo de la duración del video. Nuestro bloque de preprocesamiento de datos también contiene múltiples aumentos de datos y se aplica aleatoriamente en cada cuadro capturado para enriquecer diferentes entradas. Luego, un codificador compartido basado en Transformer extrae representaciones y calcula la similitud de pares haciendo combinaciones para formar pérdida de consistencia. Finalmente, un clasificador supervisado asigna la etiqueta para cada característica del marco extraída.

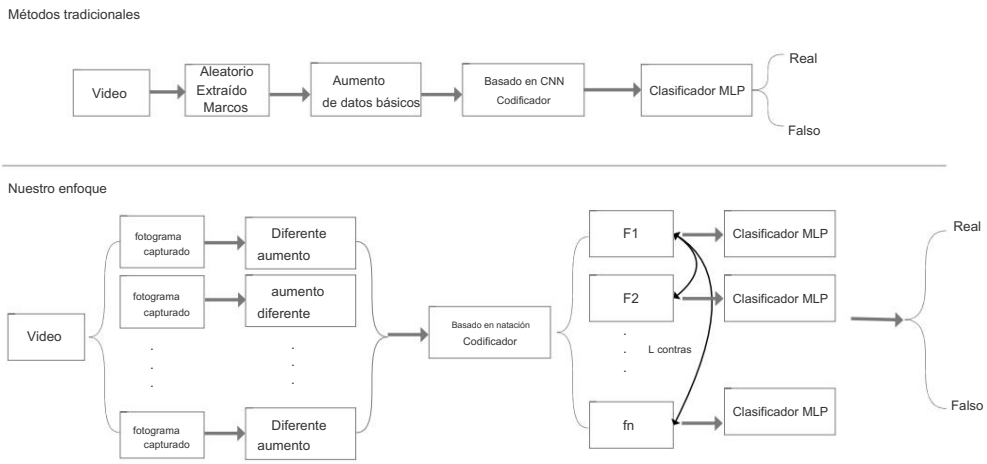


Figura 1. Ilustración del marco Swin-Fake comparado con el marco tradicional del detector de vídeo deepfake.

Hay tres mejoras principales en nuestro método en comparación con los detectores tradicionales de deepfake: (1) Utilizamos cinco métodos de aumento de datos, incluida la transformación de base, el borrado aleatorio [12], el aumento aleatorio, el recorte aleatorio y DFDC Selim [13], que se aplican aleatoriamente. , y evitarán en gran medida el sobreajuste en la etapa de entrada. (2) Se elige Swin Transformer como codificador, que combinará las correlaciones entre diferentes parches de imágenes divididas. (3) La pérdida total final está determinada por dos componentes, que son la pérdida de consistencia y la pérdida de entropía cruzada, y la decisión está garantizada por el aprendizaje de consistencia.

2. Trabajo relacionado

2.1. Detección de deepfake

La detección de deepfake siempre se define como una clasificación binaria o un trabajo de clasificación de clases múltiples porque esencialmente requiere que el modelo distinga los medios como reales o falsos. El marco más popular es utilizar Vanilla Xception [14] o ResNet [15] como columna vertebral.

Machine Translated by Google

codificar y luego combinar el aprendizaje contrastivo o explorar la coherencia de las representaciones. Capsule Network [4] es una red liviana eficaz que puede resolver problemas de "gráficos inversos" y propone un algoritmo de enrutamiento dinámico para reagrupar las características extraídas. CORE [16] es un método de aprendizaje de coherencia basado en Xception Network que mejora la cantidad de aumentos de datos para demostrar la coherencia del modelo. Youtu-Lab [17] propuso una arquitectura de aprendizaje de doble contraste para distinguir la autenticidad de las caras utilizando también diferentes aumentos de datos. Los detectores de deepfake de aprendizaje conjunto también podrían mejorar significativamente el rendimiento de la clasificación y se han aplicado ampliamente en investigaciones recientes; por ejemplo, Zhang [18] propuso un método de aprendizaje de conjuntos de características heterogéneas para extraer primero características de gradiente de gris, características de espectro y características de textura de las imágenes, y luego integrarlas en un vector de características de conjunto mediante un proceso de aplanamiento . Utilizando DeepfakeStack, los autores de [19] optaron por combinar varios modelos de clasificación deepfake de última generación para crear un clasificador compuesto mejorado que podría alcanzar una precisión del 99,65% en algunos conjuntos de datos deepfake. Sin embargo, nuestro método propuesto, Swin-Fake, tiene como objetivo explorar la capacidad de Swin Transformer para extraer características falsificadas, como el ruido PRNU y la falta de coincidencia de límites, y luego extraer diferentes fotogramas de un vídeo para demostrar la coherencia del modelo en el proceso de clasificación utilizando diferentes au

2.2. Swin Transformer

Swin Transformer [11] es un transformador de visión jerárquico que mejora los bloques de atención de múltiples cabezas (MSA) a la atención de ventanas de múltiples cabezas (W-MSA) y los bloques de atención de ventanas desplazadas de múltiples cabezas (SW-MSA). Superpone diferentes tamaños de funciones mediante la configuración de diferentes tamaños de ventanas, lo cual es diferente del Vision Transformer tradicional [7], y podría ahorrar más en costos informáticos que el Vision Transformer tradicional. Normalmente, la imagen de entrada tiene un tamaño de 3 × 3 × 224 y el tamaño de la característica de salida es 7 × 7 × 768. Este marco contiene una capa de porción de parche, una capa de incrustación lineal y doce bloques Swin Transformer para extraer características, y las características son correlacionado con diferentes incrustaciones de parches. Esta estructura de red puede simular de manera más efectiva la sensación de coherencia e inconsistencia de diferentes parches cuando los ojos humanos observan y escanean diferentes áreas faciales deepfake. Además, investigamos artículos existentes relacionados con detectores deepfake basados en Transformer y, sorprendentemente, descubrimos que no hay muchos artículos centrados en el aprendizaje de consistencia espacial con una columna vertebral de Transformer. La mayoría de ellos se esfuerzan más en diseñar bloques de extracción de características temporales para obtener más información de coherencia temporal. Recientemente, Ilyas et al. [20] propuso un AVNet para detectar medios audiovisuales utilizando Swin Transformer, y Khalid [21] propuso utilizar Swin Y-Net para la detección de deepfake.

2.3. Aumento de datos En

el campo de la visión por computadora, es importante aplicar el aumento de datos, que es la primera etapa para prevenir el sobreajuste y un método eficaz para aumentar la cantidad de datos.
En este artículo, solo utilizamos cinco métodos de manipulación de imágenes para cambiar los valores y las posiciones de los píxeles. La transformación de base se emplea para combinar la normalización y el cambio de tamaño de píxeles. El borrado aleatorio [12] es una transformación de datos recortados que selecciona aleatoriamente un bloque rectangular del área facial y cambia su color a totalmente negro. Recorte aleatorio se utiliza para recortar el área facial en una proporción aleatoria y luego cambiar su tamaño a una altura y ancho específicos. DFDC Selim es un aumento de datos complejo que contiene ruido gaussiano, desenfoque gaussiano, cambio aleatorio y escala, y ya ha demostrado ser el aumento de datos más útil en el trabajo de clasificación de deepfake [16]. El aumento aleatorio selecciona aleatoriamente Borrado aleatorio, Volteado horizontal aleatorio o Recorte de cambio de tamaño aleatorio. En comparación con el diseño de los detectores de deepfake tradicionales, hemos mejorado drásticamente la diversidad y aleatoriedad de los datos de entrada, y se pueden utilizar para la verificación posterior de la similitud entre diferentes cuadros de video de un clip de video.

Machine Translated by Google

3. Métodos propuestos En

este trabajo, describimos el proceso del detector de imágenes deepfake y lo dividimos en cuatro partes: preprocesamiento de datos (incluida la detección facial, recorte y aumento de datos), extracción de características, cálculo de consistencia y predicción a través de clasificadores. Como se muestra en la Figura 2, primero capturamos igualmente los cuadros de un video detectado y seleccionamos y aplicamos aleatoriamente aumentos de datos para crear diferentes vistas de datos. Después de extraer las características a través de Swin Transformer, calculamos por separado las distancias de coseno entre representaciones en combinaciones y restamos la distancia de coseno media como una pérdida de consistencia (cons Para evitar el problema de las clases desequilibradas, combinamos videos reales de otras bases de datos en nuestro conjunto de capacitación, lo cual es muy importante para una evaluación posterior; Además, también elegimos muestrear los fotogramas de vídeo reales; por ejemplo, si cada vídeo falso se divide en ocho fotogramas, el fotograma del vídeo real se divide en 16 o 32, respectivamente.

Esto podría evitar en gran medida que el resultado previsto del modelo entrenado permanezca en la misma clase.

Algoritmo 1 El flujo de trabajo de Swin-Fake Input: El

transformador Swin previamente entrenado: f(x); secuencias de vídeo: X Divida
equitativamente cada vídeo en M fotogramas.
Facial Recorte y amplíe el ancho y el alto para obtener imágenes faciales.
Seleccione aleatoriamente métodos de aumento de datos para evitar el sobreajuste.
para i = 1 a M, utilice
secuencias de entrada X para agrupar el conjunto.
Calcule la puntuación de atención entre diferentes incrustaciones de parches divididos.
Calcule f(x) mediante propagación hacia adelante para obtener características 2-D Fx. 2 Calcule la distancia del
coseno LCos entre C pares utilizando la ecuación (3).

$$LCons = \sum_{METRO} \frac{1}{METRO} \quad {}^{METRO}_{1} \text{ media (LCos)}$$

Utilice una capa lineal para proyectar Fx en 2 clases.

$$LCE = - \sum \quad {}^{norte}_{1} [y \log(p) + (1 - y)\log(1 - p)]$$

$$Ltot = \alpha LCons + (1 - \alpha)LCE$$

Realiza la propagación hacia atrás y guarda los gradientes para cada capa. Fin de la
salida: un
modelo Swin-Fake entrenado f(x).

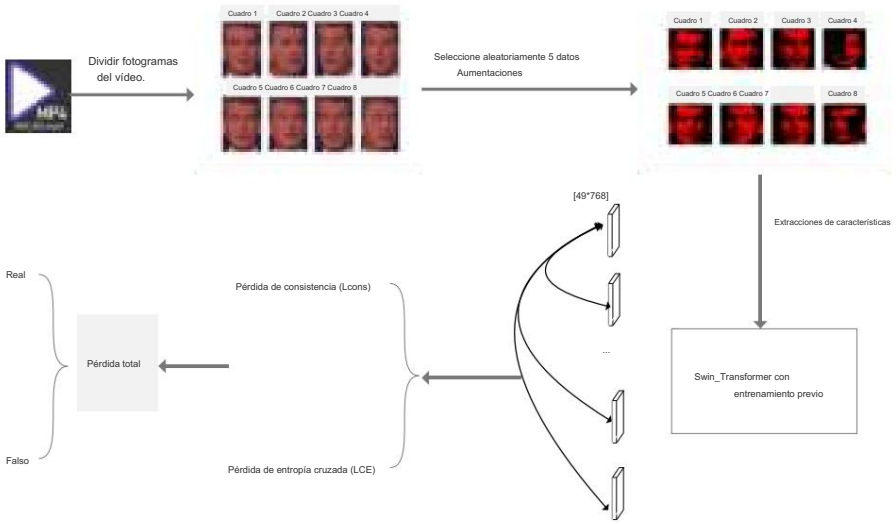


Figura 2. Explicación de la arquitectura Swin-Fake. Primero dividimos M cuadros de un video y aplicamos diferentes aumentos de datos para cada cuadro. Luego, se envían a un codificador Swin Transformer compartido. Después de obtener M representaciones, se enviarán para calcular por separado la pérdida de clasificación y la pérdida de consistencia.

Machine Translated by Google

3.1. Trabajo de

preprocesamiento En primer lugar, proporcionamos un lote de entrada de videos B y dividimos equitativamente cada video en M cuadros de video según el cálculo del número total de cuadros de cada video. La etapa de preprocesamiento también incorpora un detector facial, "SCRFD" [22] para localizar áreas faciales, alinear las caras y recortarlas para crear conjuntos de datos específicos. Específicamente, este detector facial se basa en Insightface y utiliza métodos específicos de redistribución de muestras (SR) y redistribución computacional (CR) para la detección facial. “scrfd 10g kps.onnx” es uno de los archivos de peso del modelo que utiliza este método de detección de rostros [22], y kps representa los 5 puntos clave faciales detectados en este modelo. Para conservar cierta información de fondo, ampliamos el ancho y el alto de las imágenes recortadas en un 10%. Luego, los cuadros totales de M × B se organizan cuidadosamente en orden, sirviendo como entradas para el Transformador Swin, y todos se redimensionan a 3 × 224 × 224. Dado que aplicamos y seleccionamos al azar cinco aumentos de datos en un conjunto de transformación T en M × Marcos B , los conjuntos de vectores de entrada I tienen un tamaño de [B, M, 3, 224, 224], lo que significa que cada grupo contiene M [3, 224, 224] vistas. Finalmente, el conjunto de vistas de entrada se escribe como:

$$Yo = \{\{x1, x2. . . xM\}1 . . . \{x1, x2. . . xM\}B \} \quad (1)$$

donde xn representa cada vista de cuadro, B representa un lote de video, {x1, x2. . . xM}B representa el B-ésimo grupo de vistas de datos y M representa cuántos fotogramas se dividen equitativamente.

Una vez que se obtienen las vistas de datos de entrada, se aplicarán aleatoriamente cinco métodos de aumento de datos en estas vistas de datos. Estos tensores aumentados son la entrada final de las entradas del modelo Swin-Fake, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Ejemplos de datos aumentados aleatorios. Para el borrado aleatorio, configuramos el borrado aleatorio que se realizará en 0,8, la escala es de 0,02 a 0,2 y la proporción del área borrada es de 0,5 a 2,0. Para Cultivo aleatorio, configuramos la escala de Cultivo aleatorio de 0,77 a 1 y la relación de Cultivo aleatorio de 0,9 a 1,1.

3.2. Red de codificadores

Adoptamos Swin Transformer [11] como nuestro extractor de características f debido a su estructura jerárquica única . Contiene múltiples bloques Transformer apilables, entre los cuales los bloques de nivel inferior pueden capturar información de color y bordes y los bloques de nivel superior se pueden utilizar para analizar la información semántica. Después de aplicar el enfoque de partición de ventana desplazada y la incrustación lineal, podemos cambiar la dimensión de la característica de entrada y obtener los vectores de consulta (Q), clave (K) y valor (V) por separado. Las consultas (Q) y las claves (K) tienen la misma dimensión de d. Al calcular los productos escalares de la consulta (Q) con todas las claves (K) y dividir cada una por $\sqrt{d}$, se finaliza el primer paso de la correlación de atención . Luego, agregamos el sesgo y aplicamos una función softmax para exprimir la salida dentro del rango de 0 a 1 y obtener una puntuación de valor. Este método de cálculo de la atención tiene como objetivo calcular la suma ponderada de valores, que es lo mismo que la "Atención del producto escalado".

El cálculo de la autoatención se escribe como

$$\text{Atención}(Q, K, V) = \text{Entonces f tMax}(QKT/\sqrt{d} + B)\overline{V} \text{ donde} \quad (2)$$

$1/\sqrt{d}$ es el factor de escala de Q, K y B es el sesgo de Q, K, V.

Cuando el conjunto de entrada I pasa por el codificador y se asigna a representaciones B × M , la representación f(xn) es un vector bidimensional d con un tamaño de [49, 768].

Machine Translated by Google

Mientras tanto, cada representación M se establece como un grupo y se incluye en el cálculo de la pérdida de consistencia. Después de aplicar una capa lineal en el último bloque básico de Swin, enviamos las representaciones para calcular la pérdida de entropía cruzada para la clasificación. Por lo tanto, cada lote de fotogramas requiere pasar por múltiples operaciones de datos aumentados y luego podemos obtener las características de baja dimensión extraídas (consulte la Figura 4). Finalmente, se calcularán dos vectores de salida, uno para el cálculo de la pérdida de consistencia y otro operado por la capa lineal para la pérdida de clasificación. Se puede encontrar una explicación detallada de estos dos cálculos de la función de pérd visto en la Sección 3.3.

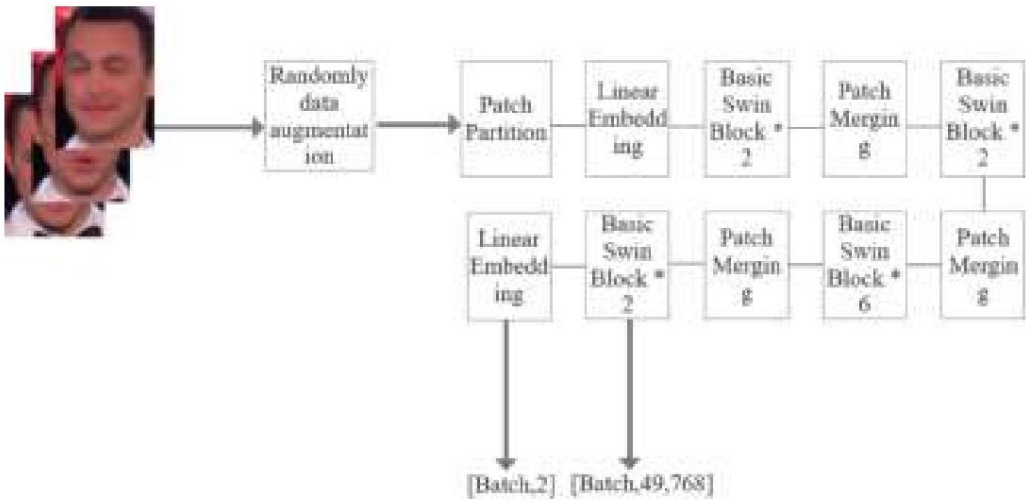


Figura 4. La arquitectura de la columna vertebral de Swin Transformer. representa cuántos bloques Swin básicos se aplican en la columna vertebral. Hay dos vectores de salida para cada vista de datos de entrada establecida en nuestro modelo, que son las características de baja dimensión extraídas con un tamaño de [M × 49 × 768] y la probabilidad predicha [M × 2].

3.3. Funciones de pérdida

La función de pérdida de este modelo está diseñada con dos componentes: pérdida de clasificación y pérdida de consistencia. La pérdida de consistencia se aplica a cada grupo de M representaciones extraídas y restamos sus distancias. Además, la razón por la que adoptamos la distancia del coseno para completar el diseño de pérdida de consistencia es que no obligamos a que cada par de representaciones sea exactamente igual, sino a que sean cada vez más similares. El cálculo de la distancia del coseno de cada par de representaciones se puede escribir como

$$LCos = (1 - fxi \cdot fxt) \quad (3)$$

donde xi y xt representan los cuadros i-ésimo y t-ésimo de vistas de datos, y f (xi) y f (xt) representan las representaciones normalizadas extraídas por un codificador compartido.

Dado que hemos obtenido videoclips aumentados con la cantidad de grupos B como entrada de nuestro modelo, también necesitamos calcular la similitud entre estas características de los videoclips capturados. El objetivo de esto es resolver algunos resultados distinguidos incorrectamente de muestras duras acortando sus distancias de cosenos, y consideramos esto como una pérdida de consistencia. En cuanto a otro factor que influye en la pérdida total, la pérdida de consistencia está diseñada para calcular las distancias medias de los cosenos de los vídeos del lote B. Específicamente, las M representaciones extraídas de un video pueden generar C $_{\text{METRO}}^{2}$ pares de similitudes a través de la ecuación anterior. El sc La consistencia de un video se puede expresar como la media de la similitud de pares C $_{\text{METRO}}^{2}$, y la pérdida total de consistencia de los videos del lote B requiere que calculemos el valor promedio de todas las consistencias individuales calculadas. Por lo tanto, la pérdida de consistencia se puede escribir como

$$LContras = \frac{1}{B}\sum_{1}^{B} media(LCos) = \frac{1}{B}\sum_{1}^{B} media(1 - fxi \cdot fxt) \quad (4)$$

Machine Translated by Google

donde B representa el tamaño del lote del video.

El objetivo principal de configurar la pérdida de coherencia es demostrar que no importa cuán realista sea un cuadro de video deepfake en particular, el modelo es capaz de acortar su distancia espacial con otros cuadros falsos. Por otro lado, la pérdida de coherencia valida la coherencia de clasificación de diferentes fotogramas de un vídeo. Dado que el trabajo de clasificación es inseparable de las etiquetas supervisadas, aplicamos la pérdida de entropía cruzada estándar como pérdida de clasificación y la formulamos de la siguiente manera:

$$LCE = -\sum_{1}^{M\times B} [y \log(p) + (1 - y)\log(1 - p)] \quad (5)$$

donde y es la etiqueta de verdad fundamental, p es la probabilidad predicha y M × B representa el número total de fotogramas de vídeo.

Debido a que nuestro modelo es un modelo de aprendizaje de consistencia, utilizamos dos funciones de pérdida (pérdida de consistencia y pérdida de entropía cruzada) en la combinación lineal para formar nuestra pérdida total. Sin embargo, configuramos el hiperparámetro α como el equilibrio de peso para observar qué proporción de estas dos funciones de pérdida pueden alcanzar la pérdida total mínima y alcanzar la mayor precisión. En la Sección 4.4, realizamos una prueba de ablación para observar qué valor de este hiperparámetro puede predecir la mayor cantidad de muestras al atravesar el parámetro de peso agregando 0.1 en cada experimento, porque esperamos encontrar el peso que mejor se ajuste para equilibrar estas dos pérdidas. funciones, y no esperamos que la pérdida total esté sesgada en gran medida hacia uno de los resultados de las funciones de pérdida.

$$Ltot = \alpha LCons + (1 - \alpha)LCE \quad (6)$$

donde α es el hiperparámetro para equilibrar la pérdida de entropía cruzada y la pérdida de consistencia, y varía de 0 a 1.

4. Experimentos 4.1. Conjuntos de datos

Para evaluar nuestro método, seleccionamos cuatro conjuntos de datos comunes en este campo: FaceForensics ++ [23], DFDC [24], Celeb-DF [25] y FaceShifter [26]. En particular, los dos primeros conjuntos de datos se utilizaron para la fase de entrenamiento, y Celeb-DF V2 y FaceShifter se utilizaron para experimentos entre conjuntos de datos para demostrar la capacidad de generalización de nuestro modelo. FaceForensics++ es un conjunto de datos pionero a gran escala en manipulación facial que contiene 1000 vídeos reales y 4000 vídeos falsos generados por Face2Face, FaceSwap, Neural Textures y Deepfakes.
DFDC es el conjunto de datos más grande de estos cuatro conjuntos de datos y contiene 119,197 videos filmados por actores reales. En comparación con los dos conjuntos de datos anteriores, Celeb-DF se deriva de 590 videos originales de YouTube y 5639 videos manipulados con combinación de colores avanzada, que es difícil de distinguir para el ojo humano. FaceShifter es una subclase de los conjuntos de datos de FaceForensics++ y contiene 1000 vídeos falsos con diferentes escenarios de grabación. Teniendo en cuenta los datos de entrenamiento desequilibrados de FaceForensics++, combinamos aleatoriamente 2000 videos reales de la base de datos DFDC con videos reales de FF++ para resolver este problema. En cuanto a la capacitación de DFDC, optamos por reducir la muestra de algunos cuadros de video falsos para resolver el desequilibrio de datos.

4.2. Detalles de implementación

Para el preprocesamiento de datos, extrajimos M cuadros de cada video estableciendo un umbral de confianza de 0,5 y un umbral NMS de 0,5 para "scrfd 10g kps.onnx". Además, las caras recortadas detectadas con cuadros delimitadores se ampliaron en 1,2 tanto en ancho como en alto para garantizar que existiera alguna información de fondo sobre las entradas del modelo. En cuanto a la configuración de aumento de datos, establecimos una probabilidad del 80% de borrar el área facial, el rango de proporción del área borrada con respecto a la imagen de entrada se estableció de 0,02 a 0,2 y el rango de relación de aspecto del área borrada. se configuró de 0,5 a 2,0 en la operación de borrado aleatorio. En el aumento de Recorte aleatorio, establecimos los límites superior e inferior de la escala en 0,77 y 1, lo que significa que el área aleatoria de recorte antes de cambiar el tamaño fue de 0,77 a 1 respectivamente. Durante el experimento, algunos fotogramas seleccionados (Ver Figura 5) con

Machine Translated by Google

no se copiaron rostros humanos del último cuadro de índice detectado en lugar de enviarse directamente al conjunto de vista de datos de entrada.

Figura 5. Algunas muestras de deepfake procesadas por “scrfd 10g kps.onnx”, que es la entrada original para el entrenamiento de nuestro modelo.

Para el entrenamiento del modelo, configuramos el tamaño del mini lote de video en 4 con un tamaño de imagen de 224 × 224, y luego utilizamos un optimizador AdamW [27] con una caída de peso establecida en 0,05 y la tasa de aprendizaje establecida en 0,0001. Para entrenar este modelo de manera efectiva, detuvimos el entrenamiento temprano si no hubo un aumento en la precisión de la validación en las primeras 5 épocas, y la época total se estableció en 30. Además, todas las tasas de abandono se establecieron en 0,2 para evitar el sobreajuste en nuestro experimento. Todos nuestros modelos utilizaron swin-tiny-patch4-window7-224.pth y fueron entrenados previamente en ImageNet-1K como columna vertebral, y las características de salida fueron extraídas por la capa lineal con un tamaño de [M, 49, 768] y los vectores con un tamaño de [M, 2]. Inicialmente adoptamos un peso equilibrado de 0,5 porque al principio consideramos que la pérdida de consistencia tenía la misma importancia que la pérdida de clasificación.

4.3. Estudio dentro del

conjunto de datos En esta sección, evaluamos el rendimiento de validación de nuestro modelo propuesto en las mismas fuentes que los conjuntos de datos de entrenamiento. Para los experimentos en conjuntos de datos, evaluamos DFDC y FaceForensics++, que son dos conjuntos de datos relativamente grandes, porque descubrimos que Swin Transformer siempre requiere una gran cantidad de datos de entrenamiento para alcanzar un buen nivel de validación durante los experimentos de entrenamiento; de lo contrario, presentará una precisión de validación inicial relativamente baja en algunos conjuntos de datos de entrenamiento a pequeña escala. Y el hiperparámetro inicial se estableció en 0,5 de forma predeterminada. Comparamos nuestro método de aprendizaje de coherencia con tres líneas de base: Capsule Network, STIL [28] e ISTVT [10]. Como se muestra en la Tabla 1, Capsule Network presenta la precisión más baja e ISTVT funciona mejor que STIL. Nuestro enfoque funciona mucho mejor que Capsule Network y la precisión del conjunto de datos es un poco mayor que la de STIL e ISTVT.

Machine Translated by Google

Tabla 1. Precisión de detección de deepfake. Los mejores resultados de precisión en los conjuntos de datos están en negrita. Excepto por Capsule Network, que se reproduce, los resultados de los otros métodos provienen de [10,28].

Métodos	FF++				DFDC
	DF	F2F	FS	Nuevo Testamento	
Red de cápsulas	98,5%	96,7%	94,5%	91,8%	-
ESTILO	99,6%	99,3%	97,1%	95,4%	89,8%
ISTVT	99,6%	99,6%	100%	96,8%	92,1%
Nuestro enfoque	99,9%	99,6%	100%	98,8%	93,7%

DF: Deepfakes; F2F: Cara a Cara; NT: Texturas Neuronales; FS: Cambio de cara.

4.4. Resultados de la prueba de ablación

Para probar la importancia de la rama de consistencia de nuestro modelo, también realizamos un experimento de ablación (ver Tabla 2) en la clasificación de imágenes deepfake de Swin Transformer con nuestro enfoque (con aprendizaje consistente supervisado). Encontramos que el aprendizaje consistente puede aumentar efectivamente la precisión, lo cual se debe a que nuestro enfoque utiliza pérdida de consistencia para acortar las distancias (aumenta la similitud) entre diferentes fotogramas del vídeo para que que si un cuadro se distingue por la rama de clasificación como falso con un valor realmente alto puntuación de confianza, existe una alta probabilidad de que se consideren otros marcos muestrales estrictos. tan falso también.

Tabla 2. Comparación de la precisión del experimento de ablación. Utilizamos Swin Transformer para realizar un Prueba binaria de imágenes deepfake y compara su precisión con la de nuestro enfoque.

Métodos	FF++(Prueba binaria)	DFDC
Transformador giratorio	89,4%	91,4%
Nuestro enfoque	94,3%	93,7%

Además, el peso del equilibrio α es otra variable que decide la pérdida total final; por lo tanto, realizamos un experimento de ablación para determinar cuánto peso se requiere para que la pérdida de consistencia muestre el mejor desempeño en este modelo discriminativo mediante estableciendo este hiperparámetro en 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 y 0.8. En esta prueba de ablación, todavía utilizamos FaceForensics++ como conjunto de datos para explorar qué peso de equilibrio podría alcanzar el máximo exactitud predicha. Además, combinamos todas las categorías falsas en una clase para probar. rendimiento binario en lugar de probar múltiples clasificaciones. Porque no configuramos esto equilibrio de peso como parámetro que se puede aprender en nuestro modelo, elegimos atravesar el peso equilibre añadiendo 0,1 por experimento. Una vez que obtuvimos la mayor precisión, consideramos este modelo como modelo de última generación, y utilizamos los parámetros entrenados de este modelo para realizar experimentos entre conjuntos de datos. Como se muestra en la Tabla 3, encontramos que el peso La configuración de equilibrio de 0,7 muestra el mejor rendimiento y se entrenó en FaceForensics++. prueba binaria.

Tabla 3. Precisión del experimento de ablación en diferentes balanzas de peso. Esto es para probar qué peso El equilibrio de nuestra función de pérdida logrará el mejor resultado.

α	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Exactitud	92,6%	93,9%	94,1%	94,3%	93,7%

4.5. Estudio de conjuntos de datos cruzados

Debido a los múltiples métodos de falsificación, es importante evaluar el rendimiento del modelo entre conjuntos de datos. Para probar la capacidad de generalización de nuestro modelo, entrenamos nuestro modelo. en FaceForensics++ y lo probé en Celeb-DF, FaceShifter y DFDC. Teniendo en cuenta que Los tamaños de muestra de la mayoría de los conjuntos de datos deepfake para la clase real y la clase falsa están desequilibrados,

Machine Translated by Google

También optó por utilizar el área bajo la curva (AUC) para evaluar la solidez de nuestra modelo, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. El AUC del experimento de conjuntos de datos cruzados. Entrenamos nuestro modelo en FF++ y lo probamos. los datos invisibles. Los mejores resultados de AUC entre conjuntos de datos están en negrita. Los resultados de los otros métodos son de [10,28–31].

Modelos	Celeb-DF	Cambiador de cara	DFDC	Promedio
Red de cápsulas	34,5%	42,4%	-	38,5%
ESTILO	75,6%	-	-	75,6%
ISTVT	84,1%	99,3%	74,2%	85,9%
Radiografía de cara	79,5%	92,8%	65,6%	79,3%
FTCN	86,9%	98,8%	74,0%	86,6%
LabioForense	82,4%	97,1%	73,5%	84,3%
Nuestro enfoque	88,8%	98,3%	71,8%	86,3%

Descubrimos que nuestro enfoque sólo podía dar los mejores resultados en Celeb-DF. Este Esto se debe a que Celeb-DF contiene trabajos avanzados de posprocesamiento, como la combinación de colores. y es realmente difícil saber cuándo ocurre un desajuste de límites en los medios generados. Para probar este punto de vista, elegimos crear mapas de calor de nuestro modelo y otros modelos de detección basados en CNN para explicar la visualización del modelo de las regiones de enfoque de deepfake. medios de comunicación. Al observar el mapa de calor de nuestro modelo, encontramos que nuestro modelo se enfoca más en contenidos faciales humanos generados, como labios y ojos, en lugar de textura límite información (ver Figura 6). Al revisar algunos videos de ejemplo de FaceShifter, descubrimos que Las pistas de falsificación siempre ocurren en el área del límite facial, que es la región facial que nuestro modelo presta menos atención, pero las pistas de falsificación de Celeb-DF ocurren en los rasgos faciales, como ojos y labios humanos manipulados de forma antinatural. Además, comparamos los datos en Celeb-DF con los datos de DFDC, y encontramos que DFDC contiene más datos con diferentes escenarios de disparo, como fondos interiores oscuros y rostros con extrema plantea. Esto hace que sea realmente difícil para nuestro modelo lograr coherencia y obtener resultados útiles. información para distinguir medios reales o falsos porque utilizamos el modelo entrenado por FaceForensics++, e incluía más rostros humanos con poses normales y tomas brillantes. escenarios, que es similar a la distribución de datos de Celeb-DF.

Además, también comparamos el método basado en transformador ISTVT como punto de referencia. modelo, y logró resultados AUC ligeramente mejores en FaceShifter y DFDC (ver Figura 7). Esto se debe a que los autores que utilizaron ISTVT aplicaron un mecanismo de autoresta y autoatención temporal en su trabajo, que es de lo que carece nuestro enfoque. La auto resta El mecanismo puede centrarse más en la distorsión entre cuadros, que es otra técnica importante. para la detección de deepfakes. Requiere la aplicación de un token de entrada antes de la proyección. para consultar y vectores clave. Genera características residuales para reemplazar las características originales. Sin embargo, nuestro modelo aún logra resultados competitivos en comparación con otros anteriores. Modelos de última generación como STIL y Face X-ray.

Machine Translated by Google

Figura 6. Mapa de calor comparativo entre otros métodos de detección de deepfake y nuestro enfoque.
A partir de esta figura, es obvio que la mayoría de los detectores de deepfake se centran en la información de límites de los medios falsos generados.

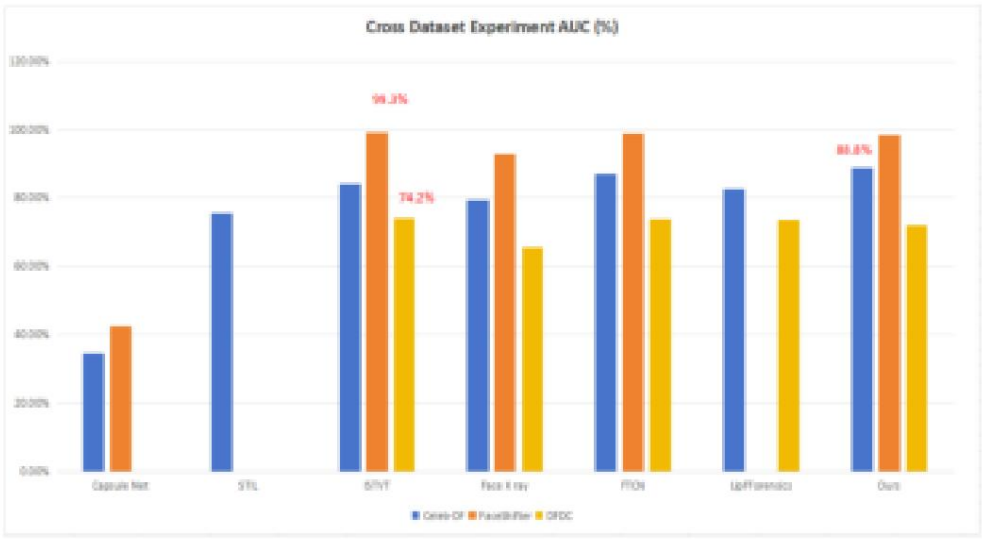


Figura 7. Resultados de AUC de conjuntos de datos cruzados basados en Capsule Net, STIL, ISTVT, Face X-ray, FTCN, LipForensics y nuestro enfoque. El mejor rendimiento en cada conjunto de datos está etiquetado en la figura.

5. Conclusiones y trabajo futuro

En este artículo, proponemos Swin-Fake, que, por primera vez, combina Swin Transformer con pérdida de consistencia, como método de aprendizaje de consistencia para la detección de deepfake. Empleamos Swin Transformer como extractor de características y utilizamos la distancia coseno promedio como medida de pérdida de consistencia, lo que mejoró la capacidad de generalización en algunas bases de datos deepfake. Demostramos que un clasificador basado en Transformer podría alcanzar un nivel más alto en el campo de detección de deepfake en comparación con otros métodos anteriores basados en CNN. Durante las fases de entrenamiento y validación, llegamos a la conclusión de que Swin Transformer tenía una mejor capacidad de distinción de deepfake, mientras que las bases de datos a gran escala como FF++ y DFDC no muestran un rendimiento prometedor en algunos conjuntos de datos pequeños como Celeb DF. Además, calcular la coherencia entre las características de los marcos podría disminuir significativamente la pérdida y mejorar las métricas de evaluación; por lo tanto, creemos que aplicar el método de aprendizaje de coherencia con Transformer para la detección de deepfake podría ser una nueva tendencia en la detección de medios falsos.

La detección de videos deepfake no se puede completar sin información temporal porque la fluctuación de cuadros siempre ocurre en los cuadros adyacentes. En investigaciones recientes, la atención temporal siempre se combina con la atención espacial para la detección de vídeo. Como otra técnica en el campo de la detección de video, la atención temporal puede verse como un mecanismo de selección temporal dinámico que determina cuándo prestar atención a una determinada característica de un video y, a menudo, se aplica en el procesamiento de video. También es un método eficaz para aumentar la evaluación.

Machine Translated by Google

Las métricas en este campo si podemos combinar información de consistencia temporal junto con información espacial extraída, y el método más común es diseñar módulos específicos para explorar la consistencia o inconsistencia temporal aplicando capas convolucionales horizontales y verticales. Por lo tanto, en trabajos futuros, investigaremos más a fondo la autoatención temporal de la columna vertebral basada en Swin Transformer. Aunque nuestro trabajo actual se centra en detectores basados en video, todavía nos centramos en la extracción de características espaciales y se aplica la coherencia de características para la comparación dentro de clases. Combinar la coherencia temporal con la espacial probablemente implicaría más información, lo que beneficiaría la clasificación de los vídeos. En cuanto al equilibrio de peso α, agregamos 0,1 en cada experimento para probar la eficiencia del bloque de consistencia y obtener el valor con la mayor precisión.
Para obtener un valor más preciso de este hiperparámetro, estableceremos el equilibrio de peso como un parámetro que se puede aprender en futuras investigaciones. Además, investigaremos más a fondo otros métodos de visualización para detectores de deepfake basados en Swin Transformer para interpretar qué características espaciales se capturan y contribuyen al clasificador de deepfake.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, LYG y XJL; metodología, LYG y XJL; software, LYG; validación, LYG; análisis formal, LYG; investigación, LYG; recursos, LYG y XJL; curación de datos, LYG y XJL; redacción: preparación del borrador original, LYG, XJL y PHJC; redacción: revisión y edición, LYG, XJL y PHJC; visualización, LYG y XJL; supervisión, XJL y PHJC; administración del proyecto, XJL y PHJC Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: Los conjuntos de datos relativos se descargan de [24], los códigos reproducidos por DFDC son de [13].

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Buen compañero, yo; Pouget-Abadie, J.; Mirza, M.; Xu, B.; Wared-Farley, D.; Ozair, S.; Courville, A.; Bengio, Y. Red Adversaria Generativa. Comunitario. Acm 2018, 63, 139-144. [Referencia cruzada]
2. Karras, T.; Laine, S.; Aila, T. Una arquitectura generadora basada en estilos para redes generativas adversarias. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Long Beach, CA, EE. UU., 15 a 20 de junio de 2019.
3. Ho, J.; Jain, A.; Abbeel, P. Modelos probabilísticos de difusión de eliminación de ruido. En actas de la 34ª Conferencia Internacional sobre Sistema de procesamiento de información neuronal, Red Hook, Nueva York, EE. UU., 6 a 12 de diciembre de 2020; págs. 6840–6851.
4. Nguyen, HH; Yamagishi, J.; Echizen, I. Uso de una red cápsula para detectar imágenes y vídeos falsos. En Actas de Computer Vision and Pattern Recognition, Long Beach, CA, EE. UU., 16 a 20 de junio de 2019.
5. Das, S.; Seferbekov, S.; Datta, A.; Islam, MS; Amin, MR Hacia la solución del problema de los deepfake: un análisis sobre cómo mejorar la detección de deepfake mediante el aumento dinámico de rostros. En actas de la Conferencia internacional IEEE/CVF sobre visión por computadora, Montreal, BC, Canadá, 11 a 17 de octubre de 2021.
6. Zhao, T.; Xu, X.; Xu, M.; Ding, H.; Xiong, Y.; Xia, W. Aprendizaje de la autoconsistencia para la detección de deepfake. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Nashville, TN, EE. UU., 20 a 25 de junio de 2021.
7. Dosovitskiy, A.; Beyer, L.; Kolesnikov, A.; Weissenborn, D.; Zhai, X.; Unterthiner, T.; Dehghani, M.; Minderer, M.; Heigold, G.; Gelly, S.; et al. Una imagen vale 16 × 16 palabras: transformadores para el reconocimiento de imágenes a escala. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Representaciones del Aprendizaje, virtual, 26 de abril a 1 de mayo de 2020.
8. Khan, SA; Dai, H. Video Transformer para la detección de deepfake con aprendizaje incremental. En actas de la 29ª JCA Conferencia internacional sobre multimedia, evento virtual, 20 a 24 de octubre de 2021; págs. 1821–1828.
9. Khormali, A.; Yuan, J. DFDT: Un marco de detección de DeepFake de extremo a extremo que utiliza Vision Transformer. Aplica. Ciencia. 2022, 12, 2953. [Referencia cruzada]
10. Zhao, C.; Wang, C.; Abrazo.; Chen, H.; Liu, C.; Tang, J. ISTVT: Transformador de vídeo espacial-temporal interpretable para Deepfake Detección. Traducción IEEE. Inf. Seguridad forense. 2023, 18, 1335–1348. [Referencia cruzada]
11. Liu, Z.; Lin, Y.; Cao, Y.; Eh.; Wei, Y.; Zhang, Z.; Lin, S.; Guo, B. Swin Transformer: Transformador de visión jerárquica que utiliza ventanas desplazadas. En actas de la Conferencia internacional IEEE/CVF sobre visión por computadora, Montreal, BC, Canadá, 11 a 17 de octubre de 2021.
12. Zhong, Z.; Zheng, L.; Kang, G.; Li, S.; Yang, Y. Aumento de datos de borrado aleatorio. En actas de la Conferencia AAAI sobre Inteligencia artificial, Nueva York, NY, EE. UU., 7 a 12 de febrero de 2020.
13. DFDC Selim. Disponible en línea: https://github.com/selimsef/dfdc_deepfake_challenge (consultado el 15 de mayo de 2024).

Machine Translated by Google

14. Chollet, F. Xception: Aprendizaje profundo con convoluciones separables en profundidad. En Actas de Computer Vision and Pattern Reconocimiento, Honolulu, Hawaii, EE. UU., 21 a 26 de julio de 2017.
15. Él, K.; Zhang, X.; Ren, S.; Sun, J. Aprendizaje residual profundo para el reconocimiento de imágenes. En Actas de la Conferencia IEEE de 2016 sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Las Vegas, NV, EE. UU., 27 a 30 de junio de 2016.
16. Ni, Y.; Meng, D.; Yu, C.; Quan, CB; Ren, D.; Zhao, Y. CORE: Aprendizaje de representación consistente para la detección de falsificaciones faciales. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Nueva Orleans, LA, EE. UU., 18 a 24 de junio de 2022.
17. Sol, K.; Yao, T.; Chen, S.; Ding, S.; Li, J.; Ji, R. Aprendizaje contrastivo dual para la detección general de falsificaciones faciales. Conferencia AAAI. Artif. Intel. 2022, 36, 2316–2324. [Referencia cruzada]
18. Zhang, J.; Cheng, K.; Sovernigo, G.; Lin, X. Un método de detección de deepfake basado en el aprendizaje de conjuntos de características heterogéneas. En Actas de la ICC 2022: Conferencia Internacional de Comunicaciones del IEEE, Seúl, República de Corea, 16 a 20 de mayo de 2022; págs. 2084-2089.
19. Rana, MS; Sung, AH DeepfakeStack: una técnica de aprendizaje basada en conjuntos profundos para la detección de deepfake. En Actas de la 7.ª Conferencia Internacional del IEEE sobre Seguridad Cibernética y Computación en la Nube (CSCloud) de 2020/6.ª Conferencia Internacional del IEEE sobre Computación de Borde y Nube Escalable (EdgeCom) de 2020, Nueva York, NY, EE. UU., 1 al 3 de agosto de 2020; págs. 70–75.
20. Ilyas, H.; Javed, A.; Malik, KM AVFakeNet: un modelo de aprendizaje profundo unificado de extremo a extremo Dense Swin Transformer para audiovisual Detección de deepfakes. Aplica. Computación suave. 2023, 136, 110124. [Referencia cruzada]
21. Khalid, F.; Akbar, MH; Gul, S. SWYNT: Transformadores Swin Y-Net para la detección de deepfake. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Robótica y Automatización en la Industria (ICRAI) de 2023, Peshawar, Pakistán, 3 a 5 de marzo de 2023; págs. 1–6.
22. Guo, J.; Deng, J.; Lattas, A.; Zafeiriou, S. Redistribución de muestras y computación para una detección facial eficiente. En procedimientos de Conferencia internacional sobre representación del aprendizaje, evento virtual, 3 al 7 de mayo de 2021.
23. Zhou, TF; Wang, WG; Liang, ZY; Shen, JB se enfrentan a la ciencia forense en la naturaleza. En Actas de Computer Vision and Pattern Reconocimiento (CVPR), virtual, 19 al 25 de junio de 2021.
24. Kaggle. Disponible en línea: https://www.kaggle.com/c/deepfake-detection-challenge/overview (consultado el 12 de diciembre de 2023).
25. Li, YZ; Yang, X.; Sol, P.; Qi, HG; Lyu, S. Celeb-DF: un conjunto de datos desafiante a gran escala para la ciencia forense DeepFake. En procedimientos of the Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, WA, EE. UU., 14 a 19 de junio de 2020.
26. Li, L.; Bao, J.; Yang, H.; Chen, D.; Wen, F. FaceShifter: hacia el intercambio de rostros consciente de la oclusión y la alta fidelidad. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Seattle, WA, EE. UU., 13 a 19 de junio de 2020.
27. Loshchilov, I.; Hutter, F. Regularización de la caída del peso desacoplada. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Representaciones del Aprendizaje, Nueva Orleans, Luisiana, EE. UU., 6 al 9 de mayo de 2019.
28. Gu, Z.; Chen, Y.; Yao, T.; Ding, S.; Li, J.; Huang, F.; Ma, L. Aprendizaje de inconsistencia espaciotemporal para la detección de videos deepfake. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, virtual, 19 al 25 de junio de 2021.
29. Li, L.; Bao, J.; Zhang, T.; Yang, H.; Chen, D.; Wen, F.; Guo, B. Radiografía facial para una detección más general de falsificaciones faciales. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Seattle, WA, EE. UU., 13 a 19 de junio de 2020.
30. Zheng, Y.; Bao, J.; Chen, D.; Zeng, M.; Wen, F. Explorando la coherencia temporal para una detección más general de falsificación de rostros en videos. En actas de la Conferencia internacional IEEE/CVF sobre visión por computadora, Montreal, QC, Canadá, 10 a 17 de octubre de 2021; págs. 15044-15054.
31. Haliassos, A.; Vougioukas, K.; Petridis, S.; Pantic, M. Los labios no mienten: un enfoque sólido y generalizable para enfrentar la detección de falsificaciones. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, virtual, 19 a 25 de junio de 2021; págs. 5039–5049.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Una Red de Plantas Hidroeléctricas Prosumer como Distribución Sostenible Depósito de energía

Michał Morawski y Przemysław Ignaciuk *

Facultad de Física Técnica, Tecnología de la Información y Matemáticas Aplicadas, Universidad Tecnológica de Lodz, 93-005 Lodz, Polonia; michal.morawski@p.lodz.pl *
Correspondencia: przemyslaw.ignaciuk@p.lodz.pl

Resumen: La escasez de depósitos de almacenamiento eficientes y de bajo costo inhibe la adopción a gran escala de fuentes de energía renovables (RSE) volátiles por naturaleza. En este artículo, describimos cómo utilizar plantas hidroeléctricas propiedad de proconsumidores de unos pocos a varios kW como una solución distribuida de almacenamiento de energía a corto plazo que se puede implementar con poca inversión y un bajo gasto operativo. La solución propuesta es un sistema de depósitos hidroeléctricos interconectados con un algoritmo de control activo del flujo de agua que reduce la variabilidad de carga de la red y beneficia a los prosumidores. Según las pruebas realizadas, los ingresos de los prosumidores aumentan de varios por ciento a más del 30 por ciento, dependiendo de las condiciones climáticas, en comparación con el caso del flujo libre. A su vez, el efecto amortiguador del colchón de energía distribuida equilibra las fluctuaciones introducidas por otras RSE, por ejemplo, las fotovoltaicas o las eólicas. Por lo tanto, si bien beneficia a las partes involucradas, también facilita la inclusión de las RSE dentro del sistema de distribución de energía.

Palabras clave: depósito de energía; plantas hidroeléctricas; sistemas distribuidos

1. Introducción

La energía eléctrica se considera el torrente sanguíneo de la sociedad actual. El uso de electricidad en los hogares, la industria, el transporte y la refrigeración y calefacción de edificios genera una mayor demanda diaria. Mientras tanto, la generación de energía sigue siendo cara, tanto desde el punto de vista medioambiental como económico. La contaminación global, el costo creciente de los combustibles fósiles y la presión política son solo algunos de los factores que fomentan la producción de energía a partir de fuentes renovables (RSE), por ejemplo, el sol, el viento, las olas, la energía geotérmica y el movimiento del agua [1]. Desafortunadamente, la cantidad de energía recuperada de las RSE depende en gran medida de las condiciones climáticas temporales. Las RSE proporcionan energía económica ya sea en horas aleatorias (viento) o alrededor del mediodía (solar, principalmente fotovoltaica (PV)). Por el contrario, la demanda se mantiene en un nivel similar hasta la noche, como se ilustra en la Figura 1. Por lo tanto, las plantas costosas que funcionan con combustibles fósiles deben funcionar por las noches, pero su actividad debería limitarse a favor de las RSE si el sol o viento está disponible. Además, la generación de energía a partir de plantas térmicas tradicionales no puede verse demasiado limitada debido a factores tecnológicos. Como resultado de la dinámica del mercado, los precios de la energía se fijan en niveles bajos (o incluso negativos) en ciertos momentos para luego alcanzar un orden de magnitud mayor unas horas más tarde, asemejándose a la "curva pato" representada en la Figura 2, que muestra los primeros días de Julio de 2023 en el mercado energético polaco. En interés de todas las partes interesadas, esta disparidad debería reducirse.

Una solución autoimpuesta a la disparidad entre productores y consumidores es almacenar el excedente de energía cuando sea barato para un momento posterior, cuando se incorporen fuentes costosas. Desafortunadamente, la tecnología actual no permite ejecutar esto a mayor escala [2]. Por ejemplo, las plantas hidroeléctricas de bombeo en Polonia pueden suministrar, como máximo, el 5% de la demanda total de energía, y los depósitos de baterías sólo entregan el 1% como máximo. Ambos métodos tradicionales, así como los posibles sistemas basados en hidrógeno, son costosos de implementar y mantener. La baja durabilidad de las baterías electromecánicas restringe aún más el buen retorno de la inversión. Por lo tanto, es deseable buscar una nueva opción para el almacenamiento de energía con bajos CAPEX (gastos de capital) y bajos OPEX (gastos operativos).

check for updates

Cita: Morawski, M.; Ignacio, P. Una Red de Centrales Hidroeléctricas Prosumer como Depósito de Energía Distribuida Sostenible. Electrónica 2024, 13, 3043. https://doi.org/10.3390/electrónica13153043

Editores académicos: Temitayo Olowu y Raghav Khanna

Recibido: 24 de junio de 2024
Revisado: 22 de julio de 2024
Aceptado: 30 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Machine Translated by Google

Recientemente se ha observado un cambio sustancial en el mercado eléctrico. Las grandes centrales eléctricas tradicionales se están complementando con instalaciones de pequeña escala instaladas por los ciudadanos en sus propias instalaciones. Estos ciudadanos son consumidores de electricidad durante determinadas horas del día y productores en otras horas, por lo que se les denomina prosumidores. Por un lado, la popularidad de las instalaciones de prosumidores impulsa la adopción de RSE; por otro lado, amenaza la estabilidad del sistema de suministro de energía al obligar a cambios extremos de carga en las plantas tradicionales.

Este estudio contribuye a los desafíos antes mencionados de las siguientes maneras: • Proponemos involucrar a plantas hidroeléctricas de proconsumidores con una potencia máxima en el rango de unos pocos kW para formar un depósito de energía distribuida;

• Diseñamos un esquema de control activo, que permite tanto aumentar los ingresos de los propietarios de las plantas como reducir la variabilidad de carga impuesta a las plantas térmicas heredadas ("decapitar al pato" [3]), logrando así una solución beneficiosa para todos; • Contrariamente al enfoque típico, que se centra en un único generador híbrido, por ejemplo, [4], mostramos cómo coordinar una red de plantas para una operación segura y eficiente del sistema distribuido.

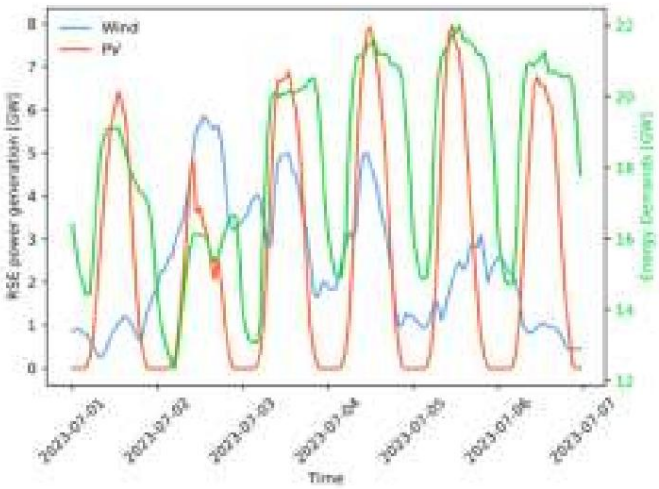


Figura 1. Generación de energía de las principales RSE y demandas de energía previstas en Polonia del 1 al 6 de julio de 2023 (el 1 de julio fue sábado [5]).

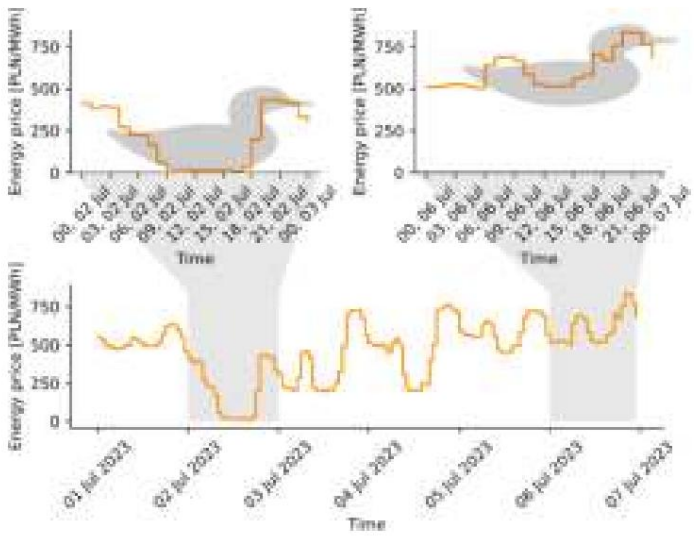


Figura 2. Fluctuación de los precios de la energía en el mercado del día siguiente [PLN/MWh] en el mercado polaco entre el 1 y el 6 de julio de 2023, siguiendo la 'curva pato' [5].

Machine Translated by Google

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2, se analizan los métodos tradicionales de control de plantas hidroeléctricas. En la Sección 3, profundizamos en las diferencias entre plantas convencionales y proconsumidoras. En la Sección 4, se construye un modelo dinámico de tiempo discreto de flujo de agua en un sistema de central hidroeléctrica múltiple y se describe un procedimiento para optimizar su operación. En la Sección 5, evaluamos el rendimiento del algoritmo para un amplio espectro de datos de prueba. Luego, analizamos las consideraciones de implementación en la Secc Finalmente, las conclusiones se extraen en la Sección 7.

2. Control de Centrales

Hidroeléctricas En la literatura las centrales hidroeléctricas (HPs) se clasifican en normales (>100 MW), medianas (<100 MW), pequeñas (<15 MW), mini (<1 MW), micro (<100 MW). kW), o pico (<5 kW) HP, aunque los valores reales varían según la región [6,7]. La mayor parte de la investigación se concentra en HP pequeñas, medianas y normales, que desempeñan un papel importante en el suministro de electricidad. En este artículo, debido a su importancia para los prosumidores, se investigan los micro y pico HP. Abarcan numerosos molinos anteriormente abandonados con pequeños estanques artificiales, pantanos y otras formaciones naturales, comúnmente conocidas como HP de pasada [8,9], por lo que requieren gastos de capital insignificantes para su implementación. Por ejemplo, actualmente en Polonia menos del 5% de las posibles instalaciones se utilizan para la producción de energía [10]. Además, numerosas publicaciones de servicios en línea muestran que los pico-HP se pueden implementar fácilmente sin equipo especializado [11]. Por lo tanto, el área objetivo del estudio realizado en este trabajo es importante. Por supuesto, un único depósito de prosumidores no cambia las reglas del juego. Sin embargo, un conjunto de HP proconsumidor orientado a los ingresos y programado de manera óptima puede constituir un sistema de almacenamiento de energía eficiente resistente a perturbaciones con bajos costos operativos. De hecho, circunstancias similares llevaron a la popularidad de las instalaciones fotovoltaicas, que se han convertido en un elemento común del panorama actual.

Sin embargo, existe una diferencia fundamental entre las instalaciones fotovoltaicas y HP. Las fotovoltaicas son independientes entre sí, mientras que el correcto funcionamiento de una HP depende de que todas las estaciones aguas arriba estén conectadas en cascada. En el pasado, la programación del funcionamiento de una cascada de HP se investigaba como un estudio de caso [12] en lugar de como un sistema en red sujeto a una acción de control, es decir, cada planta se ajustaba manualmente sin imponer un marco común. Si bien se puede definir un plan de programación adecuado de esta manera, es posible que no tenga en cuenta las condiciones operativas óptimas o represente un riesgo en términos de protección contra sequías e inundaciones. Otros enfoques consideran modelos simplificados, reduciendo la cascada a un caso de una sola planta [4], donde las presas están a poca distancia [8,13] o ubicadas en un río pero no en sus afluentes [9,14]. En [13] se ha propuesto una solución conceptualmente más cercana a la discutida aquí, aunque apunta a instalaciones grandes y concentradas y no a los HP distribuidos bajo la gestión del prosumidor.

Técnicamente, dirigir la producción de energía en una central hidroeléctrica no es un proceso complejo. Al elevar las presas, se limita el flujo de agua y, al bajarlas, se aumenta la generación de energía. Sin embargo, establecer la secuencia correcta de subida y bajada de los vertederos está lejos de ser obvio. Por lo general, la estrategia de programación se clasifica en largo plazo (1 a 5 años), mediano plazo (3 a 18 meses) y corto plazo (2 a 14 días) [15]. Sin embargo, en el caso de los HP prosumidores, tales estrategias son de utilidad limitada debido al pequeño volumen de los estanques. En el caso considerado, una estrategia de programación significativa debería abarcar unas pocas horas o, como máximo, un día. Además, debería centrarse en disminuir el desequilibrio entre generación y consumo por las tardes y las mañanas (Figura 2) o, de manera equivalente, aprovechar los precios fluctuantes del mercado resultantes de la disparidad entre las demandas previstas y reales [16] (Figura 1).

La programación óptima del problema de liberación de agua de HP se ha investigado durante mucho tiempo ([15,17] y las referencias allí contenidas). Sin embargo, en esos estudios, las HP se examinaron sólo en el contexto de protección contra inundaciones/sequías o de generación de energía. Aquí se explora una tercera función de los HP, es decir, el potencial de proporcionar un depósito de energía [2]. En lugar de centrarse sólo en la cantidad de electricidad generada, las HP pueden limitar el caudal del río cuando la energía es barata y aumentarlo cuando el precio aumenta, creando así un sistema eficiente.

Machine Translated by Google

amortiguador de energía. La cantidad total de energía generada seguirá siendo la misma, pero los ingresos del propietario de HP crecerán al aceptar los cambios a corto plazo en el perfil de precios. Al mismo tiempo, disminuye la fluctuación de la generación de energía de las centrales térmicas tradicionales . Una idea similar ha sido explorada en [18], pero está destinada a grandes instalaciones, no a las de prosumidor consideradas en este trabajo.

3. Plantas hidroeléctricas

Prosumer No todas las RSE son sensibles a la influencia de las fluctuaciones climáticas, por ejemplo, las hidroeléctricas geotérmicas, basadas en mareas o grandes y costosas [19]. Aquí, la atención se centra en instalaciones pequeñas y flexibles, es decir, micro- [6] y pico-HP [20]. Por lo general, se implementan como instalaciones de flujo fluvial [8,21], es decir, sin grandes represas ni embalses, y por lo tanto no tienen gastos significativos ni intrusión en el medio ambiente [21]. A diferencia de los HP más grandes, que no se ven afectados por las condiciones atmosféricas locales, ya que la cantidad de agua superior a las predicciones es insignificante en comparación con el volumen del embalse, el espacio de almacenamiento limitado de los micro y pico embalses los hace susceptibles a la variabilidad climática. Por ejemplo, una tormenta local puede llenar rápidamente el estanque cerca de un micro-HP, mientras que uno cercano tiene simultáneamente condiciones soleadas y secas. Hoy en día, la previsión de precipitaciones no es lo suficientemente precisa para hacer frente a este tipo de situaciones. Los modelos de escorrentía de agua tampoco son precisos [22]. Por lo tanto, cuando el clima es inestable, el cronograma de la planta debe recalcularse con frecuencia para ajustar el sistema a las circunstancias más recientes o a la variabilidad de precios en un mercado en equilibrio en tiempo real [16]. Al contrario de los enfoques de optimización numérica comúnmente utilizados, el algoritmo presentado en este manuscrito tarda una fracción de segundo en ejecutarse, incluso en un dispositivo de gama baja.

Un conjunto de HP utiliza el agua de plantas y afluentes aguas arriba. Por lo tanto, un control inadecuado puede provocar una inundación. Por lo tanto, es obligatorio sincronizar la operación de HP, teniendo en cuenta explícitamente

diversos factores: (1) Factor geográfico: la distancia entre las plantas y el consiguiente retraso del agua.
ter reflujo;

(2) Factor relacionado con el clima: el nivel de precipitación previsto y el nivel de incertidumbre;
(3) Factor orientado a la aplicación: el uso de la cascada HP como depósito de energía distribuida
combinado con la función común de generación de energía.

Habitualmente, el cronograma de control se establece mediante procedimientos de optimización numérica, incorporando técnicas de inteligencia artificial para abordar la carga computacional [15,17,21–29]. Sin embargo, estos procedimientos presentan problemas de solidez en el área de aplicación considerada, incluso en casos relativamente simples [29]. Además, la gran cantidad de tiempo que se necesita para llegar a una solución (utilizando recursos informáticos razonables) contradice la necesidad de adaptabilidad del plan, es decir, introducir cambios en el cronograma de control cuando el clima es inestable o ocurre un mal funcionamiento.

Para capturar los factores (1) a (3), la información sobre diferentes retrasos en los flujos de agua en los enlaces que conectan los embalses se incorpora explícitamente en el modelo dinámico construido en este trabajo. Utilizando la representación dinámica del sistema, se plantea un problema de optimización. Puede resolverse analíticamente si no hay saturación [30]. En cambio, aquí las restricciones naturales están integradas en la solución algorítmica. Esta propuesta aporta beneficios no sólo a los prosumidores al aumentar su beneficio económico, sino también a los operadores de la red eléctrica al reducir la variación de carga de las centrales eléctricas estándar.

4. Modelo del

sistema Habitualmente, el modelado HP se concentra en la optimización del trabajo de los generadores, ignorando el sistema de suministro [23]. En este caso, el generador se considera una caja negra y la atención se centra en las HP conectadas como sistema de suministro de agua. Un punto clave a considerar en un sistema de reflujo de agua es el tiempo no despreciable entre la emisión de la acción de control en un embalse antes de que influya en el nivel del agua en uno aguas abajo. Por lo tanto, a diferencia de los modelos anteriores de redes de almacenamiento, por ejemplo, [31], en el enfoque aquí defendido, se aplicarán los principios de control de los sistemas de almacenamiento con retardo de tiempo [32,33] . Sin embargo, lo

Machine Translated by Google

propuestos en [32,33] suponen un ajuste de control de tiempo continuo, lo cual es difícil de realizar en un sistema de control de agua debido a las características específicas de los componentes mecánicos que dirigen las presas de la presa. El modelo de este trabajo cubre explícitamente los efectos de un tiempo de muestra finito y se construirá directamente en el dominio del tiempo discreto.

4.1. Depósito de una sola

planta Consideremos el modelo de una sola HP como un elemento constitutivo del sistema ilustrado en la Figura 3. La dinámica del balance de agua en la planta se puede describir mediante la relación recursiva

$$sj(k + 1) = sj(k) - fj(k) + \sum_{\substack{i \\ \text{plantas} \\ \text{aguas arriba}}} fi(k - Tij) + rj(k), \quad (1)$$

dónde

- k [1, m] es un instante de tiempo y m es un horizonte de programación;
- sj (k) es la cantidad de agua almacenada en el depósito cerca de la planta j (en la Figura 3, la planta j = 3 se muestra en una vista ampliada); sj (k) abarca la construcción de hidroingeniería, así como los pantanos cercanos y áreas similares; • fj (k) es la cantidad de agua utilizada para impulsar los generadores de energía instalados en la presa j en el tiempo entre los instantes k y k + 1; rj (k) es el suministro de fuentes
- hidrológicas externas como la lluvia (y su escorrentía), el deshielo , los afluentes no controlados y la vaporización. Los valores de rj (k) se pueden obtener a partir de la previsión meteorológica y de los modelos hidrológicos dentro del horizonte de planificación de m períodos. rj (k) puede ser positivo (prevalencia de precipitación) o negativo (prevalencia de vaporización). Se supone que rj (k) es conocido en el modelo. Cuando el valor real de rj (k) difiere del pronóstico, el algoritmo se ejecuta nuevamente, lo que no implica cálculos complejos, como se analiza en la Sección 4.3.

Los afluentes abastecen al embalse con el agua que anteriormente utilizaban las plantas aguas arriba. El agua de la planta i aguas arriba llega a la planta j con un retraso Tij > 0. La duración del período Δk, es decir, el tiempo entre los instantes k y k + 1, se puede seleccionar arbitrariamente, pero según el ritmo de los cambios de precios, es razonable elegir entre 1 h y 15 min, dependiendo de las regulaciones locales. De manera similar, el horizonte de planificación m puede cubrir una ventana de 24 h de precios de energía conocidos (el mercado del día siguiente). Se supone que se conocen el caudal inicial fj (k ≤ 0) y el nivel de agua inicial sj (0). La condición terminal sj (m) se puede seleccionar arbitrariamente.

Los ingresos de la planta obtenidos en un período se pueden calcular como

$$Jj(k) = \eta j \, pj(k) fj(k) \Delta k, \quad (2)$$

dónde

- pj (k) es el precio de la energía en el instante k. El hecho de que todas las HP estén conectadas al mismo sistema no induce el mismo perfil de precios para cada planta j. Los propietarios pueden tener contratos con diferentes empresas, utilizar tarifas diferentes o tener ellos mismos patrones de consumo diferentes;
- ηj es la eficiencia de los generadores de energía, incorporando el impacto de la altura de la presa. Para los generadores prosumidores de las tierras bajas, el caudal de 1 m3/s corresponde a una generación de energía de 5 a 7 kW.

Machine Translated by Google

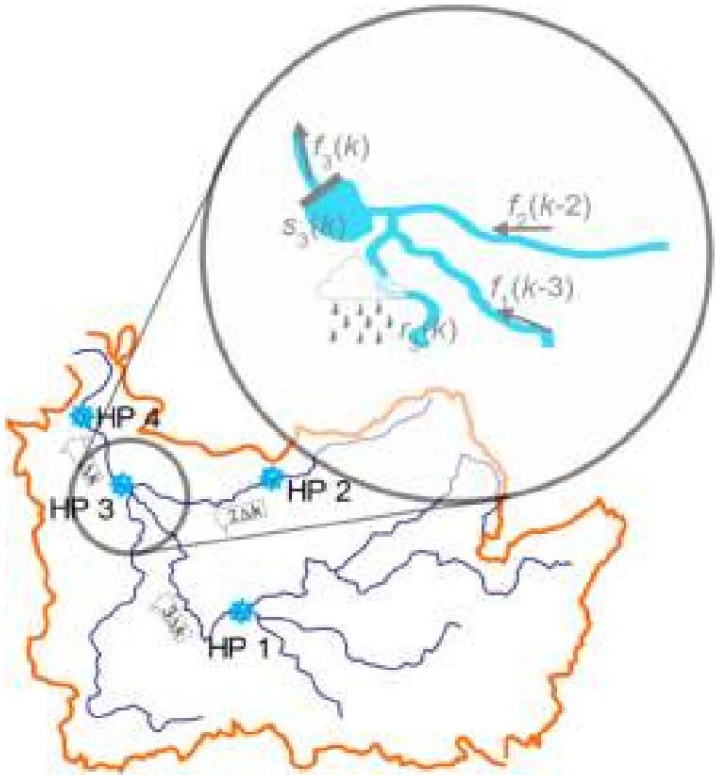


Figura 3. Modelo de centrales hidroeléctricas conectadas en una cuenca hidrográfica. La planta 3 (ampliada) es suministrada por el entradas de los embalses 1 y 2 con retrasos indicados por flechas gruesas (Δk—período de muestreo) y Fuentes exógenas, por ejemplo, lluvia o afluentes en el sur. La cantidad de agua entregada a la planta. de estas fuentes dentro de Δk en el instante k es f 1 (k − 3), f 2 (k − 2) y r3 (k), respectivamente. la salida de los generadores de la presa en la planta 3 es f 3 (k). La diferencia de flujo de entrada y salida se amortigua en el estanque, cuyo volumen de agua actual se denota por s3 (k).

4.2. Depósito multiplanta

Al igual que la energía fotovoltaica, a medida que crece el número de HP, aumenta su impacto en la red. Una colección de pico y micro HP puede constituir un gran depósito de energía distribuido.

En el caso de n centrales eléctricas en la misma cuenca hidrográfica, las variables del modelo se agrupan en vectores:

$$s(k) = \begin{bmatrix} T1(k) \\ s2(k) \\ \vdots \\ sn(k) \end{bmatrix}, f(k) = \begin{bmatrix} f1(k) \\ f2(k) \\ \vdots \\ fn(k) \end{bmatrix}, r(k) = \begin{bmatrix} r1(k) \\ r2(k) \\ \vdots \\ rn(k) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

donde s(k) es el vector del nivel del agua del embalse, f(k) es el vector de los volúmenes de agua en los flujos entre embalses y r(k) es el vector de los volúmenes de agua de fuentes exógenas, respectivamente.

Derivado de (1), la dinámica del sistema en red se describe mediante

$$s(k+1) = s(k) + \sum_{t=0}^{t} \Theta t f(k-t) + r(k), \quad (4)$$

donde T es el retardo máximo, y las matrices Θt agrupan la información sobre la geotopología gráfica y retrasos de flujo. $\Theta t = \theta ij_{n\times n}$ con θij = 1, si el flujo desde el embalse j llega al depósito i con un retraso t, de lo contrario, es 0. Θ0 describe el flujo de salida de el sistema. A diferencia de [13], aquí la distancia entre plantas no es despreciable. Para el En el ejemplo de la Figura 3, el retraso más largo T = 3 (el flujo entre los depósitos 1 y 3) y

Machine Translated by Google

$$\Theta 0 = \begin{matrix} -1\ 0 & 0\ 0\ 0 \\ 0\text{-}1\ 0 & \\ 0\ 0\ -1\ 0 & \\ 0\ 0 & 0\text{-}1 \end{matrix}, \Theta 1 = \begin{matrix} 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 1\ 0 \end{matrix}, \Theta 2 = \begin{matrix} 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 1\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \end{matrix}, \Theta 3 = \begin{matrix} 0\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \\ 1\ 0\ 0\ 0 \\ 0\ 0\ 0\ 0 \end{matrix}. \quad (5)$$

Para el sistema multiplanta, el índice de calidad (2) se convierte en

$$j = \sum_{k=1}^{\text{corto}} jj = \sum_{k=1j}^{\text{corto}} \sum_{=1}^{\text{metro}} Jj(k) = \sum_{k=1j}^{\text{corto}} \sum_{=1}^{\text{metro}} \eta j\ pj(k)fj(k)\Delta k. \quad (6)$$

Las partes interesadas tienden a tener objetivos contrastantes. Los prosumidores intentan maximizar mientras que los operadores de la red quieren maximizar J. Una forma conveniente de conciliar sus intereses Jj es un sistema de precios. El algoritmo presentado en la última parte de este artículo satisface los objetivos tanto de los propietarios de la planta como de la red.

4.3. Algoritmo de control

El principal desafío para resolver el problema (6) se relaciona con la complejidad de la dinámica del sistema que se origina por la presencia de un retraso no despreciable en (4). Una dificultad adicional surge de las restricciones físicas impuestas a las variables f(k) y s(k)

$$\begin{matrix} {}^{mín.}_{f\,j} \le fj(k) \le f\ mjáx\ , \\ {}^{j,k}_{j,k}{}^{mín}_{j} \quad {}^{s}_{} \le sj(k\ ) \le sj \quad {}^{máximo\ .}_{} \\ sj(m) = Sj\ , \\ {}_{j} \end{matrix} \quad (7)$$

donde Sj es un valor terminal elegido arbitrariamente.

Como se indicó anteriormente, los solucionadores estándar no son sólidos en la clase de problemas considerados aquí [15,17,21–29]. Por lo tanto, para abordar los aspectos computacionales, se aplica un procedimiento de optimización mínimo-máximo de tres pasos esbozado en la Figura 4 . Cada paso del algoritmo se explica a continuación. La comunicación entre HP se ajusta al conocido estándar de la industria Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) [34], que proporciona seguridad y sincronización entre los controladores de la planta.

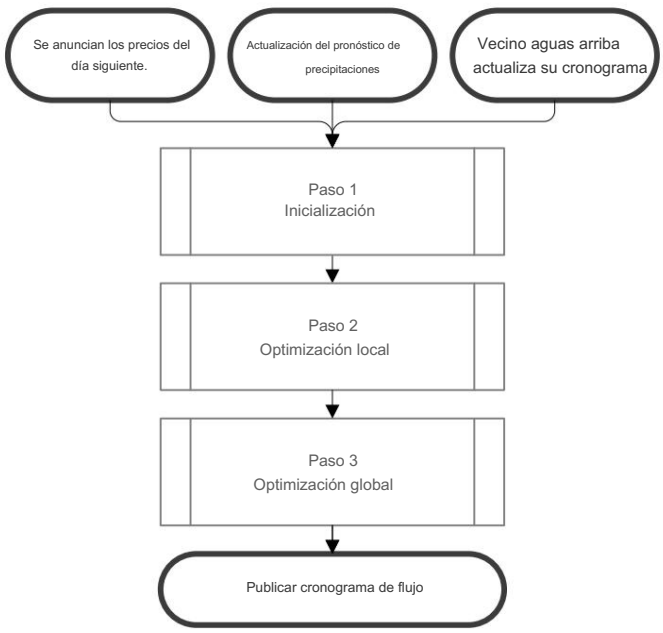


Figura 4. Diagrama de flujo del algoritmo.

Machine Translated by Google

Paso 1, inicialización:

Entrada: perfil de precios.

Resultado: cronograma preliminar de flujo de agua.

Objetivo: Determinar los intervalos de acumulación y ganancias dentro del período de tiempo considerado, como se muestra en la Figura 5. Cuando los precios de la energía están por encima del promedio, entonces es hora de ganar dinero (intervalo de ganancias). En caso contrario se debe almacenar el agua (intervalo de acumulación). En el primer caso, f(k) = f max, y en el último caso, f(k) = f para cada k en el intervalo respectivo. Como resultado, para la planta j, se obtienen períodos hj con longitud mjpf. Dado que los HP se gestionan de forma independiente debido a diferentes tarifas o demandas, el patrón de segmentación puede diferir para cada HP. De cualquier manera, este paso no implica cálculos complejos. La aproximación obtenida en el Paso 1 puede resultar en cruzar los límites de s(k) definidos en (7).

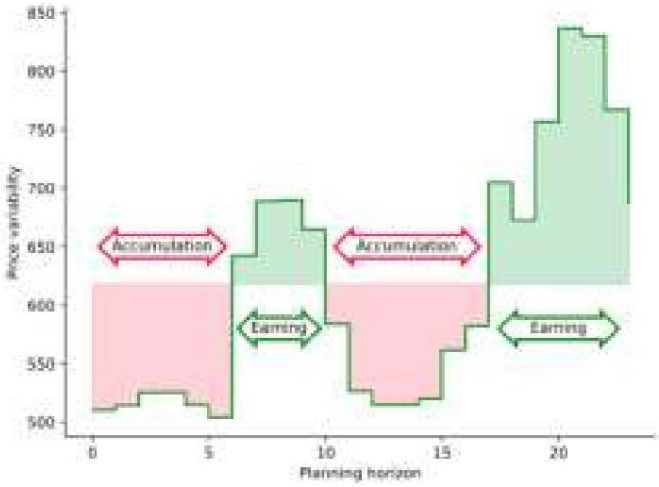


Figura 5. Ilustración del Paso 1: identificación de intervalos de acumulación y ganancias para el perfil de precios a partir del 6 de julio. Los períodos marcados afectan la versión del Paso 2 del algoritmo presentado.

Paso 2, optimización local:

Entrada: perfil de precios y cronograma de flujo de agua preliminar calculado en el Paso 1, así como el flujo de entrada (es decir, lluvia prevista, flujo de afluentes, el cronograma de las plantas aguas arriba) al sistema.

Resultado: programa de flujo optimizado localmente. El resultado no cruza los límites definidos en (7).

Objetivo: Buscar el flujo óptimo dentro de cada periodo encontrado mediante la ejecución del Paso 1.

Dado que existen dos tipos de períodos, es razonable dividir el Paso 2 en consecuencia.

Paso 2a (intervalo de acumulación): Si, para cualquier k, sj (k) > sj max, significa que el flujo de agua está demasiado restringido. Así, la entrada de agua inunda el estanque. Por lo tanto, es deseable encontrar el instante k* con el precio más alto dentro del intervalo nj e incrementar el flujo en sj (k*) − sj max, pero no por encima de fj max. Este paso se repite hasta que se cumple la condición sj (k) ≤ sj máximo para todo k en el intervalo investigado.

Paso 2b (intervalo de ganancia): Si, para cualquier k, sj (k) < sj min, significa que el flujo es excesivo. Por lo tanto, se debe encontrar un instante k* con el precio más bajo en este intervalo y restringir el flujo mínimo por sj que se satisface para todo k en el intervalo investigado. mín. − sj (k*) pero no por debajo de fj min. Este paso se repite hasta que se cumpla la condición sj (k) ≥ sj

El paso 2 se ejecuta para cada HP, comenzando por los anteriores. El número máximo m2 de iteraciones ∑ para cada HP j, que es lo suficientemente bajo como para funcionar en tiempo real, incluso para jp. un sistema a gran escala. El paso 2 se ilustra en la Figura 6. Después de los cálculos, se obtiene la máxima ganancia posible dentro de cada intervalo.

Machine Translated by Google

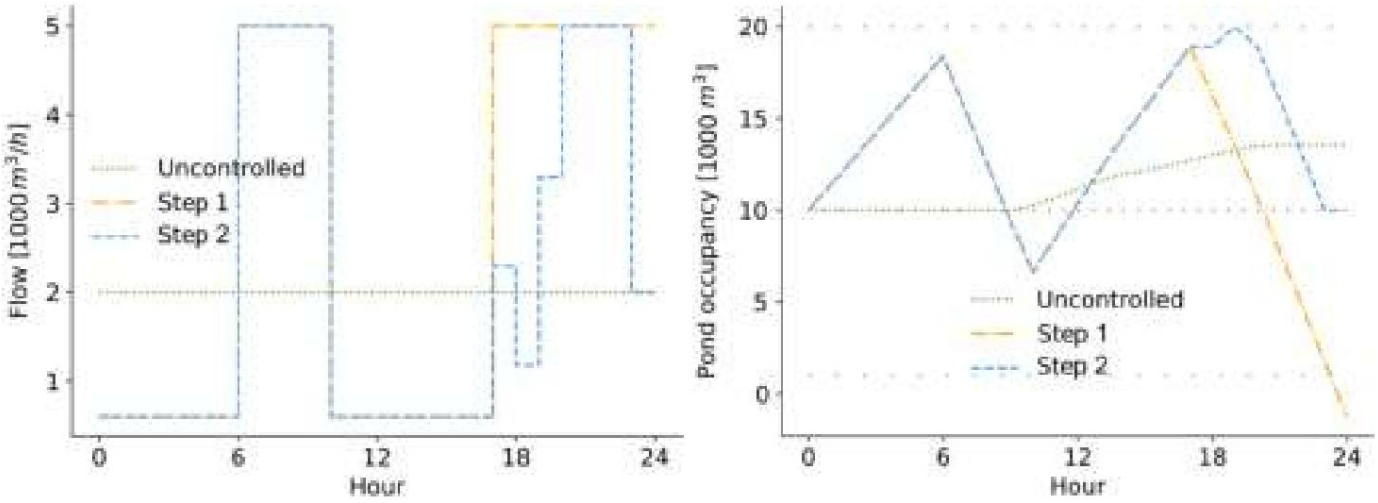


Figura 6. Intensidad del flujo obtenida en el Paso 2 para el patrón de la Figura 5. No se requiere ninguna acción durante los primeros 3 períodos. En el último período, se viola la condición terminal s(m) , por lo que es necesario restringir el flujo.

Paso 3, optimización global:

Entrada: perfil de precios y programa de flujo de agua optimizado localmente calculado en el Paso 2.

Resultado: cronograma de flujo optimizado globalmente.

Objetivo: Reprogramar el caudal de agua dentro de todo el horizonte de optimización.

El paso 2 da como resultado el flujo óptimo dentro de cada intervalo de ganancia/acumulación y garantiza que se cumpla la condición (7) para cada intervalo nj . Posiblemente haya margen para mejorar globalmente el rendimiento del sistema. Al observar los eventos ilustrados en la Figura 6, se puede observar que en las horas 0 a 19, la ocupación del estanque crece de manera no monótona hasta que el depósito se llena. Los intervalos de llenado y vaciado están delimitados por los instantes en que el estanque se satura. La reprogramación dentro de estos intervalos no influye en el volumen final de los embalses, por lo que es posible aumentar el caudal cuando la energía es cara y disminuirlo en el mismo valor cuando el precio de la energía es menor.

El número máximo de iteraciones en el Paso 3 es similar a los del Paso 2. El resultado de En la Figura 7 se muestra un ejemplo del Paso 3 .

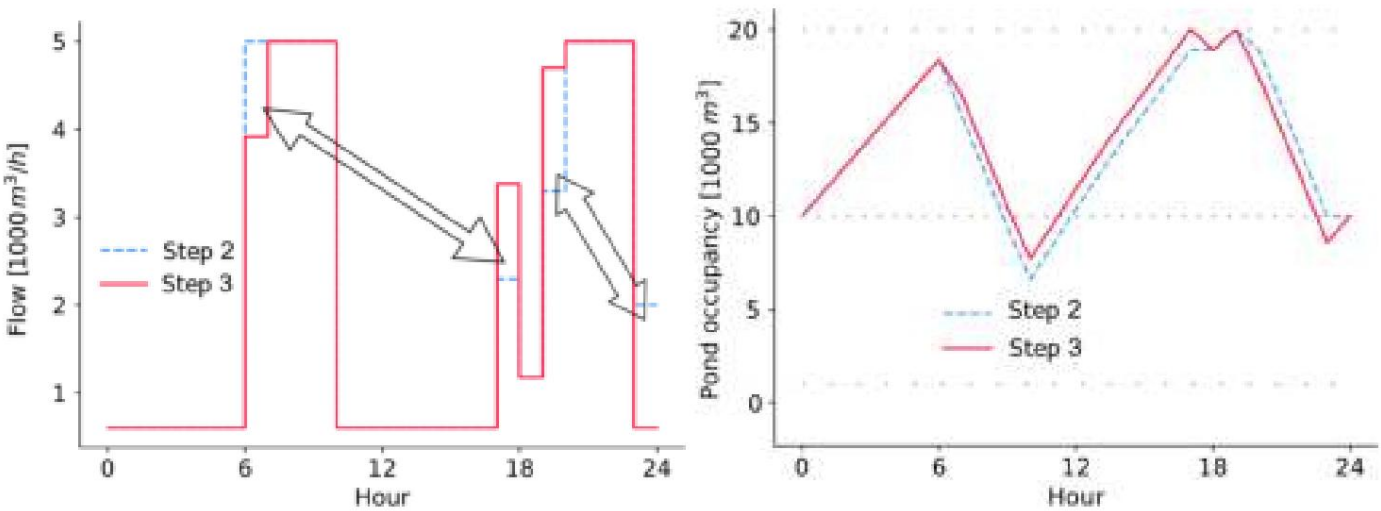


Figura 7. Resultado del Paso 3 yuxtapuesto con el resultado del Paso 2 (Figura 6). Las flechas marcan el volumen de agua reprogramado.

Machine Translated by Google

Consideraciones finales

El algoritmo se ejecuta siempre que los valores de entrada cambian, por ejemplo, cuando se anuncian nuevos precios de energía o se obtiene una actualización del pronóstico del tiempo rj (k) . Los resultados deben transmitirse a todos los propietarios interesados en la red de HP porque el paso 2 del algoritmo necesita los resultados de las plantas anteriores. El algoritmo se puede ejecutar localmente utilizando hardware económico, por ejemplo, un microcontrolador.

5. Evaluación

La topología de cuatro nodos de la Figura 3 se utilizó para la evaluación del algoritmo. Es lo suficientemente simple como para ilustrar las propiedades del algoritmo y al mismo tiempo cubrir los principales desafíos de una red HP prosumidor que se origina en una topología arborescente y un retraso no despreciable entre las plantas. No se supone una gestión común: los prosumidores toman las decisiones de control en sus plantas independientemente unos de otros. Sólo es necesaria la difusión de las decisiones de control. Las regulaciones formales pueden hacer cumplir esto fácilmente.

El algoritmo de la Sección 4 se probó utilizando diversos perfiles de precios tomados de [5], incluidos los ilustrados en la Figura 2, en presencia de una ola en movimiento de lluvia intensiva y la escorrentía correspondiente representada en la Figura 8. Los cálculos se ejecutaron para cada perfil. y diferentes volúmenes de estanques. En todos los casos, un flujo exógeno de intensidad constante f(k) = [2, 3, 5, 5] × 103 [m3/h] abastece el sistema. Otros parámetros del sistema son = [0,5, 0,6, 1, 1] × 103 [m3/h], s(0) = s(m), f^{max} tomado como = [5, 6, 10, 10] × 103 [m3/h], $f^{mín.}$ s^{min} = 0,1 × s(0), s = 2 × s(0), con el nivel de agua inicial s(0) fijado de la siguiente manera: máximo

Escenario 1 (embalses de pequeño tamaño): s(0) = s(m) = [0,5, 0,75, 1,25, 1,25] × 104 [m3];

Escenario 2 (embalses de tamaño mediano): s(0) = s(m) = [1, 1,5, 2,5, 2,5] × 104 [m3];

Escenario 3 (grandes embalses): los HP están conectados a lagos artificiales más grandes con una probabilidad insignificante de saturación, s(0) = s(m) = [2, 3, 5, 5] × 104 [m3].

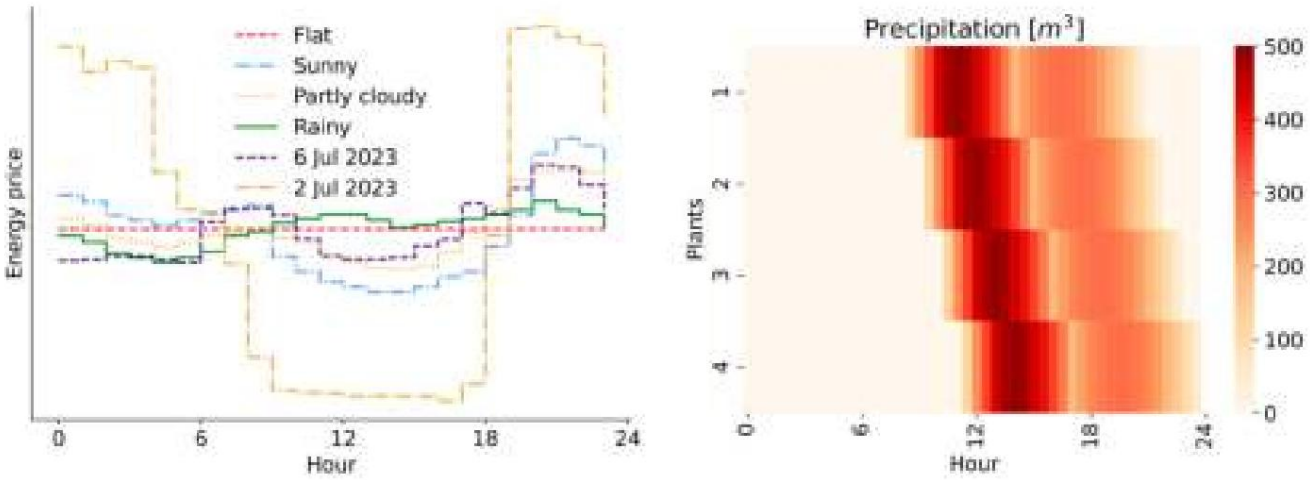


Figura 8. Ejemplos de perfiles de precios escalados al mismo patrón de precipitación promedio y supuesto con escorrentía utilizada para validar los resultados. f_{tt}

Si bien el algoritmo no espera ninguna relación específica entre los perfiles de precios, en aras de la legibilidad, todos los HP comparten los mismos datos. Por esa razón, la potencia de la turbina también se toma como una función lineal de la intensidad del flujo f_j nj (fj (k)) = const.

La Tabla 1 resume la ganancia del prosumidor y la recompensa general del operador de la red. La ganancia se establece respecto del caso en que los HP no estén controlados. La f_f discrepancia en el estado final bajo flujo libre se repone o libera al precio promedio.

Machine Translated by Google

Tabla 1. Ganancia de ganancias [%] con respecto al flujo libre [m3] para los perfiles de precios de la Figura 7 y diferentes Tamaños de los yacimientos.

Perfil	Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Todas las plantas	Estanques	Observación
de pequeño volumen (Escenario 1)							
Soleado	10,85	11,80	10,98	6,74	9,71		
Parcialmente nublado	4,52	4,80	6,95	1,69	4,44		
Lluvioso	2.54	2.41	6.62	198,52	34,55		Cuando la Planta 4 queda sin control, entonces el la producción cae por debajo del mínimo durante 5 h.
6 julio 2023	10,13	10,35	13,39	28,16	17.30		
2 de julio de 2023	29,25	33,81	59,53	46,64	47.30		
Estanques de volumen medio (Escenario 2)							
Soleado	20.13	19.38	15,91	11,44	15,65		
Parcialmente nublado	11,98	12.07	13,86	38.17	21.29		Cuando la Planta 4 queda sin control, entonces el la producción cae por debajo del mínimo durante 3 h.
Lluvioso	9.31	11.37	17.44	65,61	33.05		Cuando las Plantas 3 y 4 quedan sin control, entonces el La producción cae por debajo del mínimo durante 5 h. (ambas), y la Planta 3 sufre una inundación durante 2 h.
6 julio 2023	14.47	13.77	14.25	49,92	25.15		Cuando la Planta 4 queda sin control, entonces el la producción cae por debajo del mínimo durante 4 h.
2 de julio de 2023	68,50	68,34	69,79	82,83	74.03		Cuando la Planta 4 queda sin control, entonces el la producción cae por debajo del mínimo durante 2 h.
Estanques de gran volumen (Escenario 3)							
Soleado	21.04	20,82	19,52	16,15	18,86		
Parcialmente nublado	14.73	14,72	14.43	19.43	16,76		Cuando la Planta 4 queda sin control, entonces el la producción cae por debajo del mínimo durante 1 h.
Lluvioso	6,93	6,79	6,61	5,78	6.41		
6 julio 2023	15,39	15,18	13,83	12,36	13,82		
2 de julio de 2023	59,52	56,83	80,13	65,47	67,83		

Los datos mostrados en la Tabla 1 revelan que cuanto mayor sea el volumen del estanque, mayores serán las ganancias. obtenido. Sin embargo, con el algoritmo propuesto aplicado, incluso para yacimientos pequeños, la El beneficio monetario relativo alcanza varias docenas y crece con la variabilidad de los precios, aunque no linealmente. Los datos también muestran que pequeños cambios en rj (k) o pj (k) pueden conducir a una discrepancia en el resultado. La ganancia crece cuando aumenta la distancia entre los HP, lo que se atribuye a una diferencia mayor entre pj (k) y pj (k − Tij). Cabe resaltar que el algoritmo tiende a llenar los estanques a precios bajos alrededor de la medianoche pero no permite por inundaciones. Este comportamiento es ventajoso ya que los estanques contribuyen a la humedad del suelo, por lo que aliviar el problema de las sequías persistentes en varias regiones.

El algoritmo opta por la intensidad de flujo máxima o mínima f(k) en lugar de los intermedios. Esta propiedad facilita la construcción y el mantenimiento de turbinas al aumentando la eficiencia en las condiciones nominales.

Los resultados obtenidos utilizando el algoritmo propuesto, resumidos en la Tabla 1, son mucho más mejores que los obtenidos mediante algoritmos de optimización estándar [29]. Es más, todos los Los HP aguas abajo están protegidos de inundaciones y sequías que de otro modo serían comunes (Escenario 2).

El mercado de equilibrio puede generar ganancias adicionales tanto para los prosumidores como para la red. operadores [16]. Cuando el operador de la red al que está conectada la red del prosumidor detecta una falta de energía, puede provocar una liberación inmediata de agua o, por el contrario, limitar la flujo en caso de excedente.

6. Aspectos de implementación

Antes de la implementación, se deben considerar algunos aspectos más:

1. Cuestiones legales. El despliegue del sistema requiere el consentimiento del regulador de recursos hídricos y los acuerdos correspondientes de los operadores de la red.
2. Intercambio de información. El algoritmo diseñado requiere una comunicación confiable plataforma entre las plantas prosumidoras. Proponemos MQTT [35] para este propósito.

Machine Translated by Google

3. Previsión meteorológica. Actualmente, los pronósticos para el día siguiente no son lo suficientemente precisos como para predecir tormentas locales con varias horas de anticipación. Sin embargo, las imágenes basadas en radar proporcionan estimaciones exhaustivas de las precipitaciones en un plazo de unas pocas horas.
4. Los depósitos como sistema en tiempo real. El controlador de cada HP funciona independientemente de los demás. Por lo tanto, el sistema es potencialmente propenso a fenómenos desfavorables provenientes de sistemas distribuidos como acometidas o interbloqueos. El protocolo MQTT resuelve este problema sin aumentar la carga computacional, ya que el cálculo del cronograma toma solo una fracción de segundo y las actualizaciones de pronóstico son poco frecuentes.
5. Los depósitos como sistema de control. El sistema opera en circuito abierto. Las actualizaciones del cronograma solo afectan a los HP posteriores. El sistema es estable de entrada limitada y salida limitada (BIBO).
6. Seguridad. La plataforma de comunicación propuesta cumple con la alta seguridad de la industria. normas [35].
7. Recursos computacionales. El algoritmo propuesto no requiere recursos informáticos de alto nivel para su ejecución. Opera y se comunica de manera eficiente en dispositivos económicos y de gama baja.

7. Conclusiones

Este artículo presenta una estrategia óptima para controlar un sistema de HP conectados, formando un depósito de energía distribuida y sustentable. Un sistema de este tipo beneficia tanto a los operadores de la red eléctrica, al reducir las fluctuaciones en la carga de la red, como a los propietarios de las plantas, al aumentar sus ingresos. Se puede implementar con bajos gastos operativos y de capital. Además, al frenar la escorrentía de las precipitaciones, el sistema eleva la resiliencia a inundaciones y sequías de la zona, lo cual es de suma importancia ante el cambio climático. El algoritmo de control no asume el mismo patrón de precios ni el mismo horizonte de programación utilizado por los diferentes actores. Los propietarios de HP no están obligados a cooperar; sólo necesitan transmitir sus decisiones de control a los vecinos. A diferencia del adverso “ combate de inversores” fotovoltaico [35], la cooperación entre prosumidores en el esquema propuesto aumenta sus ganancias. Además, a diferencia de los HP bombeados, la acumulación de energía no genera costos adicionales, por lo que incluso pequeñas variaciones de precio permiten aumentar lo

El algoritmo presentado funciona mejor que los procedimientos de optimización clásicos en términos de estabilidad numérica y robustez [29]. Puede implementarse con recursos informáticos insignificantes y activarse de forma asincrónica en los HP. Si bien el ingreso final depende del clima, la precisión de los pronósticos, la variabilidad de los precios de la energía y otras condiciones externas, el aumento en comparación con un caso no controlado cae en el rango del 20 al 70% y debería crecer con el impacto de las RSE, especialmente las fotovoltaicas. y RSE eólicas.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, MM y PI; metodología, MM; software, MM; validación, MM y PI; análisis formal, MM y PI; investigación, MM; recursos, MM y PI; curación de datos, MM y PI; redacción: preparación del borrador original, MM; redacción: revisión y edición, PI; visualización, MM y PI; supervisión, IP; administración de proyectos, PI; adquisición de financiación, PI
Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Este trabajo se realizó en el marco del proyecto no. 2021/41/B/ST7/00108: “Soluciones de control robustas para flujos en red multicanal”, financiado por el Centro Nacional de Ciencias de Polonia.

Declaración de disponibilidad de datos: Todos los datos están disponibles públicamente [5].

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses. Los financiadores no tuvieron ningún papel en el diseño del estudio; en la recopilación, análisis o interpretación de datos; en la redacción del manuscrito; o en la decisión de publicar los resultados.

Referencias

1. Kolosok, S.; Bilán; Vasylieva, T.; Wojciechowski, A.; Morawski, M. Una revisión del alcance de la energía renovable, la sostenibilidad y la ambiente. Energías 2021, 14, 4490. [CrossRef]

Machine Translated by Google

2. Rahman, MM; Oni, AO; Gemechu, E.; Kumar, A. Evaluación de tecnologías de almacenamiento de energía: una revisión. Conversaciones de energía. Gestionar. 2020, 223, 113295. [Referencia cruzada]

3. Wirfs-Brock, J. IE Preguntas: ¿Por qué California intenta decapitar al pato? 2014. Disponible en línea: https://insideenergy.org/2014/10/02/ie-preguntas-por-por-que-california-está-intentando-decapitar-al-pato/ (consultado el 12 de mayo de 2023).

4. Borkowski, D.; Cholewa, D.; Korze ´n, A. Un sistema híbrido de batería hidro-fotovoltaica de pasada como proveedor de energía para cargas locales. Energías 2021, 14, 5160. [CrossRef]

5. PSE. Precios de la energía en el mercado. Disponible en línea : https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-rb/raporty-dobowe-z-funkcjonowania-rb/podstawowe-wskazniki-cenowe-i-kosztowe/rynkowa-cena-energii-elektrycznej-rce (consultado el 1 de agosto de 2023).

6. Anaza, SO; Abdulazeez, MS; Yisah, YA; Yusuf, YO; Salawu, BU; Momoh, SU Microgeneración de energía hidroeléctrica: una Descripción general. Soy. J. Ing. Res. 2017, 6, 5-12.

7. Sachdev, H.; Akella, Alaska; Kumar, N. Análisis y evaluación de pequeñas centrales hidroeléctricas: un estudio bibliográfico. Renovar. Sostener. Energía Rev. 2015, 51, 1013–1022. [Referencia cruzada]

8. Yiwei, Q.; Jin, L.; Liu, F.; Dai, N.; Canción, Y.; Chen, G.; Ding, L. Regulación terciaria de la energía hidroeléctrica de pasada en cascada en el sistema de energía renovable insular considerando dinámicas de múltiples escalas de tiempo. Renovación IET. Generador de energía. 2021, 15, 1778–1795.

9. Jamali, S.; Jamali, B. Funcionamiento óptimo de los sistemas hidroeléctricos en cascada: implicaciones para los sistemas hidroeléctricos del Gran Karun de Irán. Aplica. Ciencia del agua. 2019, 9, 66. [Referencia cruzada]

10. Wyszkowski, K.; Piwowarek, Z.; Pałejko, Z. Małe Elektrowne Wodne w Polsce. Informe técnico, ONU Global. 2022. Disponible en línea: https://ungc.org.pl/wp-content/uploads/2022/03/Raport_Male_elektrownie_wodne_w_Polsce.pdf (consultado el 1 de junio de 2024). (En polaco).

11. YouTube. Canal General de Constricción. 2024. Disponible en línea: https://www.youtube.com/watch?v=MBDV_Xj6Dj8 (accedido el 1 de junio de 2024).

12. Energía hidroeléctrica de la AIE. Modelos de Gestión de Embalses Hidroeléctricos en Cascada, Recopilación de Casos. Informe técnico. 2021. Disponible en línea: https://www.ieahydro.org/media/02e6ec8e/EAHydro_AnnexXIV_Management%20Models%20for%20Hydropower% 20Cascada%20Reservorios_CASE%20COMPILATION.pdf (consultado el 1 de junio de 2024).

13. Yu, Y.; Wu, Y.; Sheng, Q. Estrategia de programación óptima de centrales hidroeléctricas en cascada en el mercado conjunto de energía diaria y regulación de frecuencia. Acceso IEEE 2021, 9, 87749–87762. [Referencia cruzada]

14. Zhang, H.; Chang, J.; Gao, C.; Wu, H.; Wang, Y.; Lei, K.; Largo, R.; Zhang, L. Operación de las plantas hidroeléctricas Cascade considerando demandas ecológicas integrales de agua. Conversaciones de energía. Gestionar. 2019, 180, 119-133. [Referencia cruzada]

15. Thaeer Hammid, A.; Awad, OI; Sulaimán, MH; Gunasekaran, SS; Mostafa, SA; Manoj Kumar, N.; Khalaf, Licenciado en Letras; Al-Jawhar, YA; Abdulhasan, RA Una revisión de los algoritmos de optimización para resolver problemas de programación de generación hidroeléctrica. Energías 2020, 13, 2787. [CrossRef]

16. Mielczarski, W. Sistemas y mercados de energía; Asociación de Ingenieros Eléctricos Polacos: Warszawa, Polonia, 2018.

17. Singh, VK; Singal, S. Operación de centrales hidroeléctricas: una revisión. Renovar. Sostener. Energía Rev. 2017, 69, 610–619. [Referencia cruzada]

18. Li, J.; Zhao, Z.; Li, P.; Mahmud, MA; Liu, Y.; Chen, D.; Han, W. Evaluaciones integrales de beneficios para la integración fuera del río Almacenamiento hidráulico por bombeo y fotovoltaico flotante. Conversaciones de energía. Gestionar. 2023, 296, 117651. [Referencia cruzada]

19. Wijesinghe, A.; Lai, L. Análisis y desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas. En Actas de la Cuarta Conferencia Internacional sobre Desregulación y Reestructuración de Servicios Eléctricos y Tecnologías Energéticas (DRPT) de 2011, Weihai, China, 6 a 9 de julio de 2011; págs. 25-30.

20. Khomsah, A.; Laksono, AS Pico-hidro como energía renovable: recursos naturales locales y disponibilidad de equipos en los esfuerzos por generar electricidad. Conferencia de la PIO. Ser. Madre. Ciencia. Ing. 2018, 462, 012047. [Referencia cruzada]

21. Anderson, D.; Moggridge, H.; Warren, P.; Shucksmith, J. Los impactos de la energía hidroeléctrica de pasada en el entorno físico y ecológico. condición de los ríos. Entorno de agua. J. 2015, 29, 268–276. [Referencia cruzada]

22. Nguyen, A.; Vu, V.; Hoang, D.; Nguyen, T.; Nguyen, K.; Nguyen, P.; Ji, Y. Modelo de conjunto atencional para una predicción precisa del nivel de agua y descarga con mejora de datos de entrenamiento. Ing. Aplica. Artif. Intel. 2023, 126, 107073. [Referencia cruzada]

23. Álvarez, G. Un modelo de optimización para operaciones de centrales hidroeléctricas a gran escala. IEEE Lat. Soy. Trans. 2020, 18, 1631–1638. [Referencia cruzada]

24. Shaw, AR; Sawyer, H.; LeBoeuf, E.; McDonald, M.; Hadjerioua, B. Optimización de la energía hidroeléctrica utilizando modelos sustitutos de redes neuronales artificiales de un modelo de hidrodinámica y calidad del agua de alta fidelidad. Recurso Acuático. Res. 2017, 53, 9444–9461. [Referencia cruzada]

25. Ahmadianfar, I.; Samadi-Koucheksaraee, A.; Asadzadeh, M. Extraiga reglas operativas no lineales de sistemas de yacimientos múltiples utilizando un método de optimización eficiente. Ciencia. Rep. 2022, 12, 18880. [CrossRef]

26. Bernardes, J., Jr.; Santos, M.; Abreu, T.; Prado, L., Jr.; Miranda, D.; Julio, R.; Viana, P.; Fonseca, M.; Bortoni, E.; Bastos, GS Optimización de la operación hidroeléctrica mediante aprendizaje automático: una revisión sistemática. AI 2022, 3, 78–99. [Referencia cruzada]

27. Marcelino, CG; Leite, GMC; Delgado, CADM; de Oliveira, LB; Wanner, EF; Jiménez-Fernández, S.; Salcedo-Sanz, S. Un enfoque evolutivo multiobjetivo eficiente para resolver la operación de programación de sistemas multiembalses en centrales hidroeléctricas. Sistema experto. Aplica. 2021, 185, 115638. [Referencia cruzada]

28. Linke, H. Un controlador predictivo de modelo para la utilización óptima de la energía hidroeléctrica de embalses fluviales. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE 2010 sobre Aplicaciones de Control, Yokohama, Japón, 8 a 10 de septiembre de 2010; págs. 1868–1873.

29. Morawski, M.; Ignaciuk, P. Equilibrio del presupuesto de energía en instalaciones de plantas de agua para consumidores con consideración explícita del retraso del flujo. IFAC-PapersOnLine 2023, 56, 11748–11753. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

30. Ignaciuk, P.; Morawski, M. Control óptimo de plantas hidroeléctricas en cascada como depósito de energía distribuida orientada al prosumidor. Energías 2024, 17, 469. [Referencia cruzada]

31. Danielson, C.; Borrellia, F.; Oliver, D.; Anderson, D.; Phillips, T. Control de flujo restringido en redes de almacenamiento: capacidad Maximización y equilibrio. Automática 2013, 49, 2612–2621. [Referencia cruzada]

32. Cuenca, MV; Guerra-Avellaneda, F.; Shtessel, YB Problema de gestión de existencias: continuo convergente adaptativo de tiempo fijo diseño del controlador. Traducción IEEE. Sistema. Hombre Cibernético. Sistema. 2020, 50, 4974–4983. [Referencia cruzada]

33. Ignaciuk, P. Compensación de tiempos muertos en sistemas de inventario de productos perecederos de revisión continua con múltiples alternativas de suministro. J. Control de procesos 2012, 22, 915–924. [Referencia cruzada]

34. Sengul, C. Perfil de autenticación y autorización para entornos restringidos (ACE) de transporte de telemetría de colas de mensajes (MQTT) y seguridad de la capa de transporte (TLS); RFC 9431. 2023. Disponible en línea: https://datatracker.ietf.org/ documento/rfc9431/ (consultado el 1 de junio de 2024).

35. Gu, Y.; Verde, estabilidad del sistema de energía TC con una alta penetración de recursos basados en inversores. Proc. IEEE 2023, 111, 832–853. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Aceleración de redes neuronales energéticamente eficientes utilizando la mayoría Multiplicador aproximado guiado por bits significativo

Pengfei Huang, Bin Gong, Ke Chen * y Chenghua Wang

Facultad de Ingeniería Electrónica y de la Información, Universidad de Aeronáutica y Astronáutica de Nanjing, No. 29 Jiangjun Avenue, Distrito de Jiangning, Nanjing 210016, China; pfhuang@nuaa.edu.cn (PH); bingong@nuaa.edu.cn (BG); chwang@nuaa.edu.cn (CW)
* Correspondencia: chen.ke@nuaa.edu.cn

Resumen: Las crecientes demandas computacionales del aprendizaje profundo y los modelos a gran escala han llevado a un aumento significativo en el consumo de energía, lo que destaca la necesidad urgente de diseños de hardware más eficientes energéticamente . Este estudio presenta una nueva estrategia de aproximación de peso diseñada específicamente para redes neuronales cuantificadas (NN), que da como resultado el desarrollo de un multiplicador aproximado eficiente que aprovecha el cambio del más significativo (MSO). En comparación con los multiplicadores aproximados logarítmicos energéticamente eficientes y los multiplicadores aproximados no logarítmicos con prioridad de precisión, nuestro diseño de tipo logarítmico propuesto logra un equilibrio incomparable entre precisión y costos de hardware. En comparación con el multiplicador exacto de referencia, nuestro diseño innovador muestra reducciones notables, que abarcan una disminución de hasta un 28,31 % en el área, una notable reducción del 57,84 % en el consumo de energía y una disminución del 11,86 % en el retraso. Los resultados experimentales revelan que el multiplicador propuesto, cuando se aplica en redes neuronales, puede conservar aproximadamente el 60 % de la energía sin comprometer la precisión de la tarea. Al mismo tiempo, los experimentos centrados en el acelerador del transformador y el procesamiento de imágenes ilustran los ahorros sustanciales de energía que se pueden obtener para los modelos de lenguaje grande (LLM) y las tareas de procesamiento de imágenes mediante la implementación de nuestro diseño propuesto, validando aún más su eficacia y practicidad.

Palabras clave: computación aproximada; modelo de lenguaje grande; multiplicador de coeficiente; multiplicador logarítmico

check for updates

Cita: Huang, P.; Gong, B.; Chen, K.; Wang, C. Aceleración de redes neuronales con eficiencia energética utilizando el multiplicador aproximado guiado por bits más significativo. Electrónica 2024, 13, 3034. https://doi.org/10.3390/electrónica13153034

Editores académicos: Ke Xie, Shoue Chen y Xiaolong Wang

Recibido: 5 de julio de 2024
Revisado: 30 de julio de 2024
Aceptado: 31 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

El campo de la inteligencia artificial ha experimentado avances significativos, en particular con la aparición de redes neuronales profundas (DNN) y modelos de lenguaje grande (LLM). Sin embargo, estos modelos sofisticados han introducido considerables desafíos computacionales y de memoria, derivados de sus tamaños cada vez mayores, como se analiza detalladamente en [1]. Estos desafíos son aún más graves para los dispositivos de borde, que están limitados por limitaciones inherentes asociadas con su potencia computacional. Para permitir el despliegue práctico de redes neuronales (NN) en plataformas perimetrales, se han presentado como soluciones factibles diversas técnicas de compresión de modelos basadas en software , como la cuantificación y la pod

Además, los esfuerzos recientes que aprovechan el paradigma de computación aproximada (AxC) a nivel de circuito han demostrado de manera convincente su capacidad para mejorar el rendimiento del sistema [2]. Esta mejora es el resultado de la reducción de la complejidad computacional y las demandas de memoria, lograda mediante la sustitución de elementos aritméticos precisos por sus equivalentes menos precisos. Las operaciones clave de los procesadores aritméticos (es decir, la multiplicación y la suma) impactan significativamente su consumo total de energía. En particular, la multiplicación consume más energía que la suma. El cálculo aritmético central realizado dentro de los NN es la operación de multiplicación y acumulación (MAC). A medida que un acelerador NN realiza millones de operaciones de multiplicación, los multiplicadores aproximados (AM) han atraído una amplia atención de la investigación debido a su considerable importancia en términos de mejorar la eficiencia y precisión de las aplicaciones de redes neuronales [3–5].

Machine Translated by Google

Investigaciones anteriores sobre multiplicadores aproximados personalizados para DNN han arrojado resultados alentadores con respecto a la eficiencia [6]. En el caso de implementar NN en dispositivos de borde con recursos limitados, el empleo de multiplicadores aproximados proporciona un medio atractivo para lograr un equilibrio entre precisión y costo de energía. Este logro se basa en aliviar y relajar los estrictos requisitos para obtener resultados de multiplicación perfectamente precisos, facilitando así la creación de diseños de hardware aproximados que ahorren más recursos y energía. El estudio en [7] demostró la eficiencia de AxC en DNN mediante la presentación de una nueva capa de AxC DNN que incorpora multiplicadores aproximados en el proceso de diseño de DNN. En [8], se propusieron tres multiplicadores híbridos aproximados empleando puertas NAND en lugar de puertas AND y aplicando diferentes combinaciones de compresores para proporcionar diversas compensaciones entre precisión y eficiencia del hardware. En [9] se sugirió un diseño de multiplicador aproximado adaptable de código abierto, impulsado por la distribución de entrada y la polaridad, para generar multiplicadores aprox El propósito es minimizar el cuadrado promedio del error absoluto de un multiplicador aproximado basado en las distribuciones de probabilidad de los operandos extraídos de la aplicación de destino, teniendo en cuenta la polaridad de entrada. En [10], se introdujo una metodología para diseñar multiplicadores de matriz aproximados aprovechando el concepto de desestimación de acarreo. Al seleccionar estratégicamente las posiciones para ignorar el acarreo, resulta factible ignorar una pequeña cantidad de acarreos, logrando así una mayor velocidad y un área reducida y, al mismo tiempo, mantener una precisión general superior y garantizar la idoneidad para la aplicación prevista.

Los multiplicadores logarítmicos aproximados proporcionan un diseño más simple pero conducen a una pérdida de precisión notablemente mayor, mientras que los multiplicadores no logarítmicos aproximados demuestran un error computacional menor a costa de una mayor complejidad del diseño [11]. Para abordar la necesidad de reducir el consumo de energía y al mismo tiempo mantener una pérdida de precisión aceptable, este estudio propone un multiplicador de cambio unidireccional (MSAM) más eficiente energéticamente.

El MSAM puede obtener una variedad de diseños de multiplicadores altamente eficientes configurando dinámicamente el factor de aproximación (k) y el factor de precisión (m). Al aprovechar el factor de aproximación (k), el multiplicador se divide estratégicamente en submultiplicadores exactos y aproximados. Dentro de la región de aproximación, se aplica el principio del multiplicador de coeficiente constante reconfigurable (RCCM) [12] , sustituyendo las operaciones de multiplicación convencionales por operaciones de desplazamiento, suma y resta. Este artículo de revista se basa y amplía nuestro artículo de conferencia anterior [13], ofreciendo varias diferencias clave y contribuciones novedosas. A continuación se proporciona un resumen de estos avances: • Diseñamos una estrategia de aproximación alternativa y más agresiva para el proceso

de aproximación del multiplicador, ampliando los límites de las compensaciones entre precisión y eficiencia. • Además, llevamos a cabo un análisis de errores exhaustivo y analizamos exhaustivamente

compensaciones entre la precisión y el consumo de energía.

• Además de analizar conjuntos de datos populares, también exploramos el procesamiento de imágenes utilizando diferentes

esquemas AxC. • Las ventajas de nuestros diseños de multiplicadores aproximados propuestos se fundamentan mediante un análisis teórico riguroso y extensas demostraciones experimentales.

El resto de este documento está estructurado de la siguiente manera: en la Sección 2, se ofrece una revisión concisa de los antecedentes y el trabajo relacionado. La Sección 3 detalla nuestra metodología innovadora para la aceleración de redes neuronales con eficiencia energética, incorporando un multiplicador aproximado dinámico guiado por bits más significativo para mejorar significativamente el rendimiento. En la Sección 4, se proporcionan un análisis de errores y resultados de simulación. Finalmente, la Sección 5 concluye el artícu

2. Preliminares

Un multiplicador logarítmico (LM) convierte números en formato binario a formato logarítmico, facilitando la transformación de la multiplicación a la suma. El algoritmo de Mitchell fue propuesto inicialmente en [14]. Dados dos números binarios A y B, donde A = 2 k1 (1 + x1)

Machine Translated by Google

y B = 2 k2 (1 + x2), el multiplicador logarítmico los convierte inicialmente en sus valores logarítmicos formas de la siguiente manera:

$$\log2 (A \cdot B) = \log2 (2\ k1+k2\ (1 + x1)(1 + x2)) = (k1 + k2) + \log2 (1 + x1) + \log2 (1 + x2), \quad (1)$$

donde k1 y k2 denotan las posiciones del bit más significativo (con un valor de 1) en los operandos A y B, respectivamente, y x1 y x2 representan las partes fraccionarias de A y B (x1, x2 [0, 1]) . En el algoritmo de Mitchell, cuando 0 ≤ x < 1, la expresión log2 (1 + x) es aproximadamente igual a x. Por tanto, el logaritmo del producto se puede expresar. como sigue:

$$\log2 (A \cdot B) \approx k1 + k2 + x1 + x2. \quad (2)$$

El multiplicador logarítmico abarca varios componentes cruciales: detectores de uno inicial (LOD), convertidores logarítmicos, un sumador y un convertidor antilogarítmico. Los LOD tienen la tarea de identificar el bit más significativo dentro de los números binarios de entrada. Posteriormente, los convertidores logarítmicos generan las representaciones logarítmicas de estos números binarios. Estos valores logarítmicos se suman para obtener el producto, que luego se decodifica nuevamente en un número binario utilizando el convertidor antilogarítmico.

3. El multiplicador aproximado de desplazamiento unidireccional más significativo propuesto

En este estudio, presentamos un multiplicador aproximado de desplazamiento unidireccional muy significativo que emplea un enfoque similar a logarítmico. Este novedoso multiplicador logra una precisión mejorada al tiempo que mantiene costos de hardware comparables o incluso inferiores a los de los multiplicadores logarítmicos aproximados tradicionales.

3.1. La arquitectura del diseño

Las operaciones fundamentales en redes neuronales (NN) implican multiplicaciones, específicamente la multiplicación de pesos w por activaciones x. La arquitectura para una NN que utiliza el multiplicador aproximado de desplazamiento unidireccional (MSAM) más significativo propuesto se ilustra en la Figura 1. El MSAM comprende principalmente dos componentes centrales: un submultiplicador aproximado (ASM) y un submultiplicador exacto (ESM), mejorado con palancas de cambio y sumadores auxiliares para un diseño estructural sencillo y coherente. Específicamente, el peso w se divide en dos partes según el significado de sus bits: los bits más significativos forman wH, procesados por el ESM, mientras que los bits menos significativos son manipulados para formar w procesados por el ASM. Posteriormente, se desplaza el resultado del ESM y se realiza una operación de suma para generar el resultado final r.

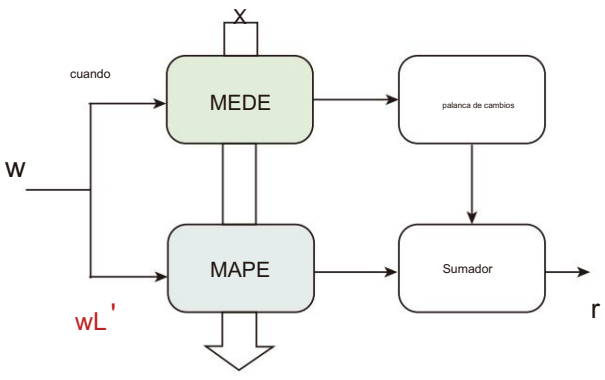


Figura 1. La arquitectura del diseño de bloque de multiplicador aproximado de desplazamiento unidireccional (MSAM) más significativo .

Se emplea un convertidor de signos similar al de [15] para extender el MSAM para que admita números con signo, como se ilustra en la parte izquierda de la Figura 2. La característica interna del bloque MSAM también se presenta en la Figura 2. Introducimos dos parámetros fundamentales factores que confieren el atributo de configurabilidad dinámica al multiplicador, atendiendo a una diversa

Machine Translated by Google

gama de requisitos de precisión que pueden fluctuar en diversos contextos de aplicación. El primero es el factor de aproximación, denominado k, que se utiliza para dividir el multiplicador. Esta operación de partición separa el multiplicador de n bits en dos segmentos distintos: k bits de orden inferior y (n − k) bits de orden superior. Este esquema de partición descompone efectivamente una operación de multiplicación solitaria en dos procesos multiplicativos discretos que involucran el multiplicando y dos multiplicadores con anchos de bits más pequeños. En segundo lugar, el factor de precisión, denominado m, se incorpora dentro de la estrategia de aproximación que rige el ASM y desempeña un papel crucial al facilitar ajustes de precisión configurables dentro del alcance del submultiplicador.

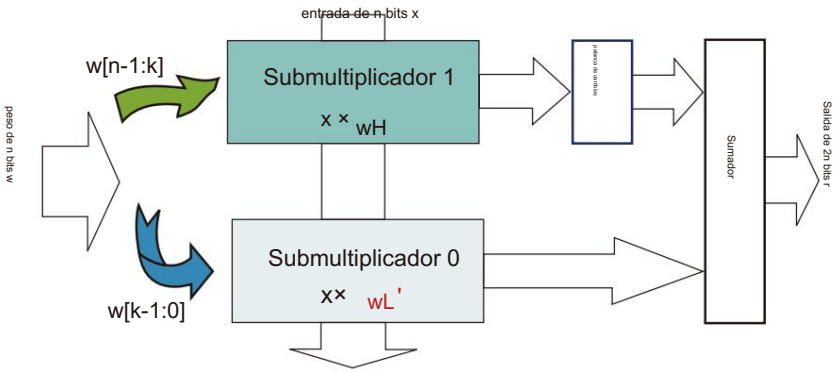


Figura 2. Ampliación del enfoque propuesto para admitir números con signo, incluida la característica interna del bloque MSAM.

3.2. Las estrategias propuestas de aproximación dinámica del peso

Para lograr un equilibrio entre eficiencia computacional y precisión en el diseño MSAM, introducimos múltiples estrategias de aproximación de peso diseñadas para el componente ASM , basadas en los principios fundamentales del multiplicador logarítmico (LM) y el multiplicador de coeficiente constante reconfigurable (RCCM). diseño. Estas estrategias tienen como objetivo adaptarse a diversos requisitos de aplicaciones y optimizar el rendimiento en diferentes condiciones, abarcando la transformación de operaciones de multiplicación en operaciones aritméticas más simples, como desplazamientos, sumas o restas. Mientras tanto, el componente ESM sigue técnicas de multiplicación precisas y convencionales para garantizar un cálcu Para garantizar una suma acumulativa precisa, la salida generada por el ESM se somete a una secuencia de operaciones de cambio para alinearla con la salida del ASM. Esta alineación es crucial para el proceso de suma acumulativa, que en última instancia determina el resultado final del bloque MSAM. Al combinar estas distintas estrategias en los componentes ASM y ESM, nuestro objetivo es optimizar el rendimiento general del diseño MSAM.

El valor de activación x sirve como multiplicando, mientras que el peso w asume el papel de multiplicador en la operación de multiplicación dentro de una red neuronal (NN). Para optimizar el submultiplicador aproximado (ASM) para redes neuronales, proponemos un método que divide los pesos del modelo en distintos rangos de datos y aproxima los pesos dentro de estos rangos como valores constantes. Esta colección de valores constantes aproximados, denotada como W', corresponde efectivamente al conjunto de coeficientes constante C empleado en el marco RCCM [12]. Una diferencia fundamental es que el conjunto propuesto W' requiere la determinación de sólo una constante inicial, w'_0, mientras que las constantes restantes del conjunto se deducen con respecto a esta constante inicial. Además, esta innovadora estrategia de aproximación de peso permite la selección dinámica de valores constantes aproximados apropiados basados en el más significativo (MSO) en los datos de peso de entrada.

3.2.1. Estrategia de aproximación dominante (OEA)

El proceso de aproximación de un solo multiplicador (w) utilizando el método propuesto se muestra en la Figura 3. La detección del uno inicial (LOD) se utiliza para detectar el más significativo (MSO) del multiplicador w. Una vez que se identifica el MSO, los bits siguientes (m − 1)

Machine Translated by Google

se establecen en 1, mientras que los bits restantes se establecen en 0. Si la posición del MSO está en el bit mso-ésimo (contando desde 0, donde mso es el índice del bit MSO), todos los números dentro del rango de w [2 mso, 2mso+1 − 1] se aproximan como un valor constante de uno, según la Ecuación (3).

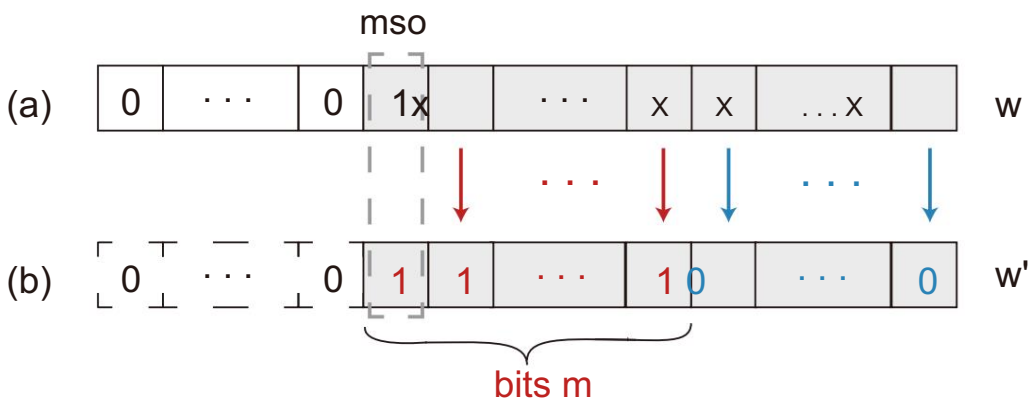


Figura 3. Ejemplo del proceso de aproximación dominante del multiplicador uno: (a) número original; (b) número aproximado.

$$w' = \begin{cases} w_0, & ms < m \\ o \sum_{i=mso-m+1}^{mso} 2^i, & mso \geq m. \end{cases} \quad (3)$$

El valor de w_0' está determinada por el factor m. Por ejemplo, cuando m = 1, w_0' se establece en 1b; mientras tanto, cuando m = 2, w se establece en 11b. En este método de aproximación, el multiplicador se divide dinámicamente en intervalos de rango de datos separados según la posición del MSO en los datos de entrada. Luego, estos intervalos se aproximan utilizando un conjunto de coeficientes constantes.

Nos referimos a m como factor de precisión, ya que controla el número de intervalos de aproximación.

La selección de m bits consecutivos a partir del MSO y su establecimiento en 1 se basa en dos razones principales. En primer lugar, esto permite establecer una conexión entre este grupo particular de valores aproximados y el coeficiente constante aproximado inicial w a través de una sucesión de operaciones de cambio. Como resultado, al ofrecer una constante inicial aproximada de 0 w, podemos reconstituir efectivamente las salidas de la multiplicación de los coeficientes restantes en relación con la entrada x. Este método agiliza significativamente la implementación del hardware y reduce la complejidad. En segundo lugar, una elección sensata de w_0' y confiando en el producto de x y w_0', las constantes aproximadas cerca del valor promedio dentro de cada intervalo de peso, maximizando así la precisión del multiplicador. En esencia, permite que las constantes aproximadas graviten hacia el valor central del rango de peso individual, mejorando así la precisión general de la arquitectura multiplicadora.

3.2.2. Estrategia de aproximación dominante cero (ZAS)

En la estrategia de aproximación dominante anterior, todos los m bits que comienzan desde la posición MSO se establecen en 1 por una razón importante: este número aproximado de m bits debe parecerse mucho al valor promedio de todos los números de k bits. Sin embargo, en el caso extremo donde m = k, el número aproximado se vuelve el mayor, en lugar de aproximarse al valor medio. Para resolver este dilema, proponemos una estrategia alternativa de aproximación dominante cero, como se ilustra en la Figura 4. Inmediatamente después de la posición del MSO, no todos los bits restantes se establecen en 1. En cambio, el primer bit inmediatamente después de la posición del MSO se establece en 1. establecido en 0, y el resto de esos bits se establecen en 1. Esto evita efectivamente el problema de números aproximados excesivamente grandes al tiempo que garantiza la proximidad al valor medio. Con un 0 actuando como separador, esto también permite la aplicación razonable de técnicas de descarte de acarreo [10], reduciendo así la latencia y el consumo de energía.

Machine Translated by Google

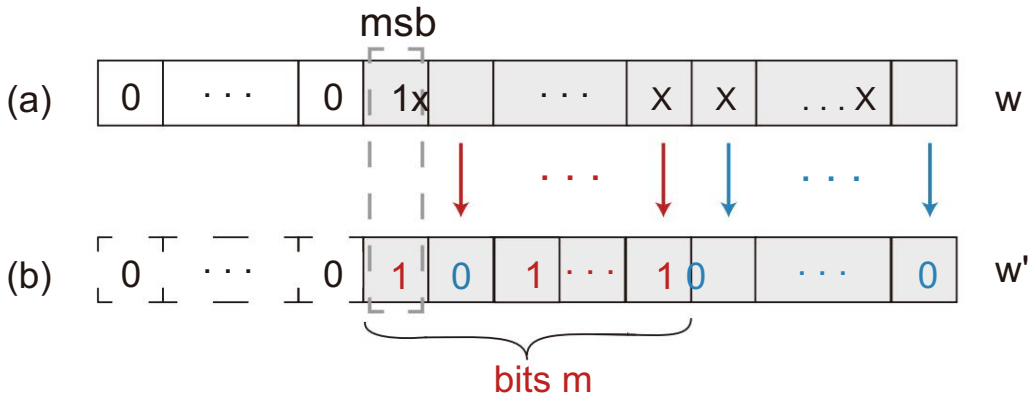


Figura 4. Ejemplo del proceso de aproximación dominante cero del multiplicador: (a) número original y (b) número aproximado.

3.2.3. Compensación por la estrategia de aproximación dominante cero

Para aprovechar mejor las ventajas de la aproximación, normalmente no elegimos m = k. Empíricamente, establecer m ≤ log2 (k) + 1 tiende a proporcionar un equilibrio favorable entre energía Beneficios de consumo y precisión.

Como se muestra en la Tabla 1, en términos del enfoque MSAM-42 (es decir, k = 4 y m = 2), el El resultado promedio obtenido con la OEA es ligeramente mayor que la mediana, mientras que el promedio El resultado con el ZAS es significativamente menor que la mediana.

1 Tabla 1. Resultados obtenidos con MSAM-42 utilizando diversas estrategias de aproximación.

Los k bits (Ingrese w[3 : 0])	Uno dominante Aproximación	Dominación cero Aproximación	Compensación por Dominación cero
0000	0000	0000	0000
0001 0010 0011	0011	0010	0101
0100 0101 0110 0111	0110	0100	0101
1001 1010 1011 1100 1101 1110 1111	1100	1000	1010

[1] MSAM-42 indica que el factor aproximado k es 4 y el factor de precisión correspondiente m es 2.

Aunque esto puede reducir mejor el consumo de energía, también puede generar un consumo excesivo. errores. Para lograr un mejor equilibrio en este sentido, introducimos un esquema de compensación para mitigar errores y garantizar que la precisión general no se vea comprometida notablemente. Como se muestra en la Figura 5, considerando que el número aproximado con ZOS es probable más pequeño que el real, mediante la adición de una compensación adicional de 1 después del bit m, Podemos reducir efectivamente la distancia de error mientras que el consumo de energía adicional es esencialmente insignificante.

Machine Translated by Google

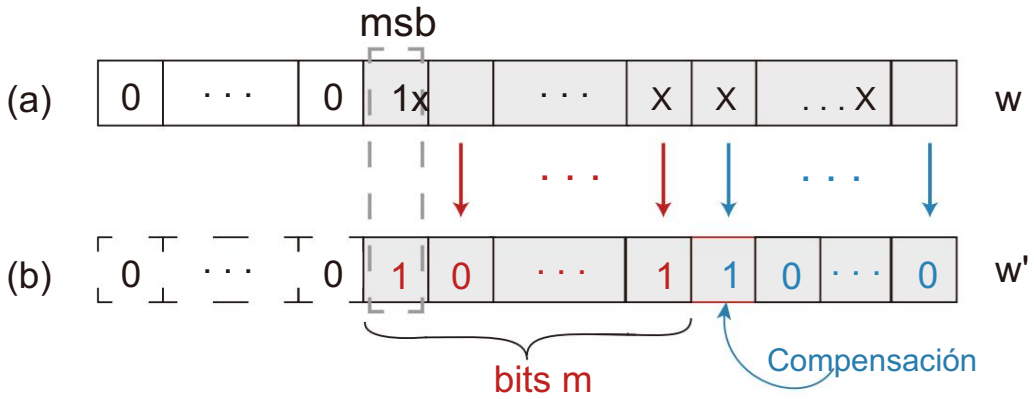


Figura 5. Ejemplo de aproximación dominante cero multiplicador con proceso de compensación: (a) número original y (b) número aproximado.

3.3. Implementación del Diseño de Hardware

El núcleo de la excelencia del diseño de MSAM reside en su cuidadosa gestión del ASM, ya que el perfeccionamiento de su hardware afecta directa y significativamente al consumo total de energía de la unidad multiplicadora.

Como se ilustra en la Figura 6, el proceso comienza con una serie de operaciones de desplazamiento y suma , generando conjuntamente el producto del multiplicando x y la sustitución específica de acuerdo con los factores k y m. La posición (pos) del valor w para W 0 L un bit significativo dentro del peso de señal gobierna el cambio entrada wL, identificado por el detector principal (LOD), establece la señal de control para el multiplexor posterior (MUX). Esta Posteriormente, el multiplexor se utiliza para generar la salida r0 para el módulo de submultiplicador aproximado (ASM). Mientras tanto, el MEDE presenta un enfoque preciso de la multiplicación. Con el tiempo, el resultado del ESM sufre una sucesión de operaciones de cambio y luego se fusiona con el resultado del ASM, generando en última instancia el resultado final del MSAM.

Para dar cabida a operaciones con signo, la arquitectura MSAM se puede aumentar mediante la integración de circuitos de conversión de signos antes y después de las operaciones sin signo, como se muestra en la Figura 2. Estos circuitos emplean el complemento y ejecutan una operación OR con una lógica 1b en el bit menos significativo, sirviendo como una aproximación a la negación cuando se trata de entradas negativas.

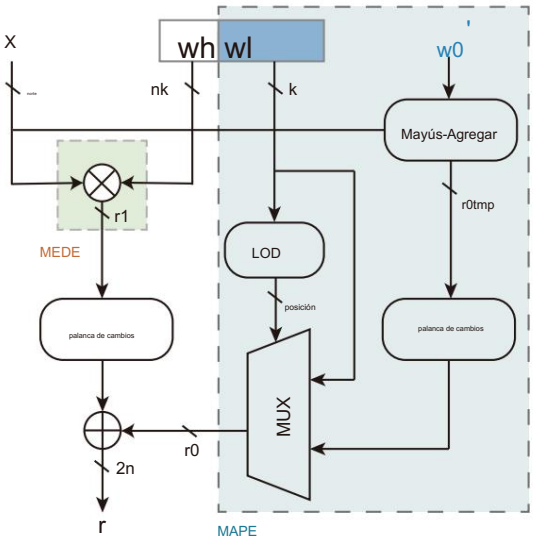


Figura 6. Implementación del diseño de hardware de MSAM.

Machine Translated by Google

4. Resultados y discusión

Nuestro diseño MSAM propuesto se implementa utilizando Verilog HDL, junto con otros multiplicadores aproximados avanzados. Los diseños fueron sintetizados utilizando el Synopsys. Design Compiler (DC) con tecnología CMOS de 28 nm y se realizó la simulación utilizando aproximadamente 1.000.000 conjuntos de números aleatorios, cubriendo todo el espacio de entrada de multiplicadores 8 × 8 (65.536 combinaciones) a una frecuencia de reloj de 200 MHz. El VCS La herramienta se utilizó para la simulación, generando archivos de actividad de conmutación anotados hacia atrás. para facilitar el análisis de poder. La métrica NMED se empleó para cuantificar el error de los diseños propuestos, que se evalúan exhaustivamente en todo el espacio de entrada utilizando datos distribuidos uniformemente. Los MSAM sin firmar propuestos se compararon con Mitch-w [14], DR-ALM-7 [15], DRUM6 [16] y AxRM2 [17], mientras que los MSAM firmados se compararon con Mitch-w [14], DR-ALM-7 [15], C-SSM (m = 4) [18] y Aprox-Booth [19]. Para comparaciones claras y convenientes, MSAM hace referencia al uso de OSA estrategia de aproximación, MSAMZ indica el uso de la estrategia de aproximación ZSA, y MSAMC denota ZSA con compensación adicional.

Las abreviaturas utilizadas en este manuscrito se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Abreviaturas para diseños de multiplicadores aproximados.

Multiplicador	Técnicas	Descripción
Exacto	-	Multiplicador exacto.
MSAM-km	tipo logarítmico	El multiplicador aproximado de desplazamiento unidireccional más significativo propuesto bajo factores aproximados k y factores de precisión m variables.
Mitch-w [14]	logarítmico	Multiplicador logarítmico aproximado sin signo de Mitchell con operando de bits w.
Mitch-w [14]	logarítmico	Multiplicador logarítmico aproximado con signo de Mitchell con operando de bits w.
DR-ALM-7 [15]	logarítmico	Multiplicador logarítmico sin signo no iterativo aproximado con operando de bits Li (Li = 7).
DR-ALM-7 [15]	logarítmico	Multiplicador logarítmico con signo aproximado no iterativo con operando de bits Li (Li = 7).
TAMBOR6 [16]	logarítmico	Multiplicador imparcial con k(k = 6) bits en la operación del líder.
AxRM2 [17]	No logarítmico	Multiplicadores recursivos aproximados utilizando bloques de construcción de alto rendimiento.
C-SSM (m = 4) [18]	No logarítmico	Multiplicador segmentado estático aproximado con un segmento contiguo de m bits (m = 4).
Cabina aproximada [19]	No logarítmica	Multiplicador de cabina radix-4 aproximado de bajo costo con Diseños simplificados de compresores y codificadores.

4.1. Análisis de errores

Los aceleradores de aprendizaje profundo que incorporan multiplicadores y sumadores aproximados tienen Se ha ideado para mitigar el consumo de energía y los retrasos, aunque con un compromiso aceptable en precisión [20]. Como principio general, un mayor grado de aceleración tiende a resulta en una mayor reducción de la precisión. Las características de error de un aproximado. El multiplicador (AM) generalmente se determina mediante simulaciones exhaustivas que abarcan todas las combinaciones de entradas imaginables o, alternativamente, mediante simulaciones de Monte Carlo que utilizar entradas aleatorias tomadas de una distribución predeterminada, como la normal o distribución uniforme.

Considere que M denota la salida del multiplicador aproximado y M representa la salida exacta. La distancia de error (ED) proporciona una medición precisa de la distancia absoluta diferencia entre estas dos salidas, que se formula como ED = |M − M |. El La distancia de error relativa (ROJA) expresa el error como un porcentaje relativo al resultado exacto. Además, la distancia media de error (MED) y la distancia media de error relativo (MRED) son métricas ampliamente utilizadas para evaluar la precisión de diseños aproximados. Además

Machine Translated by Google

Para MED y MRED, el MED normalizado (NMED) y el RED normalizado (NRED) son métricas estables que son independientes del tamaño de la implementación, lo que las hace valiosas para evaluar diseños aproximados de diferentes tamaños. Como se demuestra en [21], el NMED de un multiplicador aproximado (AM) tiene un impacto significativo en el error de salida de una neurona en una red neuronal, particularmente cuando se trata de una gran cantidad de entradas.

Para el MSAM especificado, con el valor de k permaneciendo constante y asegurando la coherencia del ancho de bits del operando para todas las operaciones, empleamos MRED y NMED, como dos métricas efectivas y ampliamente utilizadas, para evaluar el error introducido por el ASM. bloquear. Estas métricas sirven como medio indispensable para la evaluación de los errores inherentes al diseño propuesto, centrándose en diferentes configuraciones del factor de precisión m. La Figura 7 presenta las curvas MRED para valores k de 3, 4 y 5, trazadas frente a variaciones en el factor de precisión m, lo que permite identificar distintas tendencias dentro de las curvas. Para diferentes valores de k, el MRED alcanza su mínimo cuando m es 1 o 2. A diferencia de otros AM, en el diseño del MSAM, el factor de precisión m no es necesariamente mejor cuando es mayor. De hecho, cuando m excede log2 k + 1, un número excesivo de bits se establece en 1, lo que genera una desviación significativa en el valor aproximado del valor real. Además, una m mayor da como resultado que participen más bits en el cálculo, consumiendo así más energía. Vale la pena señalar que los resultados obtenidos de la métrica NMED se alinean estrechamente con estos hallazgos experimentales. En consecuencia, en análisis comparativos posteriores y exámenes detallados, priorizamos valores de m de 1 o 2. Esta elección estratégica se realizó con el objetivo de lograr un equilibrio óptimo en el diseño, conciliando efectivamente los requisitos de precisión y las consideraciones de costos generales de hardware.

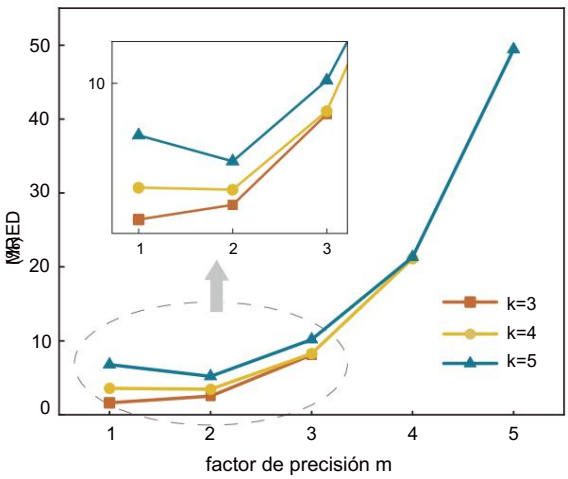


Figura 7. Curvas de distancia de error relativa media de MSAM bajo factores aproximados k y factores de precisión m variables.

4.2. Resultados de síntesis y simulación

Se evaluaron diversos multiplicadores MSAM-km , multiplicadores logarítmicos existentes y multiplicadores no logarítmicos avanzados para evaluar el rendimiento del hardware y las métricas de precisión.

En nuestro diseño de multiplicador aproximado, un operando se divide en dos componentes: ESM y ASM, controlados por el factor de aproximación k, que determina el número de bits aproximados. El factor de precisión m representa el grado de aproximación. El nivel de aproximación se rige principalmente por k; empíricamente, un k mayor conduce a un mayor grado de aproximación, un diseño más simple y un menor consumo de energía, mientras que un k menor da como resultado una menor aproximación y un menor ahorro de energía. El parámetro m decide cómo se manejan los k bits aproximados. Una m mayor retiene más bits, pero es importante tener en cuenta que esto no significa conservar los bits precisos originales; en cambio, utiliza m bits de todos unos. Por lo tanto, una m mayor no necesariamente se traduce en una mayor precisión. Estadísticamente, una m más cercana a k tiende a hacer que k se aproximen a todos los unos, lo que lleva a una menor precisión. D

Machine Translated by Google

resultados experimentales y análisis estadístico, un valor razonable para m es alrededor de log2(k), acercando m a la media de todos los números de k bits. La introducción de los parámetros k y m permite ajustar el diseño para lograr el equilibrio deseado entre precisión y eficiencia energética. Sin embargo, estos parámetros adicionales pueden requerir una evaluación meticulosa. consideración y optimización durante la fase de diseño para garantizar un rendimiento óptimo.

Los multiplicadores logarítmicos ofrecen un menor consumo de energía pero sacrifican la precisión. Nuestro El diseño mitiga esto al proporcionar un nivel de precisión más alto mientras mantiene un nivel más bajo. consumo de energía que los multiplicadores no logarítmicos. Una comparación de NMED y el El producto de retardo de potencia (PDP) para multiplicadores de 8 bits sin signo se muestra en la Figura 8, donde el Los MSAM propuestos están resaltados con un cuadrado rojo. Si bien DR-ALM-7 [15] y Mitch- w [14] exhibieron un PDP más bajo, dieron como resultado un NMED más alto. Por el contrario, DRUM6 [16] y MSAM-21 produjo NMED más pequeño pero exigió un PDP más alto. En particular, AxRM2 [17], MSAM-52, MSAM-41 y MSAM-42 lograron un PDP relativamente más bajo, así como también menores NMED. Entre estos, como lo indica el círculo rojo, MSAM-41 y MSAM-42 emergen como los diseños más atractivos, logrando el equilibrio óptimo entre PDP y NMED.

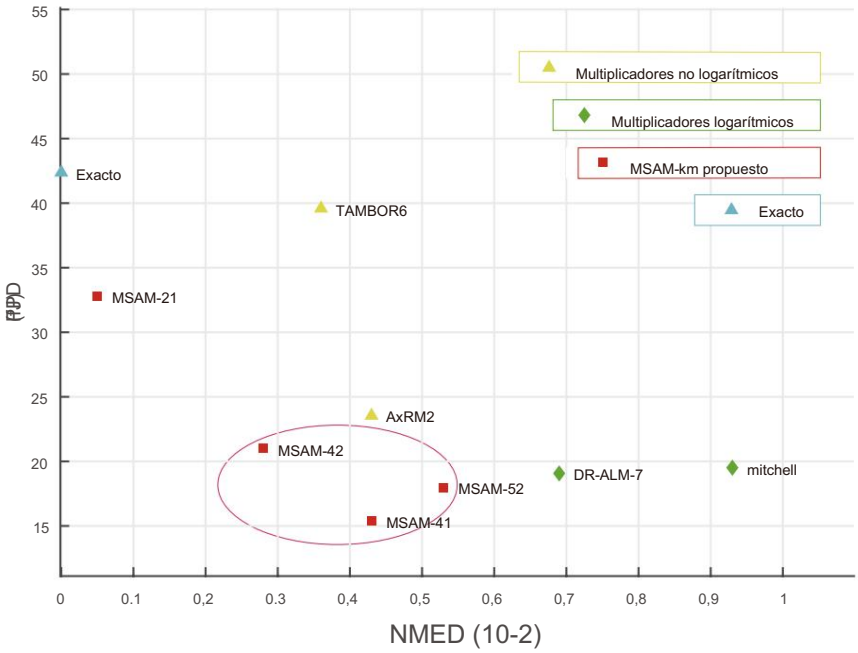


Figura 8. NMED y PDP de multiplicadores aproximados sin signo de 8 bits.

Los resultados detallados de esta evaluación se resumen en la Tabla 3. A través de una cuidadosa Al configurar los parámetros k y m, obtuvimos un rendimiento de hardware comparable al (o, en algunos casos, superando) el de los multiplicadores Mitchell [14] y DR-ALM-7 [15] (para ejemplo, con km = 41 o km = 52). Al comparar MSAM-41 y MSAM-52 con DR- ALM-7, incluso en situaciones en las que el rendimiento del producto de retardo de potencia (PDP) supera En este último caso, todavía se observaron mejoras notables en términos de NMED, alcanzando 37,68% y 23,19%, respectivamente. Por el contrario, en comparación con AxRM2 [17], MSAM-41 demuestra mejoras significativas, incluida una reducción del 32,11% en la utilización del área, una disminución del 23,33% en el retraso y una mejora del 27,95% en el PDP, todo ello manteniendo un NMED equivalente. Estos hallazgos resaltan la impresionante eficiencia del hardware lograda con el diseño MSAM, en comparación con los diseños AM de última generación.

Aunque el ZAS ofrece un diseño de hardware más simplificado, lo que resulta en una calidad superior. En términos de consumo de energía y utilización del área, el NMED aumenta en comparación con la estrategia correspondiente de la OEA. Nuestro diseño proporciona múltiples estrategias aproximadas como ZAS. y la OEA para lograr una gama más dinámica de compensaciones, satisfaciendo así las demandas de un gama más amplia de aplicaciones.

Machine Translated by Google

Tabla 3. Comparación de rendimiento de multiplicadores aproximados sin signo de 8 bits.

Diseño	Área (um2)	Potencia (uW)	Retraso (ns)	PPD (fJ)	NMED (10-2)
Exacto	154,48	76,75	0,59	45,28	0
MSAM-21	147,29	59,55	0,59	35,13 (22%)	0,05
MSAMZ-21	144,22	56.2	0,58	32,60 (28%)	0,07
MSAM-32	143.01	52.3	0,52	27,20 (40%)	0,17
MSAMZ-32	139.05	50,4	0,5	25,20 (44%)	0,19
MSAM-31	129,53	48,39	0,52	25,16 (44%)	0,17
MSAMZ-31	126,45	44,66	0,49	21,88 (52%)	0,19
MSAM-42	125,5	41,78	0,52	21,73 (52%)	0,28
MSAMZ-42	120,79	38,98	0,49	19,10 (58%)	0,34
MSAM-41	111,89	36,86	0,46	16,96 (63%)	0,43
MSAMZ-41	103,76	35.33	0,45	15,90 (65%))	0,47
MSAM-52	110,75	32.36	0,52	16,83 (63%)	0,53
MSAMZ-52	104,39	31,33	0,51	15,98 (65%)	0,59
Mitchell [14]	103,45	30,01	0,65	19,51 (-57%)	0,93
DR-ALM-7 [15]	98,28	28.46	0,67	19,07 (-58%)	0,69
TAMBOR6[16]	192,53	56,10	0,77	43,20 (-5%)	0,36
AxRM2 [17]	164,81	39,23	0,60	23,54 (-48%)	0,43

Los diseños propuestos se encuentran en la sección sombreada.

4.3. Evaluación, Simulación y Análisis

4.3.1. Evaluación del rendimiento en redes neuronales profundas

Para una evaluación más completa del rendimiento del multiplicador cuando se utiliza en modelos grandes, realizamos experimentos utilizando el conjunto de datos CIFAR-10 y empleamos tres Redes neuronales profundas representativas: VGG-19, conocida por sus capas convolucionales profundas; ResNet-50, que mitiga eficazmente el problema del gradiente que desaparece en redes profundas mediante el uso de conexiones residuales; y DenseNet-121, que logra una función eficiente utilización a través de densos mecanismos de conectividad. Realizamos experimentos usando estas redes complejas, con el objetivo de evaluar exhaustivamente el rendimiento del multiplicador y aplicabilidad. Además, ampliamos nuestro análisis experimental a los más desafiantes. Conjunto de datos ImageNet mediante la incorporación de SqueezeNet, un sistema neuronal profundo compacto pero eficiente. Arquitectura de red diseñada para un rendimiento optimizado en dispositivos restringidos.

Para evaluar el desempeño de los multiplicadores aproximados, empleamos el Adaptar el marco [22] para facilitar la simulación y evaluación de varios multiplicadores. diseños. Como se muestra en la Figura 9, las entradas consisten en el modelo NN previamente entrenado, cuantificación configuraciones y el archivo de diseño del multiplicador aproximado (basado en Verilog HDL). Inicialmente, el gráfico de capa se construye utilizando los parámetros de la capa convolucional y la capa de normalización de lotes adyacente. Posteriormente se elabora el expediente de diseño del aproximado Se analizó el multiplicador. Según las configuraciones de cuantificación, los correspondientes Se generan capas aproximadas. Estas capas aproximadas luego reemplazan las capas en el gráfico de capa original. Después de esto, el gráfico de capas reconstruido se procesa a través del Marco AdaPT para reentrenamiento e inferencia, adhiriéndose a la estrategia de reentrenamiento especificada. Cabe señalar que para el conjunto de datos de entrenamiento, sólo se requiere un subconjunto representativo, que puede ser aproximadamente el 10% del conjunto de entrenamiento original, para fines de calibración. Por último, Se proporcionan informes de rendimiento que detallan la precisión y el consumo de energía.

Se puede emplear el reentrenamiento y el ajuste del modelo para aliviar el deterioro de la precisión que surge de ciertas aproximaciones, como la poda y la multiplicación aproximada [23]. Estos enfoques permiten que el modelo se adapte y se vuelva más resistente a las errores introducidos por tales aproximaciones. Durante la fase de inferencia, estas técnicas facilitar que los modelos AxC incurran en menores costos de hardware y al mismo tiempo logren niveles significativamente mayores exactitud. Para evaluar eficazmente el rendimiento de los multiplicadores aproximados, se llevaron a cabo experimentos con el conjunto de datos CIFAR-10 mediante inferencia directa sin ningún tipo de

Machine Translated by Google

reentrenamiento. Esta metodología permitió una evaluación rápida del desempeño de los multiplicadores. Mientras tanto, para el conjunto de datos de ImageNet, se adoptó una estrategia de reentrenamiento más eficiente. seleccionando sólo el 10% del subconjunto de formación. Esta estrategia tuvo como objetivo realizar el modelo. ajuste durante la fase de entrenamiento, lo que permite mejorar la precisión y obtener energía sustancial reducción durante la fase de inferencia real. Muestra la eficacia del reciclaje y ajuste del modelo para mitigar errores y mejorar la precisión sin el gravamen de costosos requisitos de hardware.

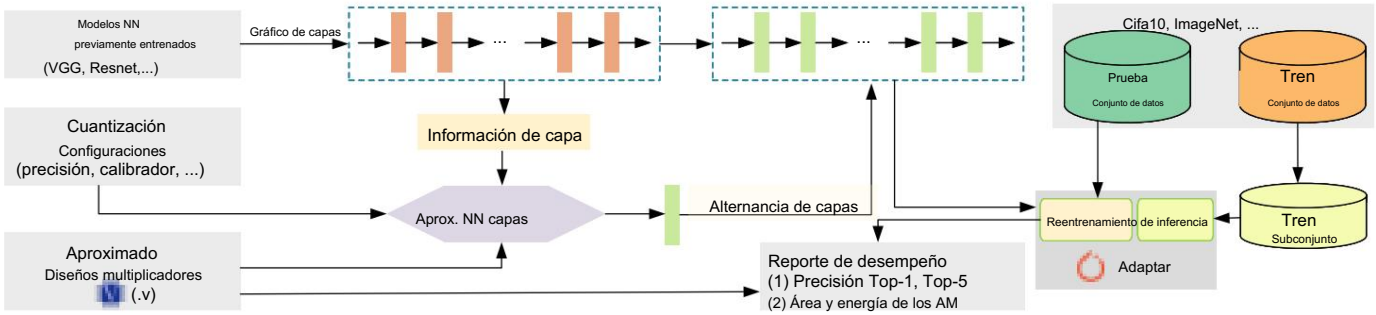


Figura 9. Flujo de evaluación basado en el marco Adapta.

Se implementaron varias versiones firmadas del multiplicador MSAM y se en comparación con el multiplicador de Booth radix-4 preciso, junto con dos multiplicadores logarítmicos: a saber, Mitchell [14] y DR-ALM-7 [15], así como dos aproximados no logarítmicos multiplicadores: C-SSM [18] y Aprox-Booth [19]. Para garantizar una comparación justa, replicamos los diseños del C-SSM de 8 bits (con m = 4) y Aprox-Booth (con wG, wA = 6, 6). El La evaluación de estos multiplicadores con signo siguió estrictamente la configuración experimental descrita anteriormente. Los resultados de esta comparación integral se presentan en la Tabla 4.

Al considerar los resultados del conjunto de datos CIFAR-10, el MSAM se aproxima El multiplicador presentó el mejor rendimiento en términos de precisión y reducción de energía. Específicamente, el multiplicador MSAM-31 no solo superó al DR-ALM-7 en términos de precisión de la evaluación de la red, pero también logró un ahorro de energía adicional del 9% por multiplicador único en comparación con DR-ALM-7, destacando su eficiencia. DR-ALM-7, en el Por otro lado, demostró un rendimiento de red superior en comparación con los otros. multiplicadores aproximados, con excepción de las variantes MSAM.

Tabla 4. Comparación de los costos de hardware y la precisión de los multiplicadores con signo de 8 bits en CIFAR10 y conjuntos de datos ImageNet.

Multiplicador	Retardo de energía del área NMED (10−2) (um2) (uW) (ns)			CIFAR10		ImagenNet
			Energía (fJ)	VGG-19	ResNet-50 DenseNet-121 Top-1 Top-5	
Radix-4 exacto	0	276,70 94,27	0,60 56,56 93,69% 0,62 32,75 (-42%)	93,57%	93,84%	57,37% 80,19%
Firmado MSAM-21	0,34	173,88 52,82	93,66% 0,58 27,71 (-51%) 93,23% 0,55	92,81%	93,58%	54,96% 78,21%
MSAM-32	0,40	169,60 47,78	23,55 (-58%) 93,60% 0,60 23,83 (-58%)	91,34%	93,30%	52,02% 76,00%
Firmado MSAM-31	0,61	156,11 42,82	93,08% 0,49 16,71 70%) 91,24% 0,71	93,06%	93,64%	54,01% 77,60%
Firmado MSAM-42	0,60	152,08 39,71	27,95 (-51%) 89,64% 0,73 28,64 (-49%)	91,71%	92,93%	50,37% 74,35%
Firmado MSAM-41	1,20	138,47 34,10	93,29% 0,43 35,42 (-37%) 40,24% 0,55	91,26%	91,46%	43,31% 68,00%
Mitchell [14]	1,12	132,30 39,37	40,25 (-29%) 12,29%	92,52%	91,75%	50,19% 74,20%
DR-ALM-7 [15]	0,78	127,13 39,23		92,24%	93,37%	53,92% 77,38%
C-SSM (m = 4) [18]	3.62	276,32 82,37		61,17%	73,28%	2,22% 7,47%
Stand aproximado [19]	0,17	218,23 73,18		10,65%	9,99%	17,44% 36,33%

Los tres principales multiplicadores aproximados que demostraron la mayor adaptabilidad al conjunto de datos de ImageNet fueron MSAM-21, MSAM-31 y DR-ALM-7. Estos multiplicadores exhibió un rendimiento excepcional en las diversas arquitecturas de red, destacando su versatilidad y robustez. Para aplicaciones que priorizan una alta precisión de la red,

Machine Translated by Google

MSAM-21 se destacó como un actor notable, que logró una mejora del 1,04 % en la precisión del Top 1 y una mejora del 0,83 % en la precisión del Top 5, en comparación con DR-ALM-7. Estas mejoras son significativas y pueden tener un impacto sustancial en el rendimiento general de la red. Los resultados presentados en la Tabla 4 proporcionan una comparación completa de los costos de hardware y la precisión de los multiplicadores con signo de 8 bits en los conjuntos de datos CIFAR10 e ImageNet. Los multiplicadores MSAM y DR-ALM-7 demostraron consistentemente un sólido rendimiento, y las variantes MSAM se mostraron particularmente prometedoras en términos de precisión y eficiencia energética. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para el diseño y optimización de multiplicadores para su uso en aplicaciones de aprendizaje profundo.

4.3.2. Evaluación del rendimiento del acelerador de multiplicación de matrices de transformadores

Se verificaron los ahorros de recursos y energía logrados con el multiplicador propuesto cuando se implementó en LLM en dispositivos de borde. Esta verificación se logró mediante la aplicación del multiplicador a un acelerador de multiplicación de matrices transformador, diseñado específicamente para manejar matrices de tamaño 16 × 16. Al evaluar la sobrecarga de hardware, con multiplicadores exactos que sirven como base para la comparación, nos centramos en evaluar el consumo de energía del acelerador asociado con la lógica combinacional. Árbitro. [24] destaca la posibilidad de realizar inferencia en LLM con hasta 175B de parámetros sin ninguna degradación del rendimiento utilizando LLM.int8(), que permite la multiplicación de más del 99,9% de los valores en 8 bits. Árbitro. [25] demuestra la eficiencia de multiplicadores aproximados en el contexto de modelos de transformadores de visión. Como se muestra en la Figura 10, nuestro acelerador de multiplicación de matrices implica dos matrices enteras de 8 bits, XI8 y WI8. Para acelerar el proceso de multiplicación, sustituimos la multiplicación exacta por un método aproximado.

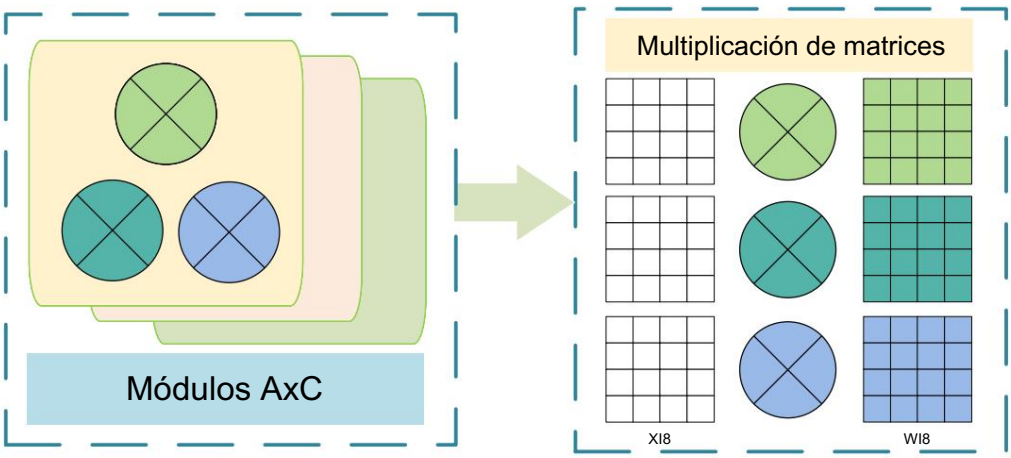


Figura 10. Acelerador de multiplicación de matrices.

La Tabla 5 presenta los resultados experimentales del módulo de multiplicación de matrices en el acelerador Transformer, destacando la reducción efectiva en la sobrecarga de hardware lograda con el multiplicador propuesto. Los resultados demuestran la capacidad del multiplicador para optimizar el uso de recursos y energía al implementar LLM en dispositivos perimetrales. En comparación con el resultado de referencia obtenido utilizando el multiplicador exacto, los MSAM muestran reducciones significativas en el área, el consumo de energía y la latencia, y MSAMZ-41 muestra las mejoras más pronunciadas. El empleo de la computación aproximada ha demostrado la posibilidad de mejorar la eficiencia de los transformadores minimizando su complejidad computacional y sus demandas de memoria [25]. Teniendo en cuenta que los modelos grandes tienen mayores requisitos computacionales, esto sugiere que se pueden incluir módulos más aproximados. Por lo tanto, nuestra investigación futura debería continuar explorando y profundizando en una integración más apropiada y racional de estos MSAM, con el objetivo de reducir el consumo de energía manteniendo una precisión aceptable.

Machine Translated by Google

Tabla 5. Desempeño del hardware del diseño propuesto con el acelerador del transformador.

	Área (um2)	Peine. Potencia (mW)	Retraso (ns)
Base	90.391,64	2.07	0,89
MSAM-41	67.618,91 (-25,19%)	1,82 (−12,08%)	0,79 (-11,24%)
MSAMZ-41	47.618,35 (-47,32%)	1,46 (−29,47%)	0,75 (-15,73%)
MSAMC-41	51.618,67 (-42,89%)	1,55 (−25,12%)	0,76 (-14,61%)

4.4. Estudio de caso: Acelerador de multiplicación de matrices de imágenes

En nuestro enfoque, realizamos una multiplicación matricial píxel por píxel entre una entrada imagen y una imagen de máscara, donde el valor del píxel correspondiente en la imagen de salida se determina según el producto resultante. La figura 11 muestra la multiplicación de imágenes. resultados, donde la calidad de la imagen se correlaciona positivamente con la relación señal-ruido máxima relación (PSNR); como tal, los valores PSNR para las imágenes generadas se incluyen en su subtítulos respectivos. Los resultados obtenidos con la mayoría de nuestros MSAM indican alta calidad, demostrando un PSNR muy bueno en comparación con el multiplicador exacto de la Figura 11c.
Debido a la distribución relativamente uniforme de los datos de la imagen, ya que nuestro diseño incorpora ESM, tiene alta utilidad y robustez en el contexto del procesamiento de imágenes.

(a) Imagen original (b) Imagen de máscara (c) Multiplicador exacto (100 dB) d) MSAM-21 (57,65 dB)

(e) MSAM-32 (51,71 dB) f) MSAM-31 (50,29 dB) g) MSAM-42 (47,48 dB) (h) AxRM2 (47,28 dB)

(i) MSAM-52 (44,46 dB) j) MSAM-41 (41,41 dB) (k) DR-ALM-7 (38,10 dB) (l) Mitchell (37,98 dB)

Figura 11. Los resultados de multiplicar (a) una imagen de entrada con (b) una imagen de máscara usando la imagen seleccionada multiplicadores.

Machine Translated by Google

4.5. Discusión sobre las MSAM propuestas

4.5.1. Ventajas y limitaciones Los

MSAM propuestos ofrecen considerables ahorros de energía al tiempo que limitan los errores de los multiplicadores aproximados mediante el empleo de las estrategias de aproximación guiadas por bits más significativas . Estas estrategias proporcionan varias ventajas principales sobre otros trabajos. En primer lugar, los MSAM emplean las técnicas de aproximación guiadas por bits más importantes, lo que facilita que la multiplicación se realice mediante desplazamiento. Esto da como resultado reducciones significativas tanto en el consumo de área como de energía, lo que hace que nuestro enfoque sea altamente eficiente para aplicaciones de redes neuronales. En segundo lugar, a diferencia de los enfoques logarítmicos, nuestro enfoque garantiza que la producción aproximada no esté sesgada unilateralmente. Esta característica permite la compensación entre diferentes aproximaciones, lo que mejora la precisión y confiabilidad general. Además, un beneficio clave de nuestra estrategia de aproximación es que se centra en un solo operando en la operación de multiplicación y al mismo tiempo preserva completamente la precisión del otro operando. Este enfoque distintivo garantiza efectivamente la precisión, proporcionando una superioridad significativa sobre la mayoría de los otros trabajos en este campo. El control preciso sobre las estrategias de aproximación y la capacidad de preservar la precisión en un operando contribuyen a mejorar el rendimiento en aplicaciones de redes neuronales.

Una limitación importante de los MSAM propuestos es la probabilidad de error relativamente alta causada por el uso de componentes predefinidos para reemplazar bits específicos. Esto haría que nuestros multiplicadores no fueran aplicables en escenarios donde se necesita precisión exigente. A pesar de esta limitación, los MSAM propuestos poseen un valor práctico considerable, ya que la escala de los errores no es sustancial y, dado que los errores pueden ser tanto positivos como negativos, el error general es aceptable para operaciones por lotes.

4.5.2. Trabajo futuro

La multiplicación de matrices sirve como elemento de construcción fundamental en la arquitectura del transformador [25]. En el futuro, nuestro objetivo es explorar más a fondo el diseño de multiplicadores aproximados con errores concentrados y establecer una biblioteca de multiplicadores aproximados adaptada para LLM. Las aproximaciones a nivel de software, como las redes de menor complejidad y la poda, facilitan la aceleración energéticamente eficiente de las DNN [23]. Si bien las técnicas de aproximación de software y hardware ofrecen de forma independiente beneficios energéticos sustanciales para una DNN, pretendemos combinar estas técnicas en un marco sinérgico en esfuerzos futuros para maximizar el ahorro de energía. Esperamos que este artículo atraiga a más investigadores para realizar investigaciones en este aspecto, permitiendo la aplicación de MSAM en escenarios más complejos con presupuestos de energía ajustados y requisitos estrictos de precisión.

5. Conclusiones

En este estudio, propusimos un multiplicador aproximado dinámico guiado por bits de mayor eficiencia energética para la aceleración de redes neuronales. El uso de una estrategia de aproximación de peso diseñada para NN y LLM resultó en última instancia en un multiplicador aproximado de alta eficiencia basado en principios de cambio de MSO. El diseño MSAM resultante logra hábilmente un equilibrio armonioso entre precisión y costo de hardware. Cuando se aplicó tanto a LLM como a DNN, nuestro enfoque condujo a reducciones sustanciales en los gastos generales de recursos de hardware. En comparación con los multiplicadores exactos tradicionales utilizados en LLM y DNN, nuestro diseño logró una notable reducción del 60 % en el consumo de energía sin ningún impacto adverso significativo en la precisión de la tarea. Además, realizamos un estudio de caso sobre la fusión de imágenes y los resultados demuestran que nuestros multiplicadores se pueden utilizar para generar imágenes de alta calidad. En comparación con el multiplicador exacto, nuestro enfoque funcionó muy bien al utilizar el PSNR como métrica de evaluación.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, PH; Software, GB; Validación, BG; Escritura: borrador original, PH; Escritura: revisión y edición, KC; Supervisión, CW Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Machine Translated by Google

Financiamiento: Este trabajo fue apoyado por subvenciones de la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China (62101252 y 62134002).

Declaración de disponibilidad de datos: previa solicitud razonable, el autor correspondiente puede proporcionar los datos que respalden los hallazgos de este estudio.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Raiaan, MAK; Mukta, MSH; Fátima, K.; Fahad, Nuevo México; Sakib, S.; Mim, MMJ; Ahmad, J.; Una lima; Azam, S. Una revisión de modelos de lenguajes grandes: arquitecturas, aplicaciones, taxonomías, cuestiones abiertas y desafíos. Acceso IEEE 2024, 12, 26839–26874. [Referencia cruzada]

2. Rasch, MJ; Mackin, C.; Gallo, ML; Chen, A.; Fasoli, A.; Odermatt, F.; Li, N.; Nandakumar, SR; Narayanan, P.; Tsai, H.; et al. Capacitación basada en hardware para cargas de trabajo de inferencia de aprendizaje profundo diversas y a gran escala utilizando aceleradores basados en computación en memoria . Nat. Comunitario. 2023, 14, 5282. [Referencia cruzada] [PubMed]

3. Towhidy, A.; Omidi, R.; Mohammadi, K. Sobre el diseño de multiplicadores iterativos de coma flotante aproximados. Traducción IEEE. Computadora. 2023, 72, 1623–1635. [Referencia cruzada]

4. Zhang, H.; Ko, SB Multiplicadores de posiciones aproximados eficientes para la computación de aprendizaje profundo. IEEE J. Emerg. Sel. Arriba. Sistema de circuitos. 2023, 13, 201–211. [Referencia cruzada]

5. Sayadi, L.; Timarchi, S.; Sheikh-Akbari, A. Dos multiplicadores aproximados sin signo eficientes mediante el desarrollo de una nueva configuración para compresores 4:2 aproximados. Traducción IEEE. Sistema de circuitos. Yo regulo. Papilla. 2023, 70, 1649–1659. [Referencia cruzada]

6. Schaefer, CJ; Taheri, P.; Horeni, M.; Joshi, S. El impacto del hardware de la cuantificación y la poda de pesos en redes neuronales con picos. Traducción IEEE. Sistema de circuitos. II Breves Express 2023, 70, 1789–1793. [Referencia cruzada]

7. Pinos, M.; Mrazek, V.; Vaverka, F.; Vasicek, Z.; Sekanina, L. Técnicas de aceleración para el diseño automatizado de datos aproximados Redes neuronales convolucionales. IEEE J. Emerg. Sel. Arriba. Sistema de circuitos. 2023, 13, 212–224. [Referencia cruzada]

8. Ahmadinejad, M.; Moaiyeri, MH Multiplicadores aproximados de eficiencia energética y calidad para redes neuronales e imágenes Procesamiento de solicitudes. Traducción IEEE. Emergente. Arriba. Computadora. 2022, 10, 1105–1116. [Referencia cruzada]

9. Li, Z.; Zheng, S.; Zhang, J.; Lu, Y.; Gao, J.; Tao, J.; Wang, L. Diseño de multiplicador aproximado adaptable basado en la polaridad y la distribución de entrada. Traducción IEEE. Integral de muy gran escala. (VLSI) Sistema. 2022, 30, 1813–1826. [Referencia cruzada]

10. Amirafshar, N.; Baroughi, AS; Shahhoseini, SA; TaheriNejad, N. Llevar sin tener en cuenta los multiplicadores aproximados. Traducción IEEE. Circuitos Sistema. Yo regulo. Papilla. 2023, 70, 4840–4853. [Referencia cruzada]

11. Lotri˘c, U.; Pilipovi´c, R.; Buli´c, P. Un Radix-4 híbrido y un multiplicador logarítmico aproximado para el procesamiento de imágenes con eficiencia energética. Electrónica 2021, 10, 1175. [CrossRef]

12. Faraone, J.; Kumm, M.; Hardieck, M.; Zipf, P.; Liu, X.; Boland, D.; Leong, PH AddNet: Redes neuronales profundas que utilizan FPGA- multiplicadores optimizados. Traducción IEEE. Integral de muy gran escala. (VLSI) Sistema. 2019, 28, 115-128. [Referencia cruzada]

13. Gong, B.; Chen, K.; Huang, P.; Wu, B.; Liu, W. Multiplicadores eficientes dinámicos cambiantes unidireccionales más importantes para modelos de lenguaje grandes. En Actas del Simposio Internacional sobre Circuitos y Sistemas (ISCAS) del IEEE de 2024, Singapur, 19 a 22 de mayo de 2024; págs. 1 a 5.

14. Mitchell, JN Multiplicación y división por computadora utilizando logaritmos binarios. IRE Trans. Electrón. Computadora. 1962, CE-11, 512–517.

15. Yin, P.; Wang, C.; Waris, H.; Liu, W.; Han, Y.; Lombardi, F. Diseño y análisis de rango dinámico energéticamente eficiente aproximado Multiplicadores logarítmicos para el aprendizaje automático. Traducción IEEE. Sostener. Computadora. 2020, 6, 612–625. [Referencia cruzada]

16. Hashemi, S.; Bahar, Rhode Island; Reda, S. DRUM: Un multiplicador imparcial de rango dinámico para aplicaciones aproximadas. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE/ACM de 2015 sobre Diseño Asistido por Computadora (ICCAD), Austin, TX, EE. UU., 2 a 6 de noviembre de 2015; págs. 418–425.

17. Waris, H.; Wang, C.; Xu, C.; Liu, W. AxRMs: multiplicadores recursivos aproximados utilizando bloques de construcción de alto rendimiento. Traducción IEEE . Emergente. Arriba. Computadora. 2021, 10, 1229–1235. [Referencia cruzada]

18. Strollo, AGM; Nápoles, E.; De Caro, D.; Petra, N.; Saggese, G.; Di Meo, G. Multiplicadores aproximados mediante segmentación estática: Análisis de errores y mejoras. Traducción IEEE. Sistema de circuitos. Yo regulo. Papilla. 2022, 69, 2449–2462. [Referencia cruzada]

19. Parque, G.; Kung, J.; Lee, Y. Diseños simplificados de compresores y codificadores para un multiplicador de cabina Radix-4 aproximado de bajo costo. Traducción IEEE. Sistema de circuitos. II Escritos Express 2022, 70, 1154–1158. [Referencia cruzada]

20. Jiang, H.; Santiago, FJH; Mo, H.; Liu, L.; Han, J. Circuitos aritméticos aproximados: estudio, caracterización y aplicaciones recientes. Proc. IEEE 2020, 108, 2108–2135. [Referencia cruzada]

21. Mo, H.; Wu, Y.; Jiang, H.; Mamá, Z.; Lombardi, F.; Han, J.; Liu, L. Aprendizaje de las características de error de los multiplicadores aproximados de Neural Aplicaciones de red. Traducción IEEE. Computadora. 2024, 73, 842–856. [Referencia cruzada]

22. Danopoulos, D.; Zervakis, G.; Siozios, K.; Soudris, D.; Henkel, J. AdaPT: Emulación rápida de aceleradores DNN aproximados en PyTorch. Traducción IEEE. Des.asistida por computador. Integral Sistema de circuitos. 2023, 42, 2074–2078. [Referencia cruzada]

23. Sanyal, S.; Negi, S.; Raghunathan, A.; Roy, K. Computación aproximada para cargas de trabajo de aprendizaje automático: una perspectiva de circuitos y sistemas . En Computación Aproximada; Liu, W., Lombardi, F., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Suiza, 2022; págs. 365–395.

Machine Translated by Google

24. Dettmers, T.; Lewis, M.; Belkada, Y.; Zettlemoyer, L. GPT3.int8(): Multiplicación de matrices de 8 bits para transformadores a escala. En Actas de los avances en sistemas de procesamiento de información neuronal, Nueva Orleans, LA, EE. UU., 28 de noviembre a 9 de diciembre de 2022.
25. Danopoulos, D.; Zervakis, G.; Soudris, D.; Henkel, J. TransAxx: Transformadores eficientes con computación aproximada. arXiv 2024, arXiv:2402.07545.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Un circuito controlador de iluminación electrónica de una sola etapa que utiliza SiC Diodos Schottky para suministrar un LED ultravioleta profundo Lámpara de Desinfección y Esterilización

Chun-An Cheng, Chien-Hsuan Chang, Hung-Liang Cheng, En-Chih Chang *, Long-Fu Lan, Sheng-Hong Hou y Cheng-Kuan Lin

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad I-Shou, ciudad de Kaohsiung 84001, Taiwán; cacheng@isu.edu.tw (C.-AC); chchang@isu.edu.tw (C.-HC); hlcheng@isu.edu.tw (H.-LC); isu11001004m@cloud.isu.edu.tw (L.-FL); isu11001001m@cloud.isu.edu.tw (S.-HH); isu11001014m@cloud.isu.edu.tw (C.-KL)

* Correspondencia: enchihchang@isu.edu.tw; Tel.: +886-7-6577711 (extensión 6642)

Resumen: Recientemente, ha aparecido en los mercados de purificación de espacios y esterilización de superficies un nuevo tipo de fuente de iluminación, el diodo emisor de luz (LED) ultravioleta profundo. En este artículo, se propone y desarrolla un nuevo tipo de controlador de iluminación electrónico para alimentar una lámpara de esterilización LED ultravioleta intensa . El circuito principal combina un convertidor reductor y un convertidor flyback en un convertidor de potencia CA-CC reductor-reductor de un solo interruptor y etapa única con corrección del factor de potencia. Además, el controlador de iluminación electrónico propuesto aprovecha un diodo Schottky de SiC de banda ancha como diodo de salida para reducir las pérdidas del diodo de potencia y recicla la energía almacenada en la inductancia de fuga del transformador para mejorar la eficiencia del circuito. El inductor magnetizante dentro del convertidor de potencia AC-DC presentado está diseñado para funcionar en modo de conducción discontinua (DCM), lo que naturalmente permite la corrección del factor de potencia (PFC). Se desarrolló e implementó un prototipo de controlador de una sola etapa con una potencia nominal de 3,6 W (90 V/40 mA) para proporcionar una lámpara LED de desinfección y esterilización ultravioleta profunda. Los resultados experimentales muestran que el factor de potencia (PF) medido es superior a 0,9 y la distorsión armónica total (THD) medida de la corriente de entrada es inferior al 18% con un voltaje de entrada de la red pública de 110 V. Además, el factor de ondulación del voltaje de salida medido es inferior al 1% y el factor de ondulación de la corriente de salida es inferior al 4%. Además, el controlador de iluminación electrónico de una sola etapa propuesto para suministrar una lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda logra una alta eficiencia del circuito (más del 90%), un bajo número de componentes del

Palabras clave: circuito controlador de iluminación electrónica; LED ultravioleta profundo; lámpara de desinfección y esterilización; corrección del factor de poder; Distorsión armónica total

check for updates

Cita: Cheng, C.-A.; Chang, CH-H.; Cheng, HL; Chang, E.-C.; Lan, L.-F.; Hou, S.-H.; Lin, C.-K. Un circuito controlador de iluminación electrónica de una sola etapa que utiliza diodos Schottky de SiC para suministrar una lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda. Electrónica 2024, 13 , 3048. https://doi.org/10.3390/electronics13153048

Editores académicos: Yimeng Zhang, Lejia Sun y Yuming Zhang

Recibido: 24 de junio de 2024
Revisado: 27 de julio de 2024
Aceptado: 29 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Microorganismos como bacterias, virus, quistes y mohos utilizan la germinación o la producción de esporas para reproducirse. Cuando los microorganismos son irradiados o expuestos a lámparas desinfectantes y esterilizantes, la luz penetra a través de las paredes celulares y destruye su ADN, cambiando su ADN de manera que se vuelven inofensivos e incapaces de reproducirse, o incluso morir, logrando así el efecto de desinfectar y esterilizar. Las lámparas de esterilización y desinfección se utilizan en una amplia gama de aplicaciones en una variedad de sectores, incluidos centros de salud, industria de alimentos y bebidas, espacios públicos y transporte, edificios comerciales y de oficinas, edificios residenciales, hotelería, instituciones educativas, tiendas minoristas y de comestibles. , tratamiento de aguas y agricultura. Estas diversas aplicaciones resaltan la versatilidad y eficacia de la desinfección y esterilización de lámparas para promover la salud y la seguridad en diferentes entornos [1–4]. La fuente de luz tradicional para la esterilización y desinfección es la lámpara de mercurio ultravioleta (UV), que tiene las ventajas de un precio bajo y una potencia luminosa alta y se usa comúnmente en lugares grande

Machine Translated by Google

a saber, han surgido el carburo de silicio (SiC) y el nitruro de galio (GaN), que se caracterizan por una alta eficiencia energética y un bajo consumo de energía. Además, los dispositivos de potencia fabricados con materiales semiconductores de amplio espacio pueden funcionar a voltajes más altos, restaurantes y escuelas. Sin embargo, las desventajas de las lámparas UV de mercurio son de larga data, consumen más energía y tienen menores pérdidas de energía, aunque son significativamente más breves que el tiempo de calentamiento, la vida útil de la lámpara es corta y el contenido de mercurio en las lámparas no cumple con los requisitos. Dispositivos de potencia hechos de materiales semiconductores de silicio. El carburo de silicio (SiC) es un com- requisitos medioambientales. La luz ultravioleta es invisible para el ojo humano y tiene una longitud de onda libra de material semiconductor compuesto de silicio (Si) y carbono (C). El SiC tiene un tamaño inferior de 100 a 400 nanómetros. Dependiendo de la longitud de onda, los rayos UV se pueden subdividir en tres La resistencia de la capa de deriva que el Si, no requiere modulación de conducción, tiene tipos de energía: UV-A de onda larga (longitudes de onda de 320 a 400 nm), UV-B de onda media (longitudes de onda espacio aproximadamente 3 veces más ancho que el del Si y tiene una intensidad de campo de ruptura del aislamiento de 280 a 320 nm) y UV-C de onda corta (longitudes de onda de 100 a 280 nm). UV-C de onda corta, aproximadamente 10 veces mayor que el del Si. En comparación con los diodos Si-PN de alto voltaje, que también pueden denominarse ultravioleta profundo, tiene propiedades desinfectantes y germicidas. diodos Si-Fast Recovery de alta velocidad, diodos SiC Schottky hechos de semiconductores de gran espacio. El uso de luz ultravioleta UV-C de onda corta o luz ultravioleta profunda destruye el ADN o Los materiales tor tienen excelentes características de alta velocidad y alto voltaje. Dado que la estructura molecular del ARN inverso de las células microbianas, evitando así el crecimiento o la regeneración celular, El tiempo de recuperación de los diodos Schottky de SiC es extremadamente corto, la energía se pierde durante la inversión y, en última instancia, se logra el efecto de desinfección y esterilización. Los LED UV profundos son la recuperación se puede reducir considerablemente, lo cual es adecuado para aplicaciones con alta conmutación caracterizadas por protección ambiental y ahorro de energía, larga vida útil, sin tiempo de calentamiento, frecuencia, y es propicio para la miniaturización del circuito general, así como para la im- sin mercurio y miniaturización de la fuente de luz. Las lámparas UV de mercurio tradicionales tienen mejora de la densidad de potencia [21,22]. Notas complementarias sobre la fiabilidad a largo plazo y han sido sustituidos gradualmente por LED UV profundos, que se han convertido en una nueva fuente de luz para Degradación potencial de los diodos Schottky de carburo de silicio en los mercados de purificación de espacios térmicos y eléctricos y esterilización de superficies, como hogares, escuelas, hospitales y oficinas. Las tensiones se dan a continuación. Según la literatura [21], los diodos Schottky de carburo de silicio se pueden utilizar en edificios, supermercados o grandes almacenes. Además, desinfección ultravioleta profunda. no tienen invección de portador minoritario y su tiempo de recuperación no aumenta con la temperatura y las lámparas de esterilización pueden matar fácilmente las bacterias, pero debido al bajo poder de penetración de las sustancias profundas peratura en comparación con los diodos de silicio convencionales. Además, los diodos Schottky de SiC son lámparas ultravioleta de desinfección y esterilización, pueden verse afectados por partículas de polvo, SiPel Los dispositivos portadores mayoritarios y, por lo tanto, la corriente inversa es menor y la temperatura en las celdas dañadas por la desinfección ultravioleta profunda y las lámparas de esterilización no son completamente dependiente. Además, en comparación con los diodos de silicio, los diodos Schottky de SiC tienen la característica de que las células aún se pueden reparar y revitalizar. Por lo tanto, es importante La ventaja de una recuperación más rápida, que reduce las pérdidas de conmutación y el ruido, y un avance más bajo proporciona la distancia adecuada y suficiente tiempo de irradiación e intensidad de la profundidad. voltaje, lo que reduce las pérdidas de conducción. Además, la literatura [22] menciona la lámpara ultravioleta de desinfección y esterilización de los objetos desinfectados para lograr buen efecto de esterilización [3–8].

Fiabilidad a largo plazo de los diodos Schottky de SiC con respecto a fallos dV/dt y fallos dI/dt. un

Además, en los diodos de silicio, si dI/dt es grande, se produce un patrón de corriente de recuperación aumentada. La Figura 1 muestra la topología del circuito de dos etapas de un controlador de iluminación electrónico existente. (LED) que puede dañar el dispositivo debido a la concentración de corriente. Por el contrario, para el suministro de lámparas LED de esterilización y desinfección con luz ultravioleta profunda. La primera etapa es Dado que los diodos Schottky de SiC no tienen una recuperación inversa, un convertidor de potencia CA-CC con corrección del factor de potencia (PFC), y la segunda etapa es un convertidor CC-CC y suministra la potencia CC necesaria a la esterilización LED con luz ultravioleta profunda lámpara. Por lo tanto, [8]. Si todos los componentes se diseñan en exceso, el convertidor de SiC puede aplicarse a altas frecuencias para Esterilización y desinfección ultravioleta profunda. Las lámparas de Esta es una ventaja para diodos emisores de luz (LED) para esterilización y desinfección LED ultravioleta por lo que es una mejor opción para el circuito principal y las etapas traseras, lo que hace que Componentes. Para reducir el número de interruptores de alimentación y componentes de circuitos, un convertidor [20]. El circuito solo necesita una conexión de disipador de calor y una etapa de entrada. Además, la propuesta y para mejorar la eficiencia La literatura [9–20] ha desarrollado una serie de controladores LED de una sola etapa y un solo interruptor. El controlador recicla la energía almacenada en la inductancia de fuga del transformador y explota circuitos que integran un convertidor de potencia AC-DC y un convertidor de potencia DC-DC adecuado un diodo Schottky de carburo de silicio de banda ancha como diodo de salida para mejorar el circuito para alimentar eficiencia. Lámparas LED de esterilización y desinfección ultravioleta profunda.

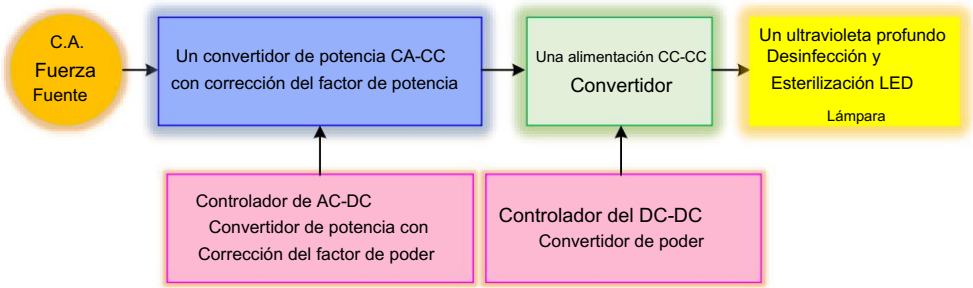


Figura 1. Diagrama de bloques del controlador de iluminación electrónico de dos etapas existente para suministrar una luz profunda. Figura 1. Diagrama de bloques del controlador de iluminación electrónico de dos etapas existente para alimentar una lámpara LED de desinfección y esterilización con luz ultravioleta profunda [8]. Lámpara LED ultravioleta de desinfección y esterilización [8].

A medida que los problemas ambientales derivados del calentamiento global y las emisiones de carbono se han ido Este documento está organizado y presentado de la siguiente manera. La sección 2 describe y analiza cada vez más en serio en los últimos años, el ser humano ha tomado medidas para ahorrar energía, el modo de funcionamiento de un circuito controlador de iluminación electrónico de una sola etapa que utiliza una reducción de carbono de SiC y el amor por la tierra como dirección principal común de desarrollo. Diodo Schottky para suministrar una lámpara LED de desinfección y esterilización con luz ultravioleta profunda, y por lo tanto, los combustibles fósiles deben reducirse gradualmente e introducirse rápidamente en la energía verde. proporciona pautas de diseño para algunos parámetros del circuito. La sección 3 muestra las aplicaciones experimentales y de ahorro de energía y, por tanto, alta eficiencia energética y bajo consumo energético. Los resultados de un prototipo de circuito controlador de iluminación electrónico que utiliza un diodo Schottky de SiC para el consumo también se adoptan gradualmente como objetivo en los productos de la vida diaria. en el paris Acuerdo de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, se declara que el

Machine Translated by Google

La tasa de calentamiento global debe mantenerse dentro de los 2 ◦C. Según la actual tendencia de desarrollo económico, incluso si el calentamiento se mantiene dentro de los 2 ◦C en 2050, las emisiones de CO2 seguirán aumentando en un 21% y será necesario generar hasta un 50% más de electricidad para hacer frente a las diversas necesidades humanas. actividades. Por lo tanto, es cada vez más importante actualizar y mejorar significativamente las fuentes de energía existentes. La mayor materia prima para los semiconductores es la producción de obleas de silicio (Si) de primera generación. Sin embargo, las propiedades físicas de este material han alcanzado sus límites en los productos existentes a base de Si y ya no es posible aumentar la potencia, reducir la pérdida de calor y aumentar la velocidad. Como resultado, existe la necesidad de evolucionar hacia otros materiales que puedan utilizar mejor la eficiencia de la transferencia de electrones y el bajo consumo de energía, y es en este contexto que los semiconductores de banda ancha de tercera generación que actualmente son objeto de acalorados debates en el mercado. , a saber, han surgido el carburo de silicio (SiC) y el nitruro de galio (GaN), que se caracterizan por una alta eficiencia energética y un bajo consumo de energía. Además, los dispositivos de potencia fabricados con materiales semiconductores de gran espacio pueden funcionar a voltajes más altos, generar más energía y tener menores pérdidas de energía, siendo significativamente más pequeños que los dispositivos de potencia fabricados con materiales semiconductores de silicio. El carburo de silicio (SiC) es un material semiconductor compuesto formado por silicio (Si) y carbono (C). El SiC tiene una menor resistencia de la capa de deriva que el Si, no requiere modulación de conducción, tiene una brecha de energía aproximadamente 3 veces más ancha que la del Si y tiene una intensidad de campo de ruptura del aislamiento aproximadamente 10 veces mayor que la del Si. En comparación con los diodos Si-PN de alto voltaje y los diodos Si-Fast Recovery de alta velocidad, los diodos Schottky de SiC fabricados con materiales semiconductores de gran espacio tienen excelentes características de alta velocidad y alto voltaje. Dado que el tiempo de recuperación inversa de los diodos Schottky de SiC es extremadamente corto, la energía perdida durante la recuperación inversa se puede reducir considerablemente, lo cual es adecuado para aplicaciones con alta frecuencia de conmutación y favorece la miniaturización del circuito general, as
A continuación se proporcionan notas complementarias sobre la confiabilidad a largo plazo y la posible degradación de los diodos Schottky de carburo de silicio bajo tensiones térmicas y eléctricas. Según la literatura [21], los diodos Schottky de carburo de silicio no tienen inyección de portador minoritario y su tiempo de recuperación no aumenta con la temperatura en comparación con los diodos de silicio convencionales. Además, los diodos Schottky de SiC son dispositivos portadores mayoritarios y, por lo tanto, la corriente inversa es menor y independiente de la temperatura. Además, en comparación con los diodos de silicio, los diodos Schottky de SiC tienen la ventaja de una recuperación más rápida, lo que reduce las pérdidas de conmutación y el ruido, y una tensión directa más baja, lo que reduce las pérdidas de condu
Además, la literatura [22] menciona la confiabilidad a largo plazo de los diodos Schottky de SiC con respecto a fallas dV/dt y fallas dI/dt. Además, en los diodos de silicio, si dI/dt es grande, se produce un patrón de aumento de la corriente de recuperación (Irr), que puede dañar el dispositivo debido a la concentración de corriente. Por el contrario, dado que la corriente de recuperación en los diodos Schottky de SiC es muy pequeña, se puede suponer que es poco probable que ocurra tal patrón.

Para abordar los problemas anteriores, en este artículo se propone y desarrolla un novedoso controlador de iluminación electrónica para proporcionar una lámpara LED de desinfección y esterilización ultravioleta profunda, que es una extensión y mejora adicional de la literatura [20]. El circuito principal combina un convertidor reductor y un convertidor flyback en un convertidor de potencia CA-CC reductor-reductor de un solo interruptor y etapa única con configuración de corriente de entrada. Además, el controlador propuesto recicla la energía almacenada en la inductancia de fuga del transformador y aprovecha un diodo Schottky de carburo de silicio de banda prohibida amplia como diodo de salida para mejorar la eficiencia del circuito.

Este documento está organizado y presentado de la siguiente manera. La Sección 2 describe y analiza el modo de operación de un circuito controlador de iluminación electrónica de una sola etapa que utiliza un diodo Schottky de SiC para suministrar una lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda, y proporciona pautas de diseño para algunos parámetros del circuito. La sección 3 muestra los resultados experimentales de un prototipo de circuito controlador de iluminación electrónica que utiliza un diodo Schottky de SiC para alimentar una lámpara LED de esterilización y desinfección con luz ultravioleta profunda. Finalmente, se dan algunas conclusiones en la Sección 4.

Machine Translated by Google

Suministre una lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda. Finalmente, en la Sección 4 se dan algunas conclusiones.

2. Descripciones y análisis de los modos operativos en la etapa única propuesta

Circuito controlador de iluminación electrónica que utiliza diodos Schottky de SiC para suministrar un Lámpara LED ultravioleta profunda para desinfección y esterilización

El controlador de iluminación electrónica con PFC para alimentar una lámpara de desinfección y esterilización LED ultravioleta profunda desarrollada en este artículo se muestra en la Figura 2, cuya lámpara de esterilización e inte- en este trabajo se muestra en la Figura 2, que integra una convierte un convertidor reductor y un convertidor flyback en una conversión de potencia AC-DC de una sola etapa- sion e incluye un inductor de filtro LF, un condensador de filtro CF, un rectificador de puente completo (incluidos D1, D2, D3 incluye un inductor de filtro LF, un condensador de filtro CF, un rectificador de puente completo (incluidos D1, D2, D3 y D4), un interruptor de alimentación SB, dos diodos DB y DF, un transformador TR con un magnetizador D4), un interruptor de alimentación SB, dos diodos DB y DF, un transformador TR con un magnetizador inductor LM y un inductor de fuga Llk, dos condensadores de salida CO1 y CO2, y el profundo, inductor LM y un inductor de fuga Llk, dos condensadores de salida CO1 y CO2, y el profundo, desinfección LED ultravioleta y esterilización. Lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda. Al diseñar la lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta y esterilización. Al diseñar la lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda, el circuito controlador de iluminación electrónica propuesto para operar en conducción discontinua (DCM), PFC se puede realizar de forma natural. Además, la energía almacenada en la fuga (DCM), PFC se puede realizar de forma natural. Además, la energía almacenada en la fuga del modo almacenado en el transformador TR durante el tiempo de apagado del transformador TR en la propuesta propuesta; la inductancia Llk del transformador TR durante el tiempo de apagado del transformador TR en la propuesta puede ser recuperado por el controlador y la eficiencia del circuito se puede mejorar aprovechando un SiC de Diodos Schottky con SiC de bajo voltaje como diodo de salida. Diodos Schottky con SiC de bajo voltaje como diodo de salida.

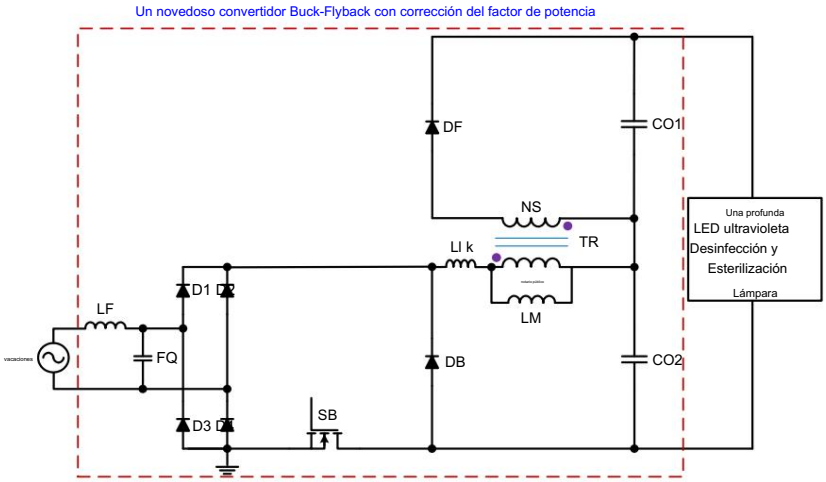


Figura 2. El controlador de iluminación electrónico de una sola etapa propuesto que utiliza electrodos Schottky de SiC para suministrando una lámpara de desinfección y esterilización LED ultravioleta profunda.

La Figura 3 es el diagrama equivalente del circuito controlador de iluminación electrónico de una sola etapa. utilizando diodos Schottky de SiC para suministrar una lámpara de desinfección y esterilización LED ultravioleta profunda desarrollada en este artículo con la función de corrección del factor de potencia. Lámpara de teorización desarrollada en este artículo con la función de corrección del factor de potencia teórico.

Formas de onda del controlador de iluminación electrónico de una sola etapa propuesto que utiliza SiC Schottky. Se muestran diodos para suministrar una lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda. Figura 4. Para analizar el circuito controlador de iluminación electrónica de una sola etapa propuesto para la lámpara de desinfección y esterilización LED ultravioleta profunda, se hacen suposiciones durante las operaciones en el circuito del controlador y se muestran a continuación:

(a) La fuente de voltaje equivalente del voltaje de la línea de servicio público de entrada después de pasar por el circuito rectificador de onda completa se denota por VREC. Dado que la frecuencia de conmutación fs es mucho mayor que la frecuencia de línea fAC, el voltaje rectificado VREC puede considerarse como un valor constante durante un ciclo de conmutación en el análisis del modo de circuito.

(b) Se considera la inductancia de fuga Llk del transformador TR .

(c) El inductor magnetizante LM del transformador TR está diseñado para funcionar en modo de conducción discontinua (DCM).

(d) Despreciando las caídas de voltaje de conducción y sus resistencias equivalentes de todos los diodos.

(e) Los componentes restantes del circuito se consideran componentes ideales.

Machine Translated by Google

(d) Despreciando las caídas de voltaje de conducción y sus resistencias equivalentes de todos los diodas.

(e) Los componentes restantes del circuito se consideran componentes ideales.

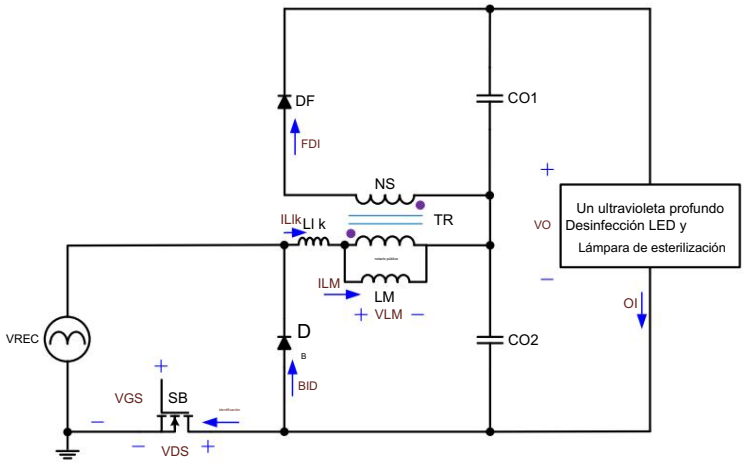


Figura 3. Circuito equivalente del circuito controlador de iluminación electrónica propuesto que utiliza SiC Schottky de electrodos para suministrar una lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda mientras se analizan los modos operativos.

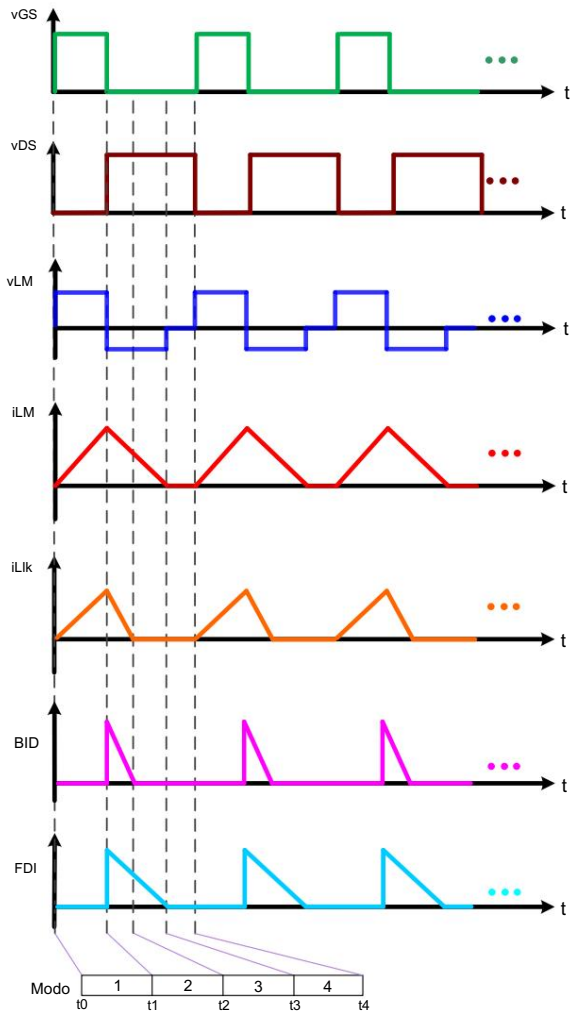


Figura 4. Formas de onda teóricas del controlador de iluminación electrónico de una sola etapa propuesto que utiliza SiC electrodos Schottky de SiC para suministrar una lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda.

Modo de Operación 1 (t0 ≤ t < t1): La Figura 5 muestra el circuito equivalente del propuesto Circuito controlador de iluminación electrónica de una sola etapa para suministrar una lámpara LED de desinfección y esterilización con luz ultravioleta profunda durante el Modo 1. El interruptor de encendido SB se activa y el

Machine Translated by Google

circuito controlador de iluminación electrónica de una sola etapa para suministrar una lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda durante el Modo 1. Se activa el interruptor de encendido SB y la fuente de voltaje equivalente VREC se conecta a ambos extremos del diodo DB, haciendo que el diodo DB esté en un estado no conductor con polarización inversa. La fuente de tensión equivalente, VREC, proporciona energía al condensador de salida CO2 y al inductor magnetizante LM del transformador TR, así como el inductor de fuga a través del interruptor SB, lo que resulta en un aumento lineal en la corriente del inductor de magnetización LM y la polaridad del voltaje en ambos lados del inductor de magnetización LM y el inductor de fuga Llk es positiva izquierda y negativa derecha. Los condensadores de salida CO1 y CO2 proporcionan energía a la lámpara de desinfección y esterilización LED ultravioleta profunda. Cuando el interruptor SB se apaga, la corriente del magnetizador El conductor LM alcanza su valor máximo y el modo finaliza.

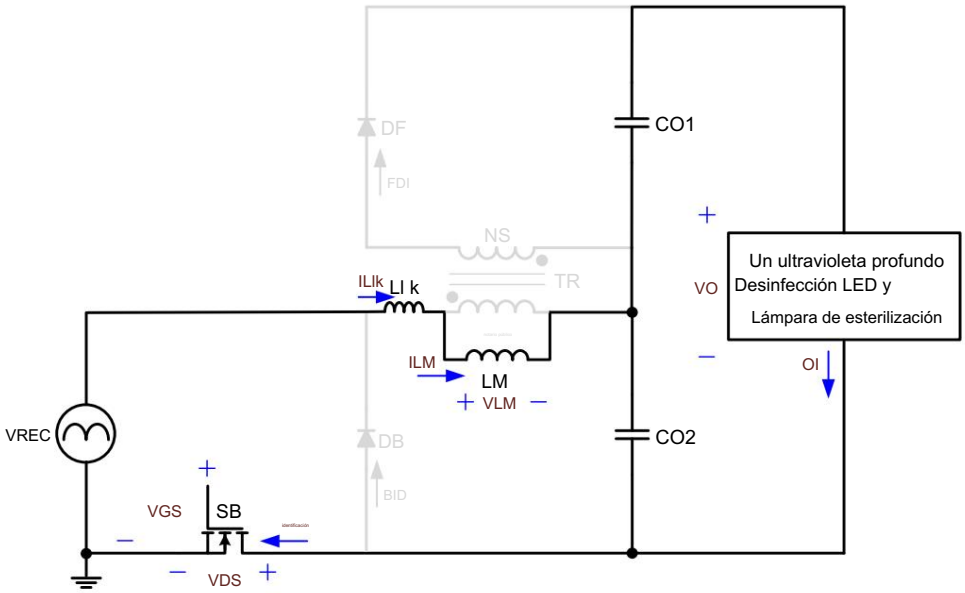


Figura 5. Circuito equivalente del circuito controlador de iluminación electrónico de una sola etapa propuesto que utiliza adaptadores SC para suministrar una lámpara LED de desinfección y esterilización ultravioleta profunda durante el Modo 1.

Modo Operacional 2 (t1 ≤ t < t2): La Figura 6 muestra el circuito equivalente del propuesto circuito controlador de iluminación electrónica de una sola etapa para suministrar una lámpara LED ultravioleta profunda de desinfección y esterilización durante el Modo 2. Cuando el interruptor de encendido SB se apaga, el voltaje de polaridad del inductor magnetizador LM y el inductor de fuga Llk se cambia a la derecha. positivo derecho y negativo izquierdo según la ley de Lenz, que convierte el diodo DB en estado de polarización directa. La corriente del inductor magnetizante LM fluye hacia donde el devanado del lado primario NP del transformador TR no tiene un extremo de punto, y de los dos extremos del devanado NP es derecha positiva y izquierda negativa. Por lo tanto, la polaridad del voltaje reflejado en ambos extremos del secundario NS es positiva izquierda y negativa derecha, lo que hace que el diodo DF funcione en polarización directa. El devanado lateral NS es positivo izquierdo y negativo derecho, lo que hace que el diodo DF funcione en estado de conducción. En este momento, el inductor magnetizante LM y el inductor de fuga Llk en estado de liberar energía, lo que hace que la corriente del inductor magnetizante LM aumente. El inductor de edad Llk está en el estado de liberar energía, lo que hace que la corriente de magnetización disminuya linealmente. Dado que el diodo DB está en estado de conducción polarizado directamente, la energía inductor LM para disminuir linealmente. Dado que el diodo DB está en la conducción polarizada directa del En este estado, la energía del inductor magnetizante LM y del inductor de fuga Llk se suministra al inductor magnetizante LM y el inductor de fuga Llk se suministra a la salida. condensador CO2 a través del diodo DB, y la corriente del inductor magnetizante LM muestra al condensador de salida CO2 a través del diodo DB, y la corriente de la magnetización en- una disminución lineal. Debido a la conducción polarizada directa del diodo DF, la energía de El conductor LM muestra una disminución lineal. Debido a la conducción polarizada directa del diodo DF, el inductor magnetizante LM se alimenta a través del transformador TR y el diodo DF a La energía del inductor magnetizante LM se suministra a través del transformador TR y de las capacidades de salida CO1 y CO2 , así como a la desinfección LED ultravioleta profunda. diodo DF a la capacitancia de salida CO1 y CO2 , así como al LED ultravioleta profundo y a la lámpara de esterilización. Además, los condensadores de salida CO1 y CO2 siguen proporcionando Lámpara de desinfección y esterilización. Además, los condensadores de salida CO1 y CO2 continúan la energía hacia la lámpara LED de desinfección y esterilización ultravioleta profunda. El modo termina cuando el inductor de fuga Llk termina de liberar energía y la corriente ILlk de la fuga El inductor Llk cae linealmente a cero.

Machine Translated by Google

para proporcionar energía a la lámpara LED de desinfección y esterilización ultravioleta profunda. El modo termina cuando el inductor de fuga Llk termina de liberar energía y la corriente ILlk del inductor de fuga Llk cae linealmente a cero.

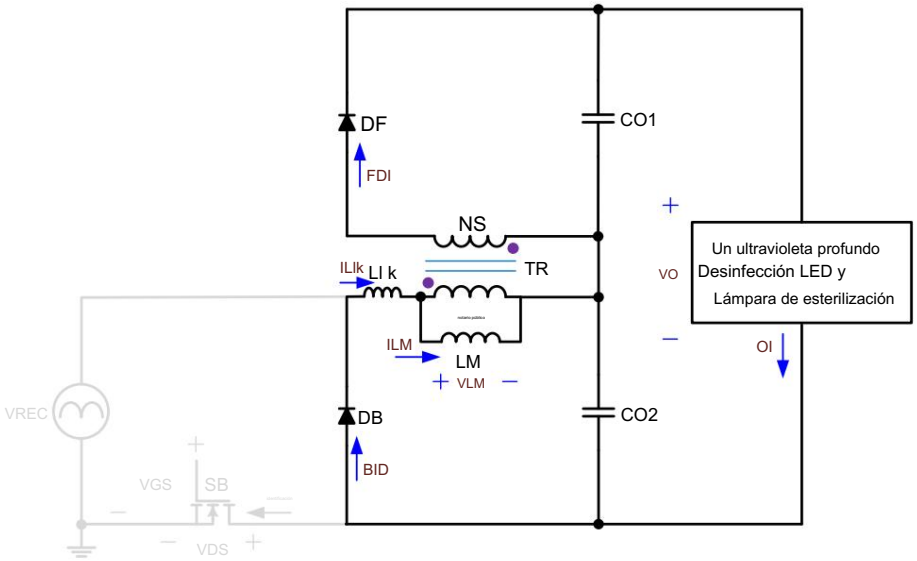


Figura 6. Circuito equivalente del circuito controlador de iluminación electrónico de una sola etapa propuesto que utiliza adaptadores Schottky de SiC para suministrar una lámpara LED de desinfección y esterilización ultravioleta profunda durante el Modo 2.

Modo Operativo 3 (t2 ≤ t < t3): La Figura 7 muestra el circuito equivalente del propuesto circuito controlador de iluminación electrónica de una sola etapa para suministrar una lámpara de desinfección y esterilización ultravioleta profunda LED durante el Modo 3. La energía del inductor magnetizante LM se suministra continuamente a través del transformador TR y el diodo DF a la salida ca. LM se suministra y a la lámpara LED ultravioleta profunda de desinfección y esterilización. pacitors CO1 y CO2 profunda de desinfección y esterilización. Este modo finaliza cuando la magnetización lámpara LED ultravioleta magnetizante de desinfección y esterilización. Este modo finaliza cuando el inductor magnetizante LM ha terminado de liberar energía y la corriente del inductor magnetizante ILM cae linealmente a cero.

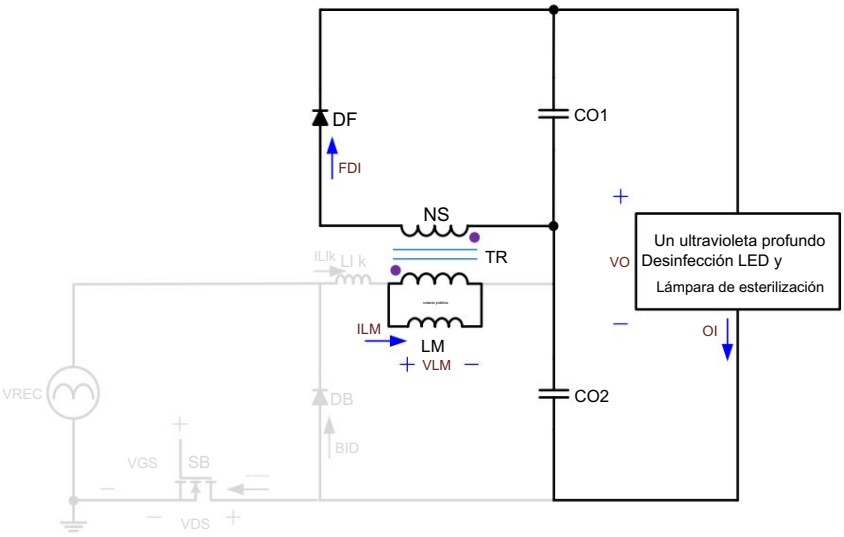
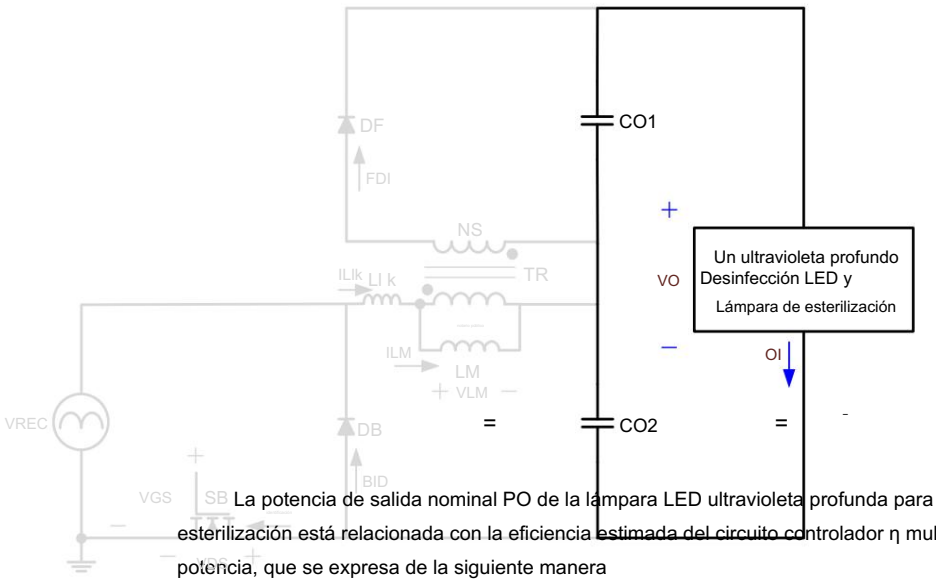


Figura 7. Circuito equivalente del circuito controlador de iluminación electrónico de una sola etapa propuesto que utiliza adaptadores Schottky de SiC para suministrar una lámpara LED ultravioleta profunda de desinfección y esterilización durante el Modo 3.

Modo operativo 4 (t3 ≤ t < t4): La Figura 8 muestra el circuito equivalente del circuito controlador de iluminación electrónico de una sola etapa propuesto para suministrar un LED ultravioleta intenso. lámpara de desinfección y esterilización durante el Modo 4. Los condensadores de salida CO1 y CO2

Machine Translated by Google

Modo Operacional 4 (t3 ≤ t < t4): La Figura 8 muestra el circuito equivalente del propuesto
Circuito controlador de iluminación electrónica de una sola etapa para suministrar una lámpara de esterilización y
desinfección LED ultravioleta profunda durante el Modo 4. Los condensadores de salida CO1 y CO2 proporcionan
energía de forma continua a la desinfección y esterilización LED ultravioleta profunda.
Proporciona energía a la lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda. lámpara.
Cuando el interruptor de alimentación SB se enciende nuevamente, este modo finaliza y el circuito vuelve
Cuando se vuelve a encender el interruptor de alimentación SB, este modo finaliza y el circuito vuelve al primer modo
de funcionamiento.
el primer modo de operación.



La potencia de salida nominal PO de la lámpara LED ultravioleta profunda para desinfección y esterilización está relacionada con la eficiencia estimada del circuito controlador η multiplicada por el PIN de potencia, que se expresa de la siguiente manera

Figura 8. Circuito equivalente del circuito controlador de iluminación electrónico de una sola etapa propuesto que utiliza electrodos
Schottky de SiC para suministrar una lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda durante
el Modo 4.

Figura 8. Circuito equivalente del circuito controlador de iluminación electrónico de una sola etapa propuesto que utiliza electrodos
SiC Schottky se compromete a suministrar una lámpara LED de desinfección y esterilización con luz ultravioleta profunda durante
Modo 4.

Reorganizando (5), la fórmula de diseño para la inductancia del magnetizador i

2.1. Guía de diseño del inductor magnetizante LM en el transformador TR

2.1. Guía de diseño del inductor magnetizante LM en el transformador TR

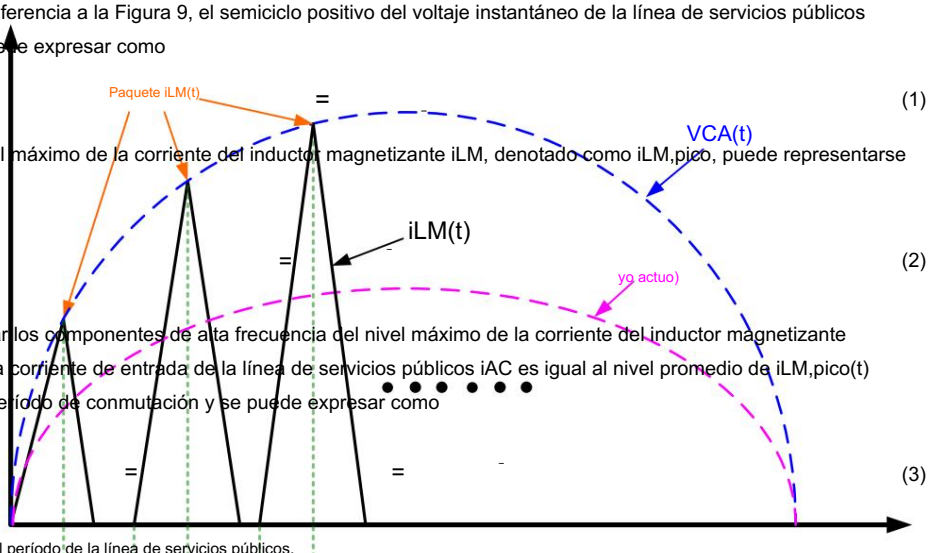
Para mostrar las pautas de diseño del inductor magnetizante LM en el transformador

Para mostrar las pautas de diseño del inductor magnetizante LM en el transformador TR, la Figura 9 ilustra formas de onda teóricas de la corriente del inductor magnetizante

En el antiguo TR, la Figura 9 ilustra las formas de onda teóricas de la corriente del inductor magnetizante iLM(t),
el nivel máximo de iLM-pk(t) y la corriente de entrada de la línea de servicios públicos iAC(t) en sentido positivo.
iLM(t), el nivel máximo de iLM-pk(t) y la corriente de entrada de la línea de servicios públicos iAC(t) en el semiciclo
positivo del voltaje de la línea de servicios públicos vAC(t).
del voltaje de la línea de servicio público vAC(t).

Con referencia a la Figura 9, el semiciclo positivo del voltaje instantáneo de la línea de servicios públicos
vAC(t) se puede expresar como

Actual



(1)

El nivel máximo de la corriente del inductor magnetizante iLM, denotado como iLM,pico, puede representarse
mediante

(2)

Al filtrar los componentes de alta frecuencia del nivel máximo de la corriente del inductor magnetizante
iLM,pico(t), la corriente de entrada de la línea de servicios públicos iAC es igual al nivel promedio de iLM,pico(t)
durante un período de conmutación y se puede expresar como

(3)

donde TAC es el período de la línea de servicios públicos.

El valor promedio del PIN de alimentación de la línea de servicio público se obtiene multiplicando el valor
instantáneo del voltaje de la línea de servicio público vAC(t) por el valor instantáneo de la corriente de la línea
de servicio público iAC(t), y luego promediando durante un período de un ciclo. , que se calcula de la siguiente
manera

Figura 9. Formas de onda ilustrativas de la corriente del inductor magnetizante iLM(t), el nivel máximo de iLM-pk(t)
y la corriente de entrada de la línea de servicios públicos iAC(t) en el semiciclo positivo del voltaje de la línea de servicios públicos vAC(t).

Figura 9. Formas de onda ilustrativas de la corriente del inductor magnetizante iLM(t), el nivel máximo de iLM-pk(t) y la corriente
de entrada de la línea de servicios públicos iAC(t) en el semiciclo positivo del voltaje de la línea de servicios públicos vAC(t).

2.2. Guía de diseño de los condensadores de salida CO1 y CO2.

La consideración de diseño de los condensadores de salida, CO1 y CO2, depende del voltaje de salida, la sobretensión permitida, la potencia de salida y el voltaje deseado. La ondulación de la tensión, ΔVO, es la mitad del valor pico a pico de la tensión de salida y la frecuencia de la red, y es función de la capacitancia CO y del condensador de pico.

Machine Translated by Google

Con referencia a la Figura 9, el semiciclo positivo del voltaje instantáneo de la línea de servicios públicos vAC(t) se puede expresar como

$$|vCA(t)| = \sqrt{2}vCA{-}rms|\sin(2\pi\, fACt)| \quad (1)$$

El nivel máximo de la corriente del inductor magnetizante iLM, denotado como iLM,pico, se puede representar mediante

$$iLM,pico(t) = \frac{\sqrt{2}vCA{-}rms|\sin(2\pi\, fACt)|DutyTS}{2LM} \quad (2)$$

Al filtrar los componentes de alta frecuencia del nivel máximo de la corriente del inductor magnetizante iLM,pico(t), la corriente de entrada de la línea de servicios públicos iAC es igual al nivel promedio de iLM,pico(t) durante un período de conmutación y puede ser expresado como

$$iAC(t) = \frac{1}{TAC}\int_0^{t_{C.A.}} iLM,pico(t)dt = \sin(2\pi\, fACt)\frac{\sqrt{2}vAC{-}rmsDuty2TS}{4LM} \quad (3)$$

donde TAC es el período de la línea de servicios públicos.

El valor promedio del PIN de alimentación de la línea de servicio público se obtiene multiplicando el valor instantáneo del voltaje de la línea de servicio público vAC(t) por el valor instantáneo de la corriente de la línea de servicio público iAC(t), y luego promediando durante un período de un ciclo. , que se calcula de la siguiente manera

$$PIN = \frac{1}{TAC}\int_0^{t_{C.A.}} vCA(t)iAC(t)dt = \frac{vCA{-}rms\ 2Duty2TS}{4LM} \quad (4)$$

La potencia de salida nominal PO de la lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda está relacionada con la eficiencia estimada del circuito controlador η multiplicada por la potencia de entrada PIN, que se expresa de la siguiente manera

$$PO = \eta PIN = \frac{\eta vCA{-}rms\ 2Duty2TS}{4LM} \quad (5)$$

Reorganización (5), la fórmula de diseño para la inductancia del inductor magnetizante. LM está dada por

$$LM = \frac{\eta vCA{-}rms\ 2Duty2TS}{4PO} \quad (6)$$

2.2. Guía de diseño de los condensadores de salida CO1 y CO2.

La consideración del diseño de los condensadores de salida, CO1 y CO2, depende de la tensión de salida CC, la sobretensión permitida, la potencia de salida y la ondulación de tensión deseada. La ondulación del voltaje, ΔVO, es la mitad del valor pico a pico del voltaje de salida al doble de la frecuencia de la red, y es función de la capacitancia CO y la corriente pico del capacitor (que es igual a la corriente de salida IO) y se puede expresar en la siguiente ecuación [23].

$$\Delta VO = IO\sqrt{\left(\frac{1}{2\pi \times 2\, fAC \times CO}\right)^2 + RESR2} \quad (7)$$

Despreciando la resistencia en serie equivalente, que se denota como RESR, de la salida condensador, la capacitancia CO del condensador de salida se puede expresar como

$$CO \geq \frac{OI}{4\pi\, fAC \times \Delta VO} = \frac{}{PO\ 4\pi\, fAC \times VO \times \Delta VO} \quad (8)$$

Además, la ondulación de voltaje ΔVO generalmente se selecciona entre 1% y 5% del voltaje de salida.

Machine Translated by Google

3. Resultados experimentales del circuito controlador de iluminación electrónica propuesto que utiliza SiC Schottky Didoes para suministrar una desinfección LED ultravioleta profunda y Lámpara de esterilización

La figura 10 muestra una fotografía de la desinfección y esterilización con LED ultravioleta profundo. módulo utilizado en este artículo con especificaciones que incluyen una longitud de onda de 275 nm y un ángulo de punta de 120 grados. Además, el fabricante ha conectado una corriente constante control IC en serie y un diodo Schottky en paralelo para protección de polaridad inversa en el sustrato de aluminio en cada módulo de desinfección y esterilización LED ultravioleta profunda.

La especificación de la lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda utilizada. en este documento consta de diez módulos de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda conectados en serie con un voltaje nominal de 90 voltios, una corriente nominal de 40 miliamperios y una potencia nominal de 3,6 vatios. La Tabla 1 muestra una comparación entre el ultravioleta profundo Módulo LED de desinfección y esterilización en [24] y el módulo utilizado en este artículo. Como Se puede ver en la Tabla 1, el módulo de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda. utilizado en este artículo tiene una longitud de onda máxima más grande, un ángulo de visión ligeramente más estrecho y una potencia de salida óptica ligeramente mayor y un ancho medio espectral ligeramente mayor que el módulo en [24].

La Tabla 2 muestra los parámetros eléctricos del prototipo de iluminación electrónica de una sola etapa. Circuito controlador para la lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda desarrollada en este papel. El voltaje de entrada de CA RMS era de 110 voltios y las especificaciones del ultra profundo Se utilizaron lámparas LED de desinfección y esterilización como parámetros de salida, que incluyen: potencia de salida de 3,6 vatios, voltaje de salida de 90 voltios y corriente de salida de 40 miliamperios. Además, las preocupaciones de seguridad y la garantía del cumplimiento de las normas reglamentarias para rayos UV La exposición y la seguridad eléctrica incluyen: No mire directamente a la fuente de luz ultravioleta cuando usar una lámpara de esterilización y desinfección ultravioleta profunda, ya que la radiación ultravioleta profunda puede causar eritema cutáneo, irritación conjuntival y fatiga. Además, no abuse de los rayos UV profundos. Lámparas de desinfección y esterilización como uso prolongado o contacto con lámparas UV o contacto directo. la exposición a la radiación ultravioleta puede causar daños en la piel y los ojos.

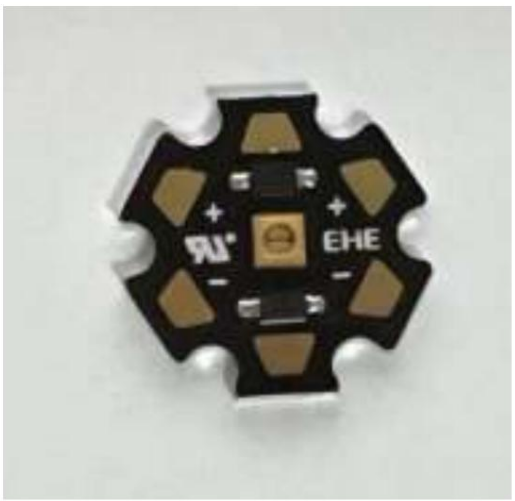


Figura 10. Fotografía del módulo de desinfección y esterilización con LED ultravioleta profundo utilizado en este papel con especificaciones que incluyen una longitud de onda de 275 nm y un ángulo de punta de 120 grados.

Figura 10. Fotografía del módulo de desinfección y esterilización con LED ultravioleta profundo utilizado en este papel con especificaciones que incluyen una longitud de onda de 275 nm y un ángulo de punta de 120 grados.

3.1. Cálculo del inductor magnetizante LM en el transformador TR

Haciendo referencia a (6) con un η de 0,8, un Duty de 0,25, un PO de 3,6 W, una frecuencia de conmutación fS de 50 kHz (que es el recíproco del período de conmutación TS), y un VAC rms de 110 V, la inductancia del inductor magnetizante LM se calcula mediante

$$LM = \frac{\eta vCA-rms\ 2Duty2TS}{4PO} = \frac{0,8 \times 1102 \times 0,252 \times \frac{1}{50.000}}{4 \times 3,6} = 834\ \mu H \quad (9)$$

Para operar la corriente del inductor magnetizante en un modo de conducción discontinua para permitir que el circuito controlador tenga una función de configuración de corriente de entrada y mejorar el factor de potencia, el inductor magnetizante LM se selecciona como 800 µH para el circuito controlador prototipo. .

Machine Translated by Google

Tabla 1. Comparaciones entre el módulo de desinfección y esterilización LED ultravioleta profunda en [24] y el utilizado en este trabajo.

Artículo	La desinfección LED ultravioleta profunda y Módulo de Esterilización en [24]	La desinfección LED ultravioleta profunda y módulo de esterilización utilizado en este papel
Valor típico de la longitud de onda máxima.	255 nanómetro	275 nanómetros
Valor típico del ángulo de visión de la potencia de salida óptica.	3,5 megavatios 125 grados	4 megavatios 120 grados
Ancho medio del espectro	11 nm	12 millas náuticas

Tabla 2. Especificaciones del circuito controlador de iluminación electrónico propuesto que utiliza adaptadores Schottky de SiC por el suministro de una lámpara de desinfección y esterilización LED ultravioleta profunda.

Parámetro	Valor
Voltaje CA de entrada vCA	110 voltios
Potencia nominal de salida PO	3,6W
Tensión nominal de salida VO	90 voltios
Corriente de salida nominal IO	40mA

Para operar la corriente del inductor magnetizante en una conducción discontinua Modo para permitir que el circuito del controlador tenga una función de configuración de corriente de entrada y Para mejorar el factor de potencia, el inductor magnetizante LM se selecciona como 800 µH para el Circuito controlador prototipo.

3.2. Cálculo de los condensadores de salida CO1 y CO2.

Sustituyendo los parámetros del circuito en la Ecuación (8), con un PO de 3,6 W, un fAC de 60 Hz, un VO de 90 V, un ΔVO de 2,7 V (que es el 3% del voltaje de salida VO), la capacitancia El CO se puede obtener mediante:

$$CO \geq \frac{\text{correos}}{4\pi\, fAC \times VO \times \Delta VO} = \frac{3.6}{4\pi \times 60 \times 90 \times 2,7} = 196,49\ \mu F \quad (10)$$

Al implementar el circuito prototipo, los valores de capacitancia de los capacitores de salida Se seleccionaron CO1 y CO2 para que fueran de 220 µF y que el voltaje soportado fuera de 250 V.

La Tabla 3 muestra las especificaciones de los componentes de la iluminación electrónica de una sola etapa. prototipo de circuito controlador para la lámpara LED ultravioleta profunda de desinfección y esterilización desarrollado en este trabajo. Además, los diodos portadores mayoritarios con tecnología Schottky en El material de banda prohibida ancha de carburo de silicio tiene un mayor rendimiento y se utiliza como salida. diodos DB y DF. Variando el número de sistemas de desinfección ultravioleta profunda conectados en serie y módulos de esterilización utilizados, un diseño escalable del controlador de iluminación electrónico propuesto Se pueden lograr circuitos para adaptarse a aplicaciones de mayor potencia y cargas variables. condiciones. Como resultado, la potencia de salida PO y el voltaje de salida VO se pueden variar mientras La corriente de salida IO permanece constante y se puede utilizar en una variedad de aplicaciones prácticas. escenarios. Parámetros clave del circuito de accionamiento propuesto, como la magnetización. El inductor y el condensador de salida se pueden rediseñar.

La Figura 11 muestra la forma de onda medida de la corriente del inductor magnetizante iLM. La Figura 12 muestra la forma de onda desplegada medida de la corriente del inductor magnetizante. iLM. En la Figura 12, se puede ver que la corriente del inductor magnetizante iLM opera en el modo de conducción discontinua. La Figura 13 muestra las formas de onda medidas de salida. voltaje VO y corriente de salida IO, y los valores promedio de voltaje y corriente de salida fueron 91,35 voltios y 38,57 miliamperios, respectivamente. La Figura 14 muestra las formas de onda de ondulación. del voltaje de salida VO y la corriente de salida IO.

Machine Translated by Google

La Figura 11 muestra la forma de onda medida de la corriente del inductor magnetizante iLM.

La Figura 12 muestra la forma de onda desplegada medida de la corriente del inductor magnetizante iLM. En la Figura 12, se puede ver que la corriente del inductor magnetizante iLM opera en dides para suministrar el modo de conducción discontinua. La Figura 13 muestra las formas de onda medidas del valor del componente de salida, voltaje VO y corriente de salida IO, y los valores promedio de voltaje y corriente de salida fueron 91,35 voltios y 38,57 miliamperios, respectivamente. La Figura 14 muestra las formas de onda de ondulación Inductor de filtro Lf de salida VO y la corriente de salida IO.

Tabla 4 muestra el factor de ondulación del voltaje de salida y el factor de ondulación de la corriente de salida del circuito iluminación electrónica prototipo del interruptor de encendido SB para una desinfección LED ultravioleta profunda y un inductor lámpara de esterilización a un voltaje de entrada de CA de 110 voltios RMS. Como se puede observar en la Tabla 4, dividiendo el el voltaje de salida pico a pico de 143,8 milivoltios por el valor promedio de 91,35 voltios produce un factor de voltaje del 0,16%; dividiendo la corriente de salida pico a pico de 1,1658 miliamperios por el valor promedio de 38,57 miliamperios produce un factor de ondulación actual del 3,02%.

Componentes clave utilizados en el circuito controlador de iluminación electrónica propuesto que utiliza SiC Schottky una lámpara LED de desinfección y esterilización ultravioleta profunda.	
Condensador de filtro Cf de salida	800 µH 12 µH 220 µF/200 V
Diodos D1, D2, D3, D4 La controlador de magnetizante LM 800 µH. inductor de fuga Llk 12 µH	1 mH 220 nF MUR460 IRF730
Condensador de ondulación de	VS-30CTH03-M3
Condensador de salida	Diodos D5, D6, D7, D8
Condensador de salida CO1 , CO2 220 µF/200 V	

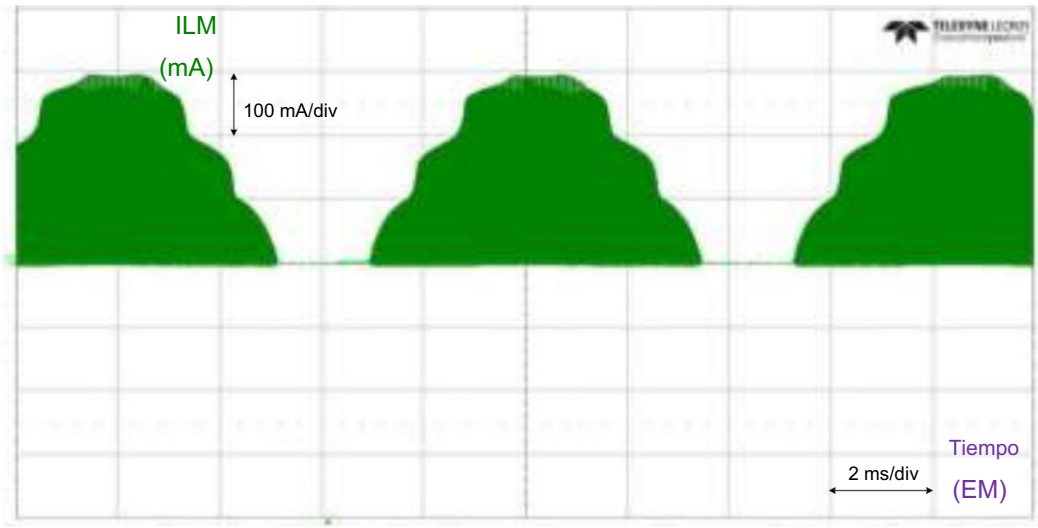


Figura 11. Figura 11. Corriente del inductor magnetizante LM (100 mA/div), escala de tiempo 2 ms/div. iLM (100 mA/

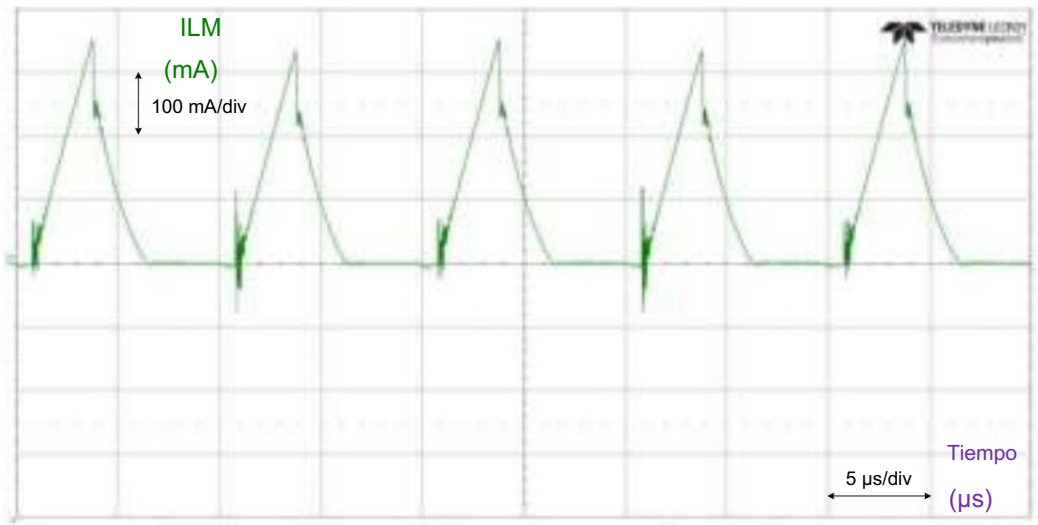


Figura 12. Forma de onda desplegada medida de la corriente del inductor magnetizante iLM (100 mA/div); escala de tiempo: 5 µs/div.

Figura 12. Forma de onda desplegada medida de la corriente del inductor magnetizante iLM (100 mA/div); escala de tiempo: 5 µs/div.

Machine Translated by Google

Figura 12. Forma de onda desplegada medida de la corriente del inductor magnetizante iLM (100 mA/div); tiempo mA/d: 5 µs/div.

Figura 12. Forma de onda desplegada medida de la corriente del inductor magnetizante iLM (escala 100 escala: 5 µs/div.

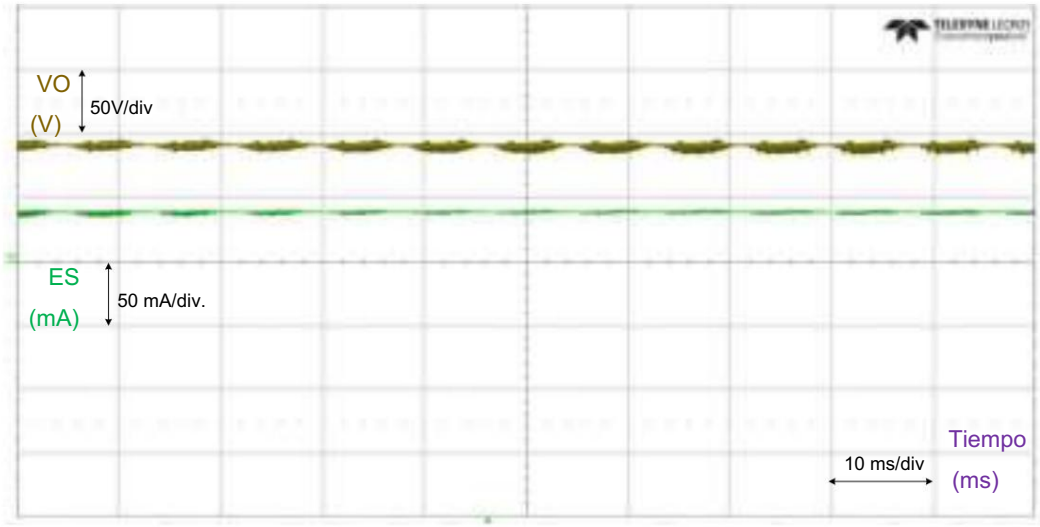


Figura 13. Formas de onda medidas del voltaje de salida Vo (50 V/div) y la corriente de salida Io (50 mA/div); escala de tiempo: 10 ms/div.

Figura 13. Formas de onda medidas del voltaje de salida Vo (50 V/div) y la corriente de salida Io (50 mA/div); escala de tiempo: 10 ms/div.

Figura 13. Formas de onda medidas del voltaje de salida Vo (50 V/div) y la corriente de salida Io (50 mA/div); escala de tiempo: 10 ms/div.

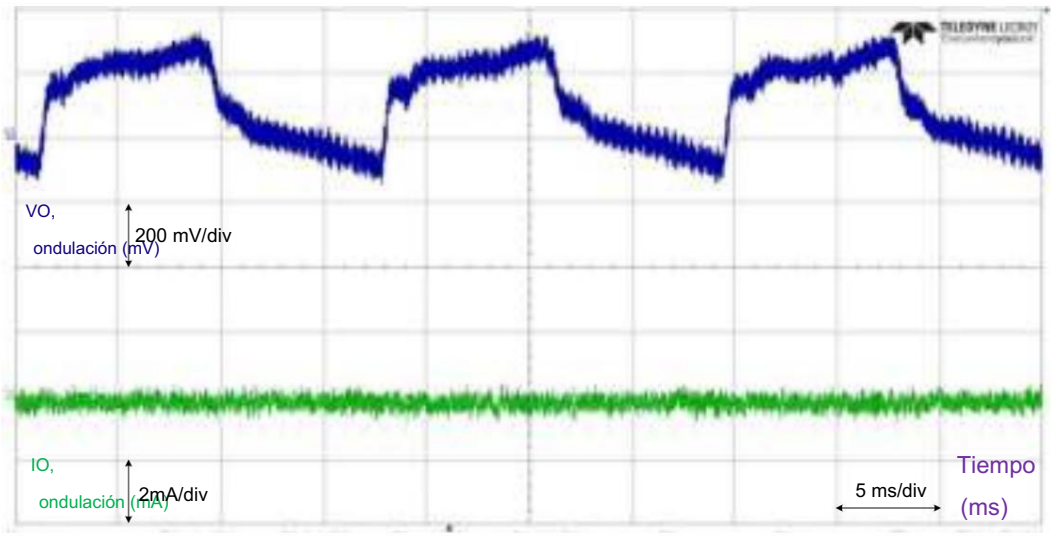


Figura 14. Formas de onda medidas de la ondulación del voltaje de salida Vo,ripple (200 mV/div) y la ondulación de la corriente de salida Io,ripple (2 mA/div); escala de tiempo: 5 ms/div.

La Tabla 4 muestra el factor de ondulación del voltaje de salida y el factor de ondulación de la corriente de salida del prototipo de circuito controlador de iluminación electrónica para una lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda con un voltaje de entrada de CA RMS de 110 voltios. Como se puede ver en la Tabla 4, dividir el voltaje de salida pico a pico de 143,8 milivoltios por el valor promedio de 91,35 voltios produce un factor de ondulación del voltaje de 0,16%; Al dividir la corriente de salida pico a pico de 1,1658 miliamperios por el valor promedio de 38,57 miliamperios se obtiene un factor de ondulación actual del 3,02%.

La Figura 15 muestra las formas de onda medidas del voltaje de entrada de CA vAC y la corriente de entrada iAC. De la figura, se puede indicar que la corriente de entrada de CA sigue el voltaje de entrada y las fases de las dos formas de onda son las mismas; por lo tanto, el prototipo del circuito controlador de una sola etapa propuesto para alimentar la lámpara LED ultravioleta profunda de desinfección y esterilización tiene el efecto de corrección del factor de potencia. Se midieron el factor de potencia y el factor de distorsión armónica total de la corriente de entrada en 0,9236 y 17,401%, respectivamente, utilizando un analizador de potencia. Además, la potencia de entrada medida del circuito controlador prototipo es 3,901 W y la potencia de salida es 3,583 W, y la eficiencia del circuito prototipo es 91,85%.

Machine Translated by Google

Parámetros	Valores
Valor pico a pico de la tensión de salida	143,8 mV
Valor medio de la tensión de salida	91,35 voltios
Factor de ondulación del voltaje de salida	0,16%
Valor pico a pico de la corriente de salida	1,1658 mA
Valor medio de la corriente de salida	38,57 mA
Factor de ondulación de la corriente de salida	3,02%

Tabla 4. Medición del factor de ondulación del voltaje de salida y del factor de ondulación de la corriente de salida de componentes electrónicos.

Circuito controlador prototipo de iluminación que utiliza didoes Schottky de SiC para una desinfección LED ultravioleta profunda la lámpara de esterilización

La Figura 15 muestra las formas de onda medidas del voltaje de entrada de CA vAC y la corriente de entrada y iAC. De la figura, se puede indicar que la corriente de entrada de CA sigue el voltaje de entrada.

y las fases de las dos formas de onda son las mismas; por lo tanto, el prototipo del valor pico a pico del circuito

salida para suministrar a la lámpara desinfectante LED ultravioleta profunda y el valor medio de la lámpara esterilizadora

corrección del factor de potencia. El factor de potencia y el factor de ondulación total del voltaje de salida Valor pico a

El factor de distorsión armónica de la corriente de entrada se midió en 0,9236 y 17,401%,

potencia. Además, la potencia de entrada medida del circuito impulsor tipo pro- medio de corriente de salida es 3.901

W y la potencia de salida es 3.583 W, y

la eficiencia del factor de ondulación del circuito prototipo de corriente de salida es 91,85%.

Parámetros	Valores
Valor pico a pico de la tensión de salida	143,8 mV
Valor medio de la tensión de salida	91,35 voltios
Factor de ondulación del voltaje de salida	0,16%
Valor pico a pico de la corriente de salida	1,1658 mA
Valor medio de la corriente de salida	38,57 mA
Factor de ondulación de la corriente de salida	3,02%

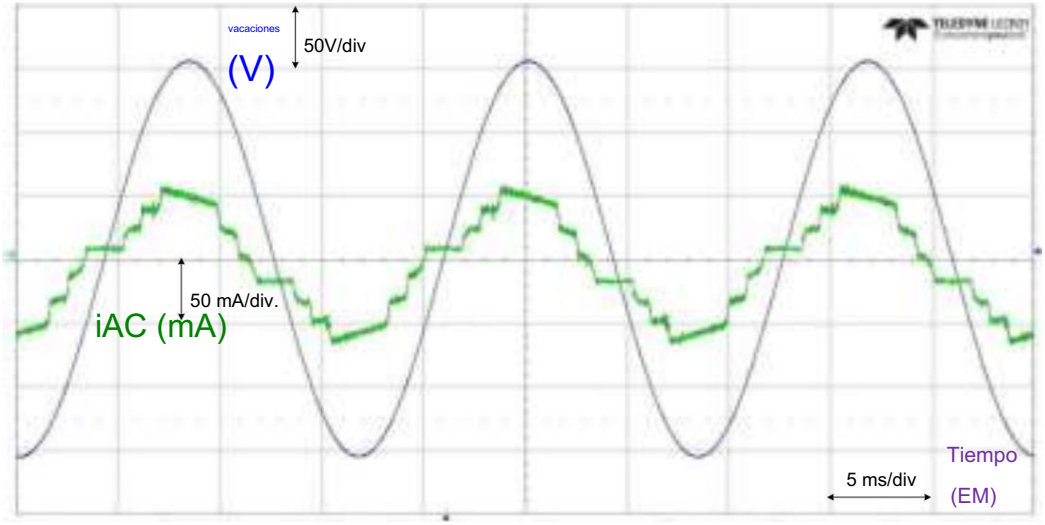


Figura 15. Voltaje de línea de servicio público de entrada medido vAC (50 V/div) y corriente iAC (50 mA/div), escala de tiempo: Figura 15. Voltaje de línea de servicio público de entrada medido vAC (50 V/div) y corriente iAC (50 mA/div), tiempo escala: 5 ms/div.
5 ms/div.

En [19], se muestra un convertidor reductor-elevador inverso con un

con reglas de 18 W con un amortiguador sin pérdidas y suministra una potencia nominal de

convertidor reductor y una potencia nominal de 3,6 W (90 V/0,04 A). Como se puede ver en la Tabla 3,

Tabla 3, ambos controladores LED se alimentan con un voltaje de entrada de CA de 110 V y usan una fuente de alimentación.

interruptor. El circuito controlador LED AC-DC propuesto ahorra un elemento magnético y

circuito son magnéticos y comparación con [19]. Además, [19] THD actual y el

La eficiencia del controlador LED AC-DC propuesto es mejor que la del controlador existente.

Tabla 5. Comparaciones entre el controlador LED AC-DC existente en [19] y el propuesto.

Artículo	Controlador LED AC-DC existente en Referencia [19]	Controlador LED AC-DC propuesto
Topología del circuito	Integración de un buck-boost inverso convertidor con un amortiguador sin pérdidas	Integración de un convertidor reductor y un convertidor de retorno
Voltaje CA de entrada	110 voltios	110 voltios
Potencia de salida	18 W (60 V/0,3 A) 1	3,6 W (90 V/0,04 A)
Número de interruptor requerido		1
Número de condensadores necesarios	4	3
Número de elemento magnético requerido	3	2
Número de diodos necesarios	7	6
Factor de potencia medido	0,9737	0.9236
THD actual medida	18,422%	17,401%
Eficiencia del circuito medida	85,01%	91,85%

El controlador LED AC-DC propuesto es mejor que el controlador existente.

Machine Translated by Google

4. Conclusiones

Este artículo propone un prototipo de circuito controlador de iluminación electrónica de una sola etapa que utiliza electrodos Schottky de SiC para una lámpara LED de desinfección y esterilización con luz ultravioleta profunda, que integra un convertidor reductor y un convertidor flyback para formar un interruptor AC-DC de una sola etapa y una sola potencia. Arquitectura de circuito convertidor de potencia con función de corrección de factor. Al diseñar el inductor del convertidor de potencia CA-CC para que funcione en modo de conducción discontinua, el efecto de corrección del factor de potencia se puede lograr de forma natural. Además, el circuito controlador de iluminación electrónico de una sola etapa propuesto emplea un diodo Schottky portador mayoritario hecho de material semiconductor de banda prohibida ancha de carburo de silicio y recupera la energía de la inductancia de fuga del transformador, mejorando así la eficiencia de conversión del circuito controlador. En este artículo, se desarrolló y probó un prototipo de circuito controlador de iluminación electrónica LED ultravioleta profunda de 3,6 vatios para una lámpara de desinfección y esterilización . Con un voltaje de entrada de CA de 110 voltios RMS y una potencia de salida nominal, los resultados fueron: factor de ondulación del voltaje de salida inferior al 1%, factor de ondulación de la corriente de salida inferior al 4%, factor de potencia superior a 0,9, factor de distorsión armónica total de la corriente de entrada inferior superior al 18% y una eficiencia del circuito superior al 90%. El circuito controlador prototipo de iluminación electrónica LED ultravioleta profunda de una sola etapa propuesto en este documento puede simplificar la cantidad de interruptores de alimentación necesarios en el circuito controlador y tiene una alta eficiencia de

Contribuciones de los autores: C.-AC desarrolló la topología del circuito del controlador de iluminación electrónico y diseñó la metodología; C.-HC, H.-LC y E.-CC organizaron los recursos de software y configuraron la simulación junto con las simulaciones de circuitos realizadas; L.-FL, S.-HH y C.-KL implementaron el prototipo del circuito controlador de iluminación electrónica, llevaron a cabo las mediciones del circuito y analizaron los resultados experimentales con la guía de C.-AC; C.-AC preparó el primer borrador del artículo y revisó el manuscrito para su presentación. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (NSTC) de Taiwán por sus números de subvención MOST 110-2221-E-214-014, NSTC 111-2221-E-214-011 y NSTC 112-2221 -E. -214-005.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos presentados en este estudio están disponibles en el artículo.

Agradecimientos: Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (NSTC) de Taiwán por sus subvenciones números MOST 110-2221-E-214-014, NSTC 111-2221-E-214-011 y NSTC. 112-2221-E-214-005.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Kebbi, Y.; Mahoma, AI; Sant'Ana, AS; Prado-Silva, LD; Liu, D.; Ding, T. Avances recientes en la aplicación de la tecnología UV-LED para la inactivación microbiana: progreso y mecanismo. compr. Rev. Ciencia de los alimentos. Seguridad alimentaria. 2020, 19, 3501–3527. [Referencia cruzada] [PubMed]
2. Shatalov, M.; Jain, R.; Saxena, T.; Dobrinsky, A.; Shur, M. Desarrollo de LED UV profundos y problemas actuales en tecnología de materiales y dispositivos. En Semiconductores y Semimetales; Elsevier: Ámsterdam, Países Bajos, 2017; Volumen 96, págs. 45–83.
3. Koutchma, T.; Popovi´c, V.; Green, A. Descripción general de la tecnología LED ultravioleta (UV) para aplicaciones en la producción de alimentos. En Tecnología LED ultravioleta para aplicaciones alimentarias; Prensa académica: Cambridge, MA, EE. UU., 2019; págs. 1–23.
4. Akgün, diputado; Ünlütürk, S. Efectos de los diodos emisores de luz ultravioleta (LED) sobre la inactivación microbiana y enzimática del jugo de manzana. En t. J. Microbiol alimentario. 2017, 260, 65–74. [Referencia cruzada] [PubMed]
5. Kaya, Z.; Yıldız, S.; Ünlütürk, S. Efecto de la irradiación UV-C y el tratamiento térmico sobre la estabilidad de la vida útil de un jugo de limón y melón Mezcla: Enfoque estadístico multivariado. Innovación. Ciencia de los alimentos. Emergente. Tecnología. 2015, 29, 230–239. [Referencia cruzada]
6. Guan, Z.; Liu, P.; Zhou, T.; Zhou, L.; Zhang, D.; Xie, Q.; Yu, Q.; Ey.; Wang, S.; Wang, X.; et al. Estudio sobre la regulación del campo luminoso de la desinfección con LED UVC para el transporte en cadena de frío. Aplica. Ciencia. 2022, 12, 1285. [Referencia cruzada]
7. Liang, JJ; Liao, CC; Chang, CS; Lee, CY; Chen, SY; Huang, SB; Sí, YF; Singh, KJ; Kuo, HC; Lin, YL; et al. La eficacia de los prototipos de dispositivos de luz ultravioleta lejana (UVC) con diferentes longitudes de onda para desinfectar el SARS-CoV-2. Aplica. Ciencia. 2021, 11, 10661. [Referencia cruzada]
8. Juárez-León, FA; Soriano-Sánchez, AG; Rodríguez-Licea, MA; Perez-Pinal, FJ Diseño e implementación de un germicida Lámpara LED UVC. Acceso IEEE 2020, 8, 196951–196962. [Referencia cruzada] [PubMed]

Machine Translated by Google

9. Alonso, JM; Costa, ENOJADO; Ordiz, C. Convertidor Buck-Flyback integrado como fuente de alimentación fuera de línea de alto factor de potencia. IEEE Trans. Indiana electrón. 2008, 55, 1090–1100. [Referencia cruzada]

10. Gacio, D.; Alonso, JM; Calleja, AJ; García, J.; Rico-Secades, M. Una fuente de alimentación de factor de potencia alto de etapa única de entrada universal para LED HB basada en un convertidor reductor-flyback integrado. Traducción IEEE. Indiana electrón. 2010, 58, 589–599. [Referencia cruzada]

11. Abdelmessih, GZ; Alonso, JM; Costa, Análisis de pérdidas MAD para mejorar la eficiencia del controlador LED Buck-Flyback integrado. Traducción IEEE. Aplica. Ind. 2018, 54, 6543–6553. [Referencia cruzada]

12. Abdelmessih, GZ; Alonso, JM; Tsai, WT Análisis y experimentación con un nuevo controlador LED fuera de línea de alto factor de potencia basado en un convertidor buck flyback integrado intercalado. Traducción IEEE. Aplica. Ind. 2019, 55, 4359–4369. [Referencia cruzada]

13. Luz, PC; Bolán, PE; Maboni, T.; Cosetin, señor; da Silva, MF; do Prado, RN Un convertidor Buck-Boost-Flyback aislado integrado para alimentar lámparas LED al alumbrado público con capacitancias reducidas. En Actas de la 11.ª Conferencia Internacional IEEE/IAS sobre Aplicaciones Industriales de 2014, Juiz de Fora, Brasil, 7 a 10 de diciembre de 2014; págs. 1–6.

14. Divya, KM; Parackal, R. Convertidor flyback reductor-elevador integrado de alto factor de potencia que impulsa múltiples salidas. En Actas de la Conferencia Internacional en Línea sobre Ingeniería y Tecnologías Verdes (IC-GET) de 2015, Coimbatore, India, 27 de noviembre de 2015; págs. 1 a 5.

15. Cheng, California; Chung, TY Un novedoso controlador integrado con PFC para suministrar diodos emisores de luz. En Actas de la 41.ª Conferencia Anual de la IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2015), Yokohama, Japón, 9 a 12 de noviembre de 2015; págs. 3514–3518.

16. Poorali, B.; Adib, E. Análisis del convertidor SEPIC-flyback integrado como corrección del factor de potencia de un solo interruptor de una sola etapa Controlador LED. Traducción IEEE. Indiana electrón. 2016, 63, 3562–3570. [Referencia cruzada]

17. Cheng, C.-A.; Chang, CH-H.; Cheng, HL; Chang, M.-T. Un novedoso controlador LED con corrección del factor de potencia adecuado para aplicaciones de alumbrado público. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Electrónica Energética del Futuro 2017 (IFEEC 2017): ECCE Asia, Kaohsiung, Taiwán, 3 a 7 de junio de 2017; págs. 1–4.

18. Cheng, California; Chang, CH; Cheng, HL; Chang, CE; Lai, CC Un novedoso controlador de lámpara de tubo LED con corrección del factor de potencia para aplicaciones de iluminación interior. En Actas de la Séptima Conferencia Global de Electrónica de Consumo (GCCE) del IEEE de 2018, Nara, Japón, 9 a 12 de octubre de 2018; págs. 700–701.

19. Cheng, California; Chen, YL; Chen, YJ; Lai, SW Una novedosa fuente de alimentación CA-CC rentable para aplicaciones de iluminación LED de interiores. En Actas de la Conferencia de Ingeniería de Energía y Energía de Asia-Pacífico IEEE PES de 2019 (APPEEC), Macao, China, 1 a 4 de diciembre de 2019; págs. 1–3.

20. Cheng, California; Lan, LF; Hou, SH; Lin, CK Un controlador de iluminación electrónica de una sola etapa para una lámpara de esterilización y desinfección LED ultravioleta profunda. En actas del taller IEEE de 2023 sobre dispositivos y aplicaciones de energía de banda ancha en Asia (WiPDA Asia), Hsinchu, Taiwán, 27 a 29 de agosto de 2023; págs. 1–3.

21. Uso eficaz de dispositivos eléctricos: comprensión de los dispositivos eléctricos de carburo de silicio y ejemplos de aplicación que utilizan los méritos. ROHM Semiconductor, 2017. Disponible en línea: https://pages.rohm.com.tw/rs/247-PYD-578/images/TechWeb_E_DL_SiC.pdf (consultado el 31 de julio de 2024).

22. Nota de aplicación de módulos y dispositivos de potencia de SiC, ROHM Semiconductor, 2020. Disponible en línea: https://fscdn.rohm.com/en/productos/databook/applinote/discrete/sic/common/sic_appli-e.pdf (consultado el 31 de julio de 2024).

23. NOTA DE APLICACIÓN AN966, STMicroelectronics, “L6561, CORRECTOR DEL FACTOR DE POTENCIA EN MODO DE TRANSICIÓN MEJORADO”, págs. 1–23, marzo de 2003. Disponible en línea: https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00004002-l6561 -mejorado -modo-de-transición-corrector-del-factor-de-potencia-stmicroelectronics.pdf (consultado el 31 de julio de 2024).

24. SEOULVIOSYS. Serie UV CA3535 (CUD5GF1B). Disponible en línea: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Seoul%20Semiconductor/CUD5GF1B_R0.1_Prelliminary_2-3-20.pdf (consultado el 31 de julio de 2024).

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Reducción eficiente de la dimensionalidad de la señal de voz mediante Técnicas de valor complejo

Sungkyun Ko [1] y Parque Minho 2,*

[1] Departamento de Convergencia de TI de IA, Universidad Soongsil, Seúl 06978, República de Corea;
[2] kosungkyun@naver.com Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad Soongsil, Seúl 06978, República de Corea
* Correspondencia: mhp@ssu.ac.kr

Resumen: En este estudio, proponemos el algoritmo CVMFCC-DR (Reducción de Dimensionalidad de Coeficientes Cepstrales de Frecuencia Mel de Valor Complejo) como un método eficiente para reducir la dimensionalidad de las señales de voz. Al utilizar la técnica MFCC de valores complejos, que considera componentes tanto reales como imaginarios, nuestro algoritmo permite la reducción de dimensionalidad sin pérdida de información y al mismo tiempo reduce los costos computacionales. La eficacia del algoritmo propuesto se valida mediante experimentos que demuestran su eficacia en la construcción de un modelo de reconocimiento de voz utilizando una red neuronal de valores complejos. Además, se introduce un método de interpretación softmax de valores complejos para números complejos. Los resultados experimentales indican que el enfoque produce un rendimiento mejorado en comparación con las técnicas tradicionales basadas en MFCC, destacando así su potencial en el campo del reconocimiento de voz.

Palabras clave: coeficientes cepstrales de frecuencia mel; corrección de errores de redes neuronales de valor complejo; propagación hacia atrás; softmax de valores complejos

check for updates

Cita: Ko, S.; Park, M. Reducción eficiente de la dimensionalidad de la señal del habla mediante técnicas de valores complejos. Electrónica 2024, 13, 3046. https://doi.org/10.3390/electrónica13153046

Editores académicos: Xin Geng, Padma Iyenghar y Elke Pulvermüller

Recibido: 3 de junio de 2024
Revisado: 31 de julio de 2024
Aceptado: 31 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Hoy en día, el procesamiento y el reconocimiento de señales de voz desempeñan papeles cruciales en diversos dominios de aplicación. Estas tecnologías se utilizan para diversos fines, como convertir comandos de voz en texto o identificar al propietario de una voz. El avance de la tecnología de reconocimiento de voz puede mejorar la interacción hombre-máquina, mejorando así la productividad y la eficiencia en diversas industrias. Sin embargo, las señales del habla poseen formas muy diversas y características de alta dimensión, lo que hace que el procesamiento y el reconocimiento efectivos sean un desafío persistente. La diversidad y la alta dimensionalidad de las señales de voz dificultan la reducción de la dimensionalidad y el reconocimiento de patrones, lo que genera mayores costos computacionales. Por lo tanto, reducir de manera eficiente la dimensionalidad de las señales de voz y mejorar el rendimiento de los modelos de reconocimiento de voz basados en redes neuronales es un desafío importante.

Las tecnologías de procesamiento y reconocimiento de voz son esenciales en diversas aplicaciones, como interfaces de voz, asistentes virtuales y traducción automática. Lograr resultados de reconocimiento y procesamiento de señales de voz más precisos y eficientes puede mejorar significativamente la experiencia del usuario de los servicios relacionados. En consecuencia, se llevan a cabo investigaciones continuas en el campo del procesamiento y reconocimiento de señales de voz. Las señales de voz exhiben características de alta dimensión, lo que dificulta la reducción efectiva de la dimensi Además, el reconocimiento preciso de diversos patrones de habla requiere modelos complejos de redes neuronales, lo que, a su vez, aumenta los costos computacionales [1]. Por lo tanto, reducir efectivamente la dimensionalidad de las señales de voz sin pérdida de información y al mismo tiempo mejorar la precisión y eficiencia de los modelos de reconocimiento de voz basados en redes neuronales es una tarea crucial.

A pesar de la rica literatura sobre redes de valores complejos, ha habido pocos ejemplos de su aplicación en el procesamiento de audio o voz. Dado que el sistema auditivo humano

Machine Translated by Google

procesa el sonido en el dominio de la frecuencia, también tiene sentido explorar redes neuronales de valor complejo para el procesamiento de audio en lugar de depender únicamente de redes neuronales de valor real en el dominio del tiempo [2].

Investigaciones recientes han logrado avances significativos en el reconocimiento de voz al combinar métodos tradicionales como los coeficientes cepstrales de frecuencia de fusión (MFCC) con redes neuronales [3]. Si bien la técnica MFCC se ha utilizado ampliamente para la extracción de características del habla, tiene el inconveniente de no poder realizar una reducción de dimensionalidad sin pérdidas, ya que sólo utiliza valores reales. En otras palabras, reducir la cantidad de MFCC conduce a la pérdida de información, lo que disminuye la precisión del reconocimiento de voz. Estos métodos todavía muestran una eficacia limitada y son necesarios enfoques mejorados más allá de los métodos de aprendizaje tradicionales.

La utilización de la representación compleja de MFCC permite la consideración de partes tanto reales como imaginarias, lo que permite una reducción de dimensionalidad sin pérdidas. Además, el empleo de redes neuronales de valores complejos puede reflejar cambios de fase mediante operaciones de multiplicación complejas [4], representando mejor las características de las señales de voz. Se espera que este enfoque permita una reducción de dimensionalidad y un reconocimiento de voz basado en redes neuronales más eficientes en comparación con los métodos existentes.

En este estudio, proponemos el algoritmo CVMFCC-DR para una reducción de dimensionalidad de la señal de voz eficiente y sin pérdidas. Al combinar CVMFCC-DR con redes neuronales de valores complejos, esta técnica puede demostrar un rendimiento de reconocimiento de voz superior en comparación con los métodos existentes.

Las principales aportaciones de este estudio son las siguientes:

- Proponer una técnica eficiente de reducción de dimensionalidad (CVMFCC-DR) utilizando la representación compleja de MFCC.
- Mejorar el rendimiento del reconocimiento de voz mediante la combinación de MFCC de valores complejos y redes neuronales de valores complejos.
- Proponer un nuevo método de interpretación para una función softmax de valores complejos con entradas complejas.

Este artículo comienza presentando la técnica MFCC existente y las redes neuronales de valores complejos. Luego proporciona una explicación detallada del algoritmo CVMFCC-DR propuesto y el método de aprendizaje para redes neuronales de valores complejos [5]. Posteriormente, se valida experimentalmente la efectividad del método propuesto y se analizan los resultados. Finalmente, el artículo concluye con un resumen de los hallazgos del estudio y sugiere direcciones para futuras investigaciones.

2. Trabajos relacionados

En el campo del reconocimiento de voz, se utilizan varios enfoques y técnicas basados en redes neuronales . Se utilizan diferentes tipos de redes neuronales, como CNN, RNN, LSTM y DNN, cada una con sus propias ventajas y desventajas [3]. Además, también se están investigando modelos híbridos que combinen métodos tradicionales con estructuras de redes neuronales . Los modelos híbridos pueden optimizar el rendimiento combinando las fortalezas de cada estructura, pero también tienen el inconveniente de una mayor complejidad en la implementación e interpretación [6].

En medio de estos desarrollos, las técnicas tradicionales de extracción de características, como la técnica MFCC, todavía se utilizan ampliamente como entradas para redes neuronales [3]. Además, la exploración de arquitecturas neuronales novedosas, como las redes neuronales de valores complejos, podría descubrir nuevas perspectivas y posibles avances en las capacidades de reconocimiento de voz. Recientemente, se han realizado estudios que muestran que los FPGA se pueden utilizar para mejorar significativamente la velocidad de cálculo de números complejos [7]. Los resultados de esta investigación demuestran empíricamente que la implementación de hardware de operaciones con números complejos puede generar mejoras prácticas en el rendimiento. Además, un estudio reciente implementó redes neuronales de valor complejo en FPGA para clasificación, lo que demuestra una precisión superior en comparación con las redes neuronales de valor real y logra mejoras significativas en la velocidad con respecto a los sistemas basados en CPU [8]. Esto da lugar a la expectativa de que en el futuro, las CPU que actualmente solo admiten operaciones con números reales algún día puedan admitir también operaciones con n

Machine Translated by Google

Según estos estudios, la utilización de representaciones de números complejos permite codificar pares de números reales como números complejos únicos, lo que reduce efectivamente la dimensión de entrada a la mitad. Esta reducción de dimensionalidad disminuye la cantidad de parámetros del modelo y mejora la eficiencia computacional. En consecuencia, la evidencia experimental muestra que las redes neuronales de valores complejos pueden lograr un rendimiento igual o superior con menos parámetros en comparación con las redes neuronales convencionales de valor real.

A medida que la investigación continúa superando los límites, una combinación sinérgica de métodos probados y enfoques innovadores puede allanar el camino para la próxima generación de sistemas de reconocimiento de voz robustos y de alto rendimiento.

3. Conocimientos previos

Se están realizando varios estudios en el campo del reconocimiento y clasificación del habla, y en esta sección presentamos los MFCC (coeficientes cepstrales de frecuencia de fusión) [3]. La técnica MFCC es uno de los métodos de extracción de características comúnmente utilizados en los campos del procesamiento de señales de voz y el reconocimiento de voz. La técnica MFCC representa las características de frecuencia de las señales de voz y se utiliza principalmente para representar y reconocer señales de voz de forma eficaz. El principio básico de la técnica MFCC se ilustra en la Figura 1.

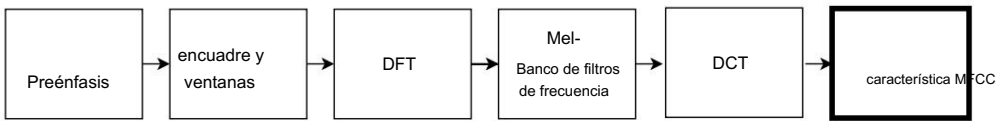


Figura 1. Una visión general del proceso de la técnica MFCC.

Preénfasis: el preénfasis es esencialmente un filtro de paso alto. Debido a la estructura del cuerpo humano, los componentes de alta frecuencia tienden a disminuir en el sonido emitido durante la producción del habla. Por lo tanto, el preénfasis es el proceso de aplicar un filtro de paso alto para amplificar primero los componentes atenuados de alta frecuencia.

Encuadre y ventanas: las señales de voz se dividen en segmentos cortos llamados marcos para su análisis. Esto se debe a que las características del habla permanecen relativamente estables durante períodos breves. Estos cuadros se superponen ligeramente para capturar los cambios del habla de manera más efectiva. Cada fotograma se procesa mediante una técnica de ventana, que mejora el análisis. Los tipos de ventanas comunes incluyen las ventanas Hamming y Hanning. Este método de encuadre permite un análisis más preciso de datos de voz complejos, lo cual es crucial para desarrollar tecnologías de síntesis y reconocimiento de voz. Si bien los detalles de implementación específicos pueden variar, estos principios fundamentales se utilizan ampliamente en los sistemas de procesamiento del habla.

Transformada de Fourier discreta: para calcular el espectro de potencia, se utiliza DFT (Transformada de Fourier discreta) para calcular el espectro de potencia para cada cuadro obtenido anteriormente. Este proceso permite discernir la distribución de energía específica de la frecuencia de la señal de voz en cada cuadro.

Banco de filtros Mel-Frequency: El filtro de paso de banda mel es un conjunto de filtros diseñados para extraer señales de voz de forma no lineal, imitando el sistema auditivo humano.
Normalmente construido con 40 filtros triangulares, analiza las características de frecuencia de las señales de voz.

Transformada de coseno discreta: DCT (Transformada de coseno discreta) expresa una secuencia finita de puntos de datos como una suma de funciones coseno que oscilan a diferentes frecuencias. En el proceso MFCC, se aplica DCT al banco de filtros mel para seleccionar coeficientes de aceleración o para separar la relación en magnitudes logarítmicas espectrales del banco de filtros.

El reconocimiento de voz utilizando MFCC se puede emplear eficazmente en diversos entornos [9], y este método puede lograr una alta precisión cuando se combina con modelos de aprendizaje profundo. Por lo tanto, MFCC sirve como un insumo crucial para los modelos de aprendizaje profundo para el reconocimiento de voz [10].

Machine Translated by Google

4. Método propuesto En

esta sección, proponemos un método para realizar eficientemente la reducción de la dimensionalidad de la señal de voz utilizando MFCC de valores complejos y redes neuronales de valores complej En la Figura 2 se presenta una descripción general del enfoque propuesto. Esta figura ilustra el enfoque propuesto para la clasificación de voz utilizando redes neuronales de valores complejos. El proceso comienza con la entrada de voz, seguida de la extracción de características utilizando coeficientes cepstrales de frecuencia de fusión (MFCC). Luego, estas características se someten a una reducción de dimensionalidad y se transforman en representaciones de valores complejos, lo que da como resultado MFCC de valores complejos. Las características procesadas se introducen posteriormente en una red neuronal de valores complejos. El rendimiento de la red se mejora mediante la selección de funciones de activación y algoritmos de aprendizaje apropiados. En última instancia, la salida de la red neuronal se utiliza con fines de clasificación.

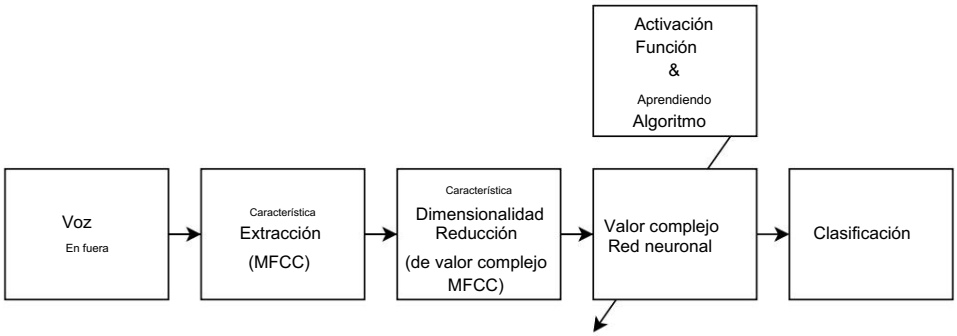


Figura 2. Descripción general del enfoque propuesto.

MFCC de valores complejos: la cantidad de MFCC utilizados en el reconocimiento de voz puede variar según las aplicaciones y modelos específicos. Sin embargo, normalmente se utilizan MFCC que oscilan entre 13 y 40. Se sabe que esta gama funciona eficazmente en varios sistemas de reconocimiento de voz. Generalmente, una mayor cantidad de MFCC puede permitir que el modelo capture más frecuencia y detalles espectrales, pero también aumenta el costo computacional del moc Por lo tanto, el número seleccionado de MFCC se determina considerando un equilibrio entre la eficiencia computacional y el rendimiento del modelo.

Al representar problemas físicos utilizando números complejos, existen dos métodos principales. Uno es un método de sustitución simple y el otro es un enfoque más elegante conocido como equivalencia matemática, como la Transformada de Fourier. La sustitución toma dos parámetros físicos reales y coloca uno en la parte real del número complejo y otro en la parte imaginaria. Esto permite manipular los dos valores como una sola entidad, es decir, un único número complejo [11].
El método propuesto para la reducción de dimensionalidad en este artículo implica convertir n valores de MFCC en números complejos. El primer MFCC se utiliza como parte real y el segundo MFCC se utiliza como parte imaginaria del número complejo.
Posteriormente, cada MFCC alterna entre ser la parte real y la imaginaria dentro del número complejo. Este patrón continúa hasta el enésimo MFCC, lo que da como resultado n/2 números complejos. Por ejemplo, cuando tenemos n valores de MFCC, podrían ser los siguientes:

$$[x1, x2, x3, x4, \ldots, xn-1, xn]$$

En este caso, el primer MFCC x1 se utiliza como parte real del primer número complejo.
El segundo MFCC x2 se utiliza como parte imaginaria del primer número complejo. El tercer MFCC x3 se utiliza como parte real del segundo número complejo. El cuarto MFCC x4 se utiliza como parte imaginaria del segundo número complejo. Este patrón continúa alternando entre partes reales e imaginarias hasta el enésimo MFCC xn, que se convierte en la parte imaginaria del (n/2)-ésimo número complejo. Por lo tanto, con n valores de MFCC, se generan n/2 números complejos. El primer número complejo es x1 + jx2, el segundo complejo

Machine Translated by Google

El número es x3 + jx4, y así sucesivamente hasta el último número complejo, que es xn−1 + jxn. Hemos ilustrado esta explicación en la Figura 3.

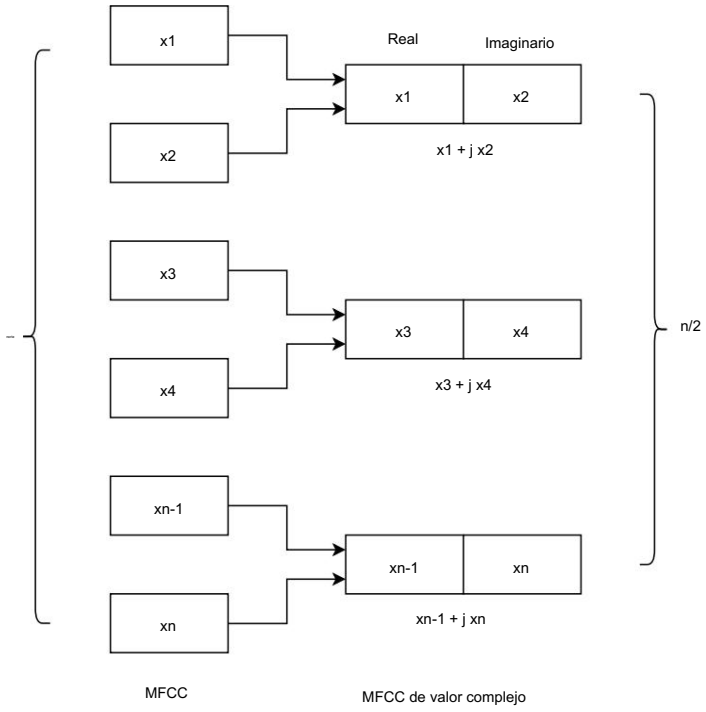


Figura 3. Proceso de generación de MFCC de valor complejo.

Red neuronal de valores complejos: las redes neuronales de valores complejos son modelos de redes neuronales que utilizan números complejos como valores de entrada o pesos, y tienen la ventaja de manejar información más rica en comparación con las redes neuronales de valores reales. Además , se han llevado a cabo diversos estudios de investigación en diversos campos y se están utilizando eficazmente métodos de reducción de dimensionalidad de valores complejos o clasificación y detección utilizando números complejos. Para ello se realiza la multiplicación de entradas complejas y pesos complejos, lo que implica rotación en el plano complejo y por tanto introduce cambios de fase [5]. La suma de la multiplicación de la entrada X y el peso W se puede representar como las ecuaciones (1) y (2).

$$Z = W0 + W1X1 + W2X2 + \ldots + WnXn \tag{1}$$

$$Z = \sum n\ Wn \cdot Xn \tag{2}$$

Función de activación y algoritmo de aprendizaje: en redes neuronales de valores complejos, se utiliza una función de activación dependiente de la fase, lo que obliga a normalizar la información de magnitud a un círculo unitario de 1 y solo la extracción de la información de fase, como se muestra en la Ecuación (3).

$$P(Z) = \frac{z}{|Z|} = mi^{j \cdot \arg(Z)} \tag{3}$$

El algoritmo de aprendizaje de redes neuronales de valores complejos es el siguiente. Cuando hay un objetivo deseado t y un valor de salida z, como se muestra en la Figura 4, los pesos se ajustan de acuerdo con la Ecuación (4) para moverse gradualmente en la dirección del objetivo deseado [12].

Machine Translated by Google

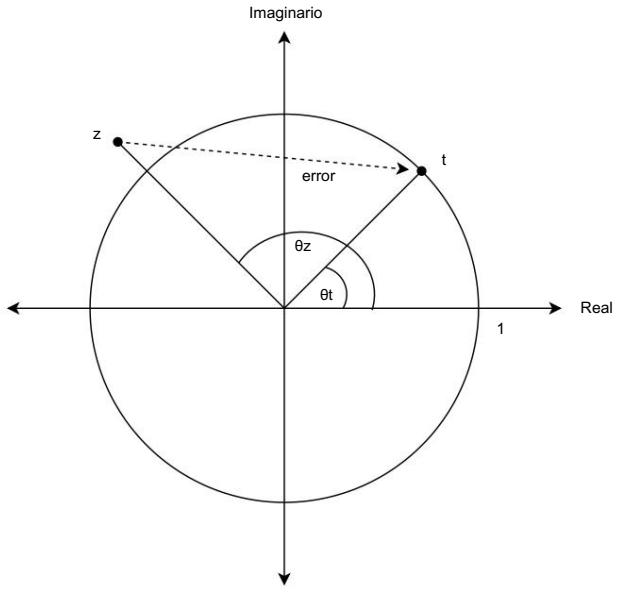


Figura 4. Algoritmo de aprendizaje para CVNN.

$$t = \sum n\ (Wn + \Delta Wn)\cdot Xn \tag{4}$$

El error con respecto al objetivo de entrenamiento t es e = t − z , como se muestra en la Ecuación (5).

$$e = \sum n\ (Wn + \Delta Wn)\cdot Xn - \sum n\ (Wn)\cdot Xn = \sum n\ (\Delta Wn)\cdot Xn \tag{5}$$

Para simplificar y acelerar el cálculo del error con respecto a los cambios de peso, suponiendo que cada nodo contribuye igualmente al error, el símbolo de suma σ se elimina de la ecuación y ambos lados se dividen por el número de nodos contribuyentes N en el complejo. Red neuronal valorada para conveniencia computacional. La ecuación resultante es la ecuación (6).

$$\Delta Wn \cdot Xn = \frac{mi}{norte} \tag{6}$$

Para obtener ΔWn y cambiar los pesos, multiplicar ambos lados de la ecuación (6) por se convierte en Xn cuando se $X_{n.}^{-1}$ X_{norte}^{-1} multiplica por el conjugado complejo Xn, siendo n tanto el numerador como el denominador; por lo tanto, $X_{norte}^{-1} = \frac{\overline{Xn2,}}{|Xn|}$ donde |Xn| = 1 para Xn dentro de la unidad círculo. Por lo tanto, $X_{norte}^{-1} = \overline{Xn}$, y la ecuación (6) se deriva nuevamente como las ecuaciones (7) y (8).

$$\Delta Wn \cdot Xn \cdot X_{norte}^{-1} = \frac{mi}{norte} \cdot X_{norte}^{-1} = \frac{mi}{norte} \cdot \overline{Xn} \tag{7}$$

$$\Delta Wn = \frac{mi}{norte} \cdot \overline{Xn} \tag{8}$$

De esta forma, el cambio de pesos obtenido se puede observar en la Ecuación (8). Este cambio representa el ajuste de pesos complejos para cada nodo que contribuye al error con respecto al objetivo de entrenamiento y se aplica de manera uniforme en toda la red.

A través de este proceso, las redes neuronales de valores complejos se ajustan más cerca del objetivo utilizando funciones de activación dependientes de la fase y algoritmos de aprendizaje eficientes mientras manejan información rica a través de complejas operaciones de multiplicación entre entradas y pesos [13].

Propagación hacia atrás de dominio complejo: cuando se utilizan capas ocultas, el error de la capa de salida se propaga hacia atrás a las capas ocultas para calcular cuánto mide cada nodo.

Machine Translated by Google

en las capas ocultas contribuyó a ese error. En base a esto, los pesos entre las capas oculta y de salida deben ajustarse adecuadamente. Este proceso se denomina retropropagación de errores, mediante el cual la red neuronal puede ajustar los pesos para minimizar el error en los valores de salida durante el aprendizaje. La estructura de una red neuronal de valores complejos multicapa se ilustra en la Figura 5.

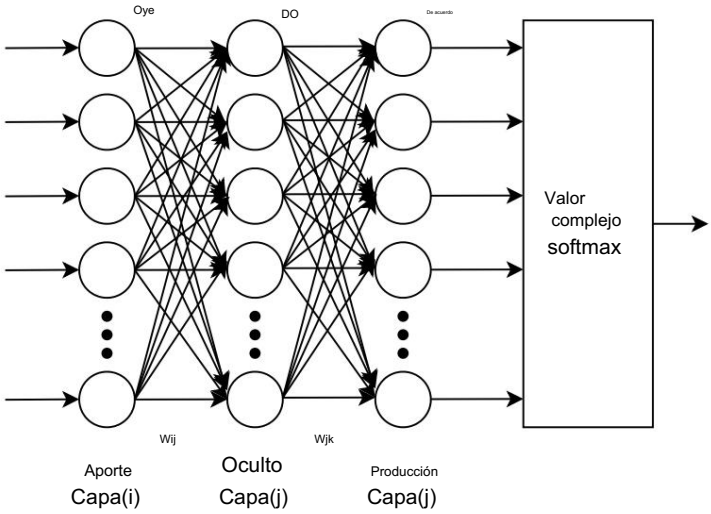


Figura 5. CVNN multicapa.

En este artículo, se utiliza un método de corrección de errores para que la capa de salida k actualice los pesos, mientras que se emplea un método de retropropagación de errores para la capa oculta j para examinar su influencia en la salida. En otras palabras, la capa de salida k utiliza el método de corrección de errores para evitar caer en mínimos locales, mientras que el método de retropropagación de errores se aplica a la capa oculta j para garantizar una mejor distribución de los errores desde la capa de salida a la capa oculta. Se puede esperar que esta combinación de retropropagación de errores en la capa oculta y corrección de errores en la capa de salida mejore el problema de que toda la red neuronal se atasque en mínimos locales y al mismo tiempo permita una converger
El método de retropropagación de errores para redes neuronales de valores complejos es el siguiente.

Cuando se utiliza el descenso de gradiente para actualizaciones de peso en redes neuronales de valores complejos, se emplea el cálculo de Wirtinger para diferenciar funciones complejas. Como las funciones complejas comprenden partes reales e imaginarias, el cálculo de Wirtinger realiza la diferenciación por separado para las partes reales e imaginarias. Para un número complejo z = x + jy definido con partes reales e imaginarias x e y, respectivamente, y una función compleja f(z) = u(x, y) + jv(x, y), las derivadas de Wirtinger se definen como sigue [14].

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial x} - j\frac{\partial f}{\partial y}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + j\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right) \tag{9}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial x} + j\frac{\partial f}{\partial y}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} + j\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right) \tag{10}$$

$$df = \frac{\partial f}{\partial z}dz + \frac{\partial f}{\partial \bar{z}}d\bar{z} \tag{11}$$

En este contexto, $\bar{z}$ denota el conjugado complejo de z. En el método de la derivada de Wirtinger, las funciones complejas se pueden tratar como extensiones de funciones reales dividiéndolas en partes reales e imaginarias para su diferenciación. A continuación se describe el proceso de actualización de variables complejas utilizando el tamaño de paso α/2 y la función de pérdida L.

Machine Translated by Google

$$xn+1 = xn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x} \tag{12}$$

$$yn+1 = yn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial y} \tag{13}$$

Sustituyendo zn+1 = xn+1 + j yn+1 en las ecuaciones (12) y (13) y luego sustituyendo la derivada de Wirtinger al final del proceso de derivación, queda como sigue.

$$zn+1 = xn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x} + j\, yn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial y}$$

$$= xn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x} + jyn - j\frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial y}$$

$$= xn + jyn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x} + j\frac{\partial L}{\partial y}$$

$$1 = zn - \alpha\frac{\partial L}{\partial x} + j\frac{\partial L}{\partial y}$$

$$= zn - \alpha\frac{\partial L}{\partial z} \tag{14}$$

La derivada parcial de L con respecto al conjugado complejo como Derivada Conjugada $\frac{\partial L}{\partial z}$ se refiere de Wirtinger. Esto demuestra cómo se puede utilizar la derivada conjugada de Wirtinger para simplificar la fórmula de actualización de variables complejas. En términos de utilizar el método anterior, reescribir la ecuación (5) como un error de la capa de salida produce la ecuación (15), donde tk representa el valor objetivo y ok representa el valor de salida real de la capa de salida k.

$$ek = tk - ok \tag{15}$$

Y la función de pérdida se define como la ecuación (16).

$$L = mi\frac{2}{k} = |tk - bien|\overline{|tk - bien|} \tag{dieciséis}$$

Si los pesos son grandes, es más probable que el error se propague a las capas ocultas. El error de capa oculta ej se puede expresar mediante la siguiente ecuación.

$$ej = peso_{jk} \cdot ek \tag{17}$$

Usando el resultado de la Ecuación (14), el gradiente de la función de error con respecto al peso Wij entre la capa de entrada i y la capa oculta j se puede expresar de la siguiente manera. Aquí, oi es el valor de salida de la capa de entrada i y oj es el valor de salida de la capa oculta j.

$$\frac{\partial L}{\partial Wij} = \frac{\partial L}{\partial oj}\cdot\frac{\partial oj}{\partial Wij} \tag{18}$$

$$\frac{\partial L}{\partial Wij} - ej \cdot \frac{\partial}{\partial Wij} P \sum Wij \cdot oi = \tag{19}$$

Machine Translated by Google

$$\frac{\partial L}{\partial Wij} = -ej \cdot P' \cdot \overline{oye} \quad (20)$$

En las ecuaciones (19) y (20), P representa la función de activación dependiente de la fase utilizada en la salida de la capa oculta, y P′ es la derivada de la función de activación dependiente. La actualización de los pesos de la capa oculta se puede expresar de la siguiente manera.

$$\text{nuevo Wij} = \text{antiguo Wij} - \text{lr} \cdot \frac{\partial L}{\partial Wij} \quad (21)$$

Cuando se trata de variables complejas, es necesario utilizar $\overline{\partial Wij}$ en lugar de ∂Wij para actualizar. Aquí, lr juega un papel en el ajuste $\frac{\partial L}{\overline{\partial Wij}}$ de la intensidad del cambio para evitar sobrepasarse, y se denomina tasa de aprendizaje. Además, la derivada de la función de activación P es una función compleja, y para encontrar la derivada de una función compleja se utiliza la derivada de Wirtinger [15].

Softmax de valores complejos: la función softmax, que se utiliza como función de activación en la capa de salida, toma valores de entrada y normaliza cada valor para que esté entre 0 y 1. Garantiza que la suma de los valores normalizados sea siempre 1. Esta función permite la interpretación de resultados como probabilidades. Se puede expresar como la Ecuación (22).

$$\text{Entonces f tmax(Z)i} = e^{Zi} \frac{e^{zi}}{\sum_{i=1}^{\overline{}}} \quad (22)$$

Sin embargo, la función softmax solo puede interpretar los resultados como probabilidades para entradas de números reales y, para entradas de números complejos, se necesita un método de interpretación diferente. En este artículo, proponemos un método de interpretación softmax de valores complejos para entradas de números complejos. El resultado de la función softmax para entradas de números complejos produce valores de salida complejos, y dado que la suma de todos los valores de salida es 1+0j, proponemos un algoritmo que calcula la distancia entre los valores de salida y 1 + 0j en el plano complejo y selecciona el índice del valor más cercano. Esto se puede expresar como la Ecuación (24).

$$\text{distanciai} = |\text{Entonces f tmax(Z)i} - \omega| \quad (23)$$

$$\text{índice_más cercano} = \text{argmin(distanciai)} \quad (24)$$

Aquí, se define ω = 1 + 0j . En consecuencia, decidimos clasificar el número complejo. correspondiente a close_index como clase 1.

5. Análisis de rendimiento En

nuestros experimentos de reconocimiento de señales de voz, se realizó una comparación detallada entre los resultados de redes neuronales de valor real y redes neuronales de valor complejo.
El análisis de rendimiento se llevó a cabo junto con el preprocesamiento de coeficientes cepstrales de frecuencia de mel (MFCC) de valores complejos para la reducción de dimensionalidad. Además, se observó el impacto de los MFCC de valores complejos en los resultados del reconocimiento de voz. Específicamente, al reconocer señales de voz determinadas utilizando redes neuronales, se evaluó y comparó la influencia de los valores de MFCC y su efecto de complejización en el rendimiento del modelo para determinar si es posible mejorar el rendimiento y al mismo tiempo reducir el número de parámetros.

Método experimental: la Figura 6 muestra la arquitectura de una red neuronal multicapa de valores complejos utilizada para entrenamiento y pruebas con un conjunto de datos que consta de 8000 muestras de voz cortas, cada una de las cuales contiene ocho palabras diferentes y dura menos de un segundo.
Los datos de voz utilizados en este estudio son parte del conjunto de datos de comandos de voz recopilados por Google y distribuidos bajo la licencia CC BY.

Machine Translated by Google

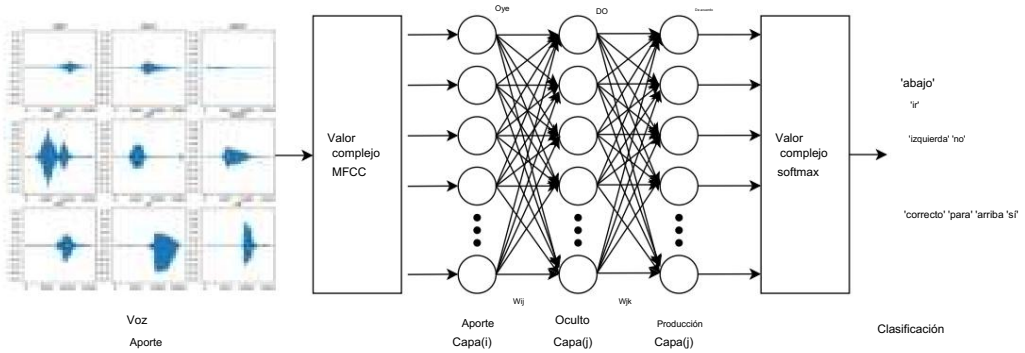


Figura 6. Configuración experimental de CVNN multicapa.

Las redes neuronales de valores complejos son estructuralmente similares a las redes neuronales de valores reales, pero la diferencia radica en el uso de números complejos, que introducen cambios de fase a medida que la suma de productos entre entradas y pesos gira en el plano complejo. Estos cambios de fase juegan un papel importante en las redes neuronales de valores comple La red neuronal de valores complejos consta de una capa de entrada con MFCC de valores complejos de dimensión reducida obtenidos de los datos de voz a través del proceso de complejización que se muestra en la Figura 3, una capa oculta con 500 nodos y una capa de salida con 8 nodos para clasificación. Todos los nodos y pesos utilizan números complejos. Los resultados finales se clasificaron en la capa de salida. El conjunto de datos constaba de 7000 muestras para entrenamiento y 1000 muestras para pruebas. Se utilizaron clips de audio de ocho palabras como datos y se realizaron experimentos dividiendo los datos de entrada en función de si se aplicó o no la transformación MFCC de valores complejos. En el caso de utilizar MFCC de valor real, se empleó una red neuronal de valor real, mientras que con MFCC de valor complejo se utilizó una red neuronal de valor complejo. Tanto las redes neuronales de valor real como las de valor complejo se entrenaron en las mismas condiciones: lr = 0,01, tamaño de lote = 50 y número de épocas = 50. Para los datos de entrada, los resultados de tres pasos de preprocesamiento de reducción de dimensionalidad diferentes se compararon con la red neuronal de valor real. Estos pasos de preprocesamiento incluyeron dimensiones de MFCC de 20, 10 y 5. La longitud de la señal de entrada para la red neuronal se puede determinar como se muestra en la Ecuación (25). Específicamente, la señal de voz de entrada se dividió en 32 cuadros y se generaron MFCC para cada cuadro.

$$\text{La longitud de los datos de la señal de entrada} = \text{MFCC} \times \text{cuadros} \quad (25)$$

Por ejemplo, en el caso de MFCC 20 de valor complejo, primero se calcula el MFCC 40 de valor real. Usando la ecuación (25), la longitud de la señal de entrada para MFCC 40 de valor real se convierte en 40 × 32 = 1280. Si luego convertimos estos 40 MFCC en números complejos, como se ilustra en la Figura 3, la reducción de dimensionalidad se logra a la mitad de la longitud. , lo que da como resultado 16 fotogramas. En consecuencia, la longitud de la señal de entrada se convierte en 40 × 16 = 640, lo que equivale a la longitud de la señal de entrada del MFCC 20 de valor real. Se puede realizar una reducción de dimensionalidad similar para el MFCC 10 de valor complejo y el MFCC 5 de valor complejo usando el mismo método. . El número total de parámetros para toda la red neuronal obtenidos a través de este proceso se presenta en la Tabla 1. En esta tabla, I (n) representa el número de neuronas en la capa de entrada, H (n) representa el número de neuronas en la capa oculta. capa, y O (n) representa el número de neuronas en la capa de salida.

Tabla 1. Número total de parámetros en la red neuronal.

MFCC	MFCC de valor real	MFCC de valor complejo
20	I(20 × 32 = 640) × H(500) + H(500) × O(8) = 324.000	I(40 × 16 = 640) × H(500) + H(500) × O(8) = 324.000
10	I(10 × 32 = 320) × H(500) + H(500) × O(8) = 164.000	I(20 × 16 = 320) × H(500) + H(500) × O(8) = 164.000
5	I(5 × 32 = 160) × H(500) + H(500) × O(8) = 84.000	I(10 × 16 = 160) × H(500) + H(500) × O(8) = 84.000

Machine Translated by Google

MFCC 20 de valor complejo versus MFCC 20 de valor real: como se muestra en la Figura 7, MFCC 20 de valor complejo logró una precisión de entrenamiento máxima del 99,40 % y una precisión de prueba del 84,90 % a pesar de tener la misma longitud de datos de entrada que el MFCC 20 de valor real. MFCC 20, que logró una precisión máxima de entrenamiento del 98,13 % y una precisión de prueba del 83,10 %. Los resultados obtenidos utilizando MFCC de valor complejo superaron a los obtenidos utilizando MFCC de valor real en términos de precisión tanto de entrenamiento como de prueba.

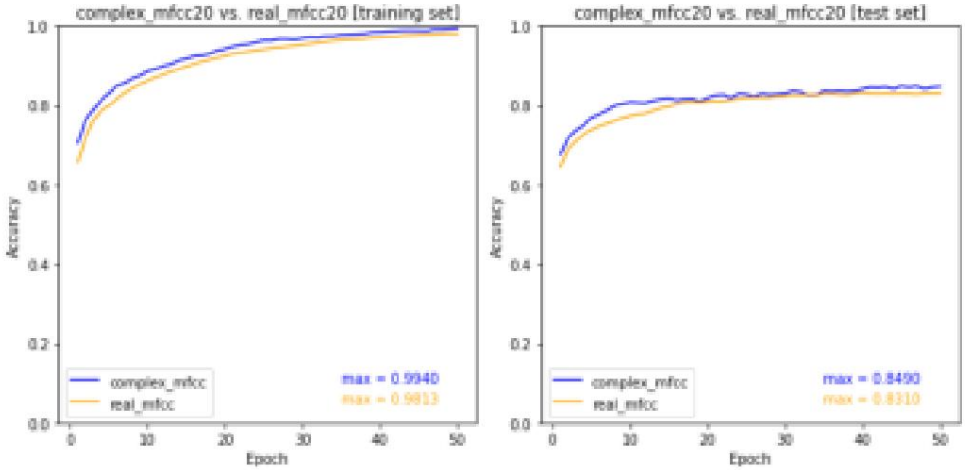


Figura 7. Comparación de los resultados de MFCC 20 de valor complejo y MFCC 20 de valor real.

MFCC 10 de valor complejo frente a MFCC 10 de valor real: como se muestra en la Figura 8, MFCC 10 de valor complejo logró una precisión de entrenamiento máxima del 96,90 % y una precisión de prueba del 83,80 % a pesar de tener la misma longitud de datos de entrada que el MFCC 10 de valor real. MFCC 10, que logró una precisión máxima de entrenamiento del 94,24 % y una precisión de prueba del 81,20 %. Los resultados obtenidos utilizando MFCC de valor complejo superaron a los obtenidos utilizando MFCC de valor real en términos de precisión tanto de entrenamiento como de prueba.

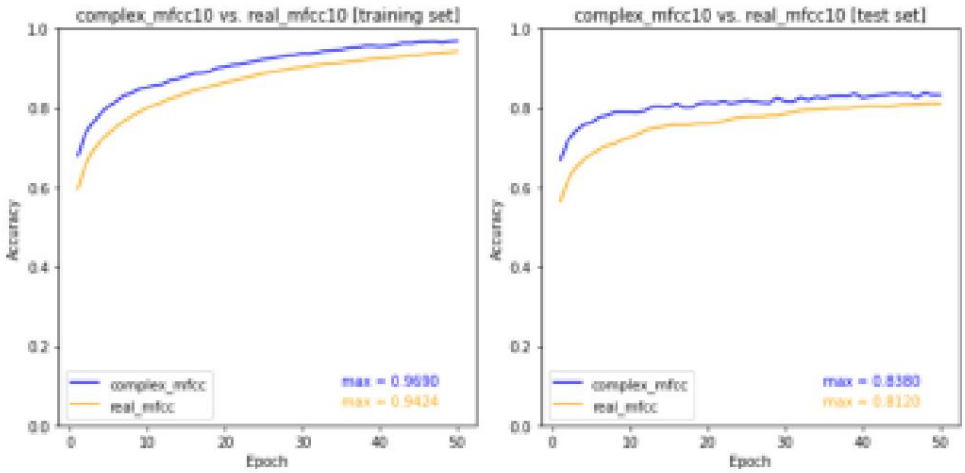


Figura 8. Comparación de los resultados de MFCC 10 de valor complejo y MFCC 10 de valor real.

MFCC5 de valor complejo frente a MFCC5 de valor real: como se muestra en la Figura 9, MFCC 5 de valor complejo logró una precisión de entrenamiento máxima del 92,33 % y una precisión de prueba del 81,40 % a pesar de tener la misma longitud de datos de entrada que el MFCC 5 de valor real. , que logró una precisión máxima de entrenamiento del 86,34 % y una precisión de prueba del 74,90 %. Los resultados obtenidos utilizando MFCC de valor complejo superaron a los obtenidos utilizando MFCC de valor real en términos de precisión tanto de entrenamiento como de prueba.

Machine Translated by Google

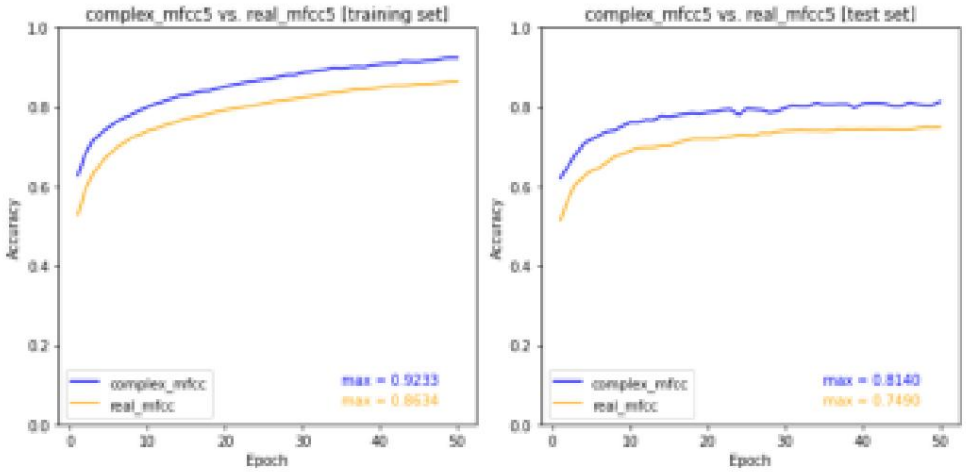


Figura 9. Comparación de los resultados de MFCC 5 de valor complejo y MFCC 5 de valor real.

Resultados generales del análisis: Al revisar los resultados experimentales, se observó que el uso de MFCC de valores complejos produce un mayor rendimiento en comparación con el uso de MFCC de valor real, incluso con la misma longitud de datos de entrada. Por lo tanto, se confirmó que el empleo de MFCC de valores complejos y redes neuronales de valores complejos conduce a mejores resultados. La variación en la precisión según la cantidad de características de MFCC se ilustra en la Figura 10. Aunque no se muestra aquí, se obtuvieron los mismos resultados utilizando la puntuació

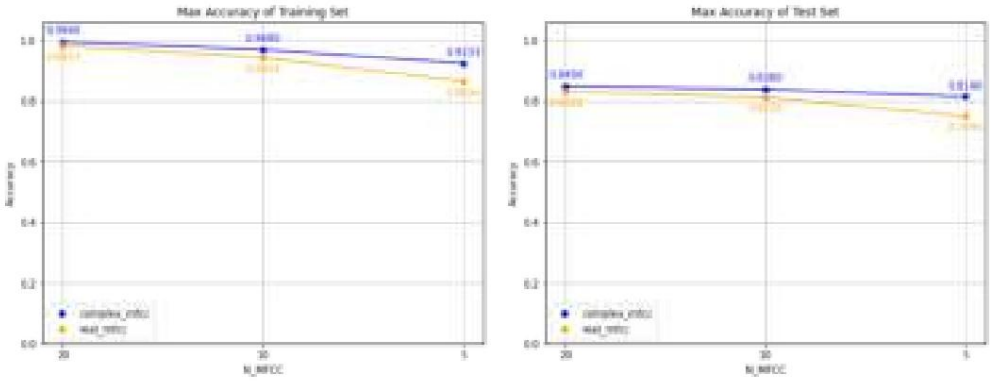


Figura 10. Variación de la precisión con el número de MFCC.

Si hay un número suficiente de MFCC, con épocas crecientes, parece que el rendimiento que utiliza números reales comienza a converger hacia el que utiliza números complejos Sin embargo, la Figura 9 muestra un resultado diferente. El MFCC 5 de valor complejo tiene MFCC complejos reducidos en 5 dimensiones obtenidos de 10 MFCC a través del proceso de complejización que se muestra en la Figura 3. Un MFCC 5 de valor real con solo 5 MFCC no puede alcanzar al MFCC 5 de valor complejo incluso a medida que aumentan las épocas. . En otras palabras, cuando el número de MFCC es bajo, incluso a medida que aumentan las épocas, los resultados de los MFCC de valor real no coinciden con el desempeño de los MFCC de valor complejo. Como se muestra en la Figura 10, a pesar de tener el mismo número de parámetros, los resultados del MFCC 5 de valor complejo son superiores a los del MFCC 5 de valor real. Por lo tanto, se observó que cuando se utilizan MFCC de valor complejo, el cambio en la precisión a medida que disminuye el número de funciones de MFCC, es más fluido en comparación con cuando se utilizan MFCC de valor real.

6. Conclusiones

En este artículo, introdujimos redes neuronales de valores complejos para abordar el problema del reconocimiento de voz. Nuestros experimentos utilizaron MFCC de valores complejos como insumos para un

Machine Translated by Google

Red neuronal de valores complejos. Los resultados demostraron un rendimiento superior al emplear MFCC de valores complejos, con un cambio más gradual en la precisión a medida que disminuía el número de características de MFCC, en comparación con el uso de MFCC de valor real. Esto sugiere que los MFCC de valor complejo pueden ayudar a mantener el rendimiento con menos funciones. Estos hallazgos proporcionan información valiosa sobre el potencial de las redes neuronales de valores complejos y demuestran la eficacia de combinar MFCC de valores complejos con redes neuronales de valores complejos en el reconocimiento de voz.

A pesar de estos resultados prometedores, reconocemos ciertas limitaciones de nuestro enfoque . Este estudio se realizó con un conjunto de datos limitado, que puede no representar completamente la diversidad de patrones de habla del mundo real. Además, la arquitectura de red neuronal de valor complejo descrita en este estudio es relativamente simple y puede no capturar todas las complejidades de las señales del habla.

De cara al futuro, nuestro objetivo es aprovechar este trabajo para mejorar aún más la precisión y el rendimiento de los modelos de reconocimiento y procesamiento de señales de voz. Nuestra investigación futura se centrará en diseñar modelos de redes neuronales de valores complejos más sofisticados y realizar experimentos en diversos conjuntos de datos para mejorar el rendimiento. Además, planeamos explorar la aplicación de redes neuronales de valor complejo a otros campos más allá del reconocimiento de voz, expandiendo potencialmente su uso en varios dominios de procesamiento de señ

Contribuciones de los autores: Conceptualización, SK; administración de proyectos, MP; supervisión, MP; redacción: borrador original, SK Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Este trabajo fue apoyado conjuntamente por la Fundación Nacional de Investigación de Corea (NRF) a través de una subvención otorgada por el gobierno de Corea (MSIT) (subvención n.° NRF-2023R1A2C1005461) y por el MSIT (Ministerio de Ciencia y TIC) de Corea. , en el marco del Programa de apoyo empresarial a la capacitación de talentos centrales de Convergence Security (IITP-2024-RS-2024-00426853) supervisado por el IITP (Instituto de Planificación y Evaluación de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones).

Declaración de disponibilidad de datos: Las contribuciones originales presentadas en el estudio están incluidas en el artículo. Mayores consultas pueden dirigirse a los autores correspondientes.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Tebelskis, J. Reconocimiento de voz mediante redes neuronales. Doctor. Tesis, Facultad de Ciencias de la Computación, Universidad Carnegie Mellon, Pittsburgh, PA, EE. UU., 1995.
2. Sarroff, AM Redes neuronales complejas para audio. Doctor. Tesis, Dartmouth College, Hanover, NH, EE. UU., 2018.
3. Abdul, ZK; Al-Talabani, AK Coeficiente cepstral de frecuencia Mel y sus aplicaciones: una revisión. Acceso IEEE 2022, 10, 122136–122158. [Referencia cruzada]
4. Barrachina, JA; Ren, C.; Vieillard, G.; Morisseau, C.; Ovarlez, JP Teoría e implementación de neuronas de valores complejos Redes. arXiv 2023, arXiv:2302.08286.
5. Aizenberg, I. Redes neuronales de valores complejos con neuronas de valores múltiples; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2016.
6. Tumbas, A.; Jaitly, N.; Mohamed, reconocimiento de voz AR híbrido con LSTM bidireccional profundo. En Actas del Taller IEEE de 2013 sobre comprensión y reconocimiento automático del habla, Olomouc, República Checa, 8 a 12 de diciembre de 2013; págs. 273–278. [Referencia cruzada]
7. Paz, P.; Garrido, M. Implementación eficiente de multiplicadores complejos en FPGA utilizando cortes DSP. J. Proceso de Señal. Sistema. 2023, 95, 543–550. [Referencia cruzada]
8. Ahmad, M.; Zhang, L.; Chowdhury, MEH FPGA Implementación de una red neuronal de valor complejo para representación polar Clasificación de imágenes. Sensores 2024, 23, 2627. [CrossRef] [PubMed]
9. Anggraeni, D.; Sanjaya, WS; Nurasyidiek, MI; Munawwaroh, M. La implementación del reconocimiento de voz utilizando coeficientes de cepstrum de frecuencia Mel (MFCC) y el método de máquina de vectores de soporte (SVM) basado en Python para controlar el brazo robótico. Conferencia de la PIO. Ser. Madre. Ciencia. Ing. 2018, 288, 012042. [Referencia cruzada]
10. Dhanjal, AS; Singh, W. Una encuesta completa sobre el reconocimiento automático de voz mediante redes neuronales; Springer Nature: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2023.
11. Smith, SW La guía para científicos e ingenieros sobre procesamiento de señales digitales, 2ª ed.; Publicaciones técnicas de California: San Diego, CA, Estados Unidos, 1999; págs. 557–558.
12. Bassey, J.; Li, X.; Qian, L. Un estudio de redes neuronales de valores complejos. arXiv 2021, arXiv:2101.12249v1.
13. MYONeuralNet. Redes neuronales de valores complejos: experimentos. 2016. Disponible en línea: http://makeyourownneuralnetwork. blogspot.com/2016/05/complex-valued-neural-networks.html (consultado el 19 de febrero de 2021).

Machine Translated by Google

14. Fischer, R. Wirtinger Cálculo. En Precodificación y Conformación de Señales para Transmisión Digital; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, Nueva Jersey, EE. UU., 2002; págs. 405–413.
15. PyTorch. Paquete de diferenciación automática: torch.autograd, nd Disponible en línea: https://pytorch.org/docs/stable/notes/autograd.html (consultado el 3 de noviembre de 2023).
16. Lee, C.; Hasegawa, H.; Gao, S. Redes neuronales de valor complejo: un estudio completo. IEEE/CAA J. Autom. Pecado. 2022, 9, 1433-1454. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Recomendaciones laborales: evaluación comparativa del filtrado colaborativo Métodos para anuncios clasificados

Robert Kwieci'nski 1,2, Tomasz Górecki 2,*, Ágata Filipowska 3 y Viacheslav Dubrov 1

1 Grupo OLX, Królowej Jadwigi 43, 61-872 Pozna ´n, Polonia; r.kwiecinskipl@gmail.com (RK); slavadubrov@gmail.com (VD)
2 Facultad de Matemáticas e Informática, Universidad Adam Mickiewicz, Uniwersytetu Pozna ´nskiego 4, 61-614 Pozna ´n, Polonia
3 Departamento de Sistemas de Información, Universidad de Economía y Negocios de Pozna ´n, Al. Niepodległo´sci 10, 61-875 Pozna ´n, Polonia; agata.filipowska@ue.poznan.pl
* Correspondencia: tomasz.gorecki@amu.edu.pl

Resumen: Los anuncios clasificados plantean numerosos desafíos para los métodos de recomendación, incluida la visibilidad temporal de los anuncios, el anonimato de la mayoría de los usuarios y el hecho de que normalmente solo un usuario puede consumir un artículo anunciado. En este trabajo, abordamos estos desafíos eligiendo modelos y procedimientos de evaluación que se consideren precisos, diversos y eficientes (en términos de memoria y consumo de tiempo durante el entrenamiento y la predicción). Este documento tiene como objetivo comparar varios métodos de recomendación para anuncios clasificados de empleo, utilizando OLX Jobs como ejemplo, para mejorar la tasa de conversión de anuncios y la satisfacción del usuario. En nuestra investigación, implementamos métodos escalables y representamos diferentes enfoques para las recomendaciones: mínimos cuadrados alternos (ALS), LightFM, Prod2Vec, RP3Beta y métodos lineales dispersos (SLIM). Realizamos pruebas A/B enviando millones de mensajes con recomendaciones para realizar evaluaciones en línea de métodos seleccionados. Además, hemos publicado el conjunto de datos creado para nuestra investigación. Hasta donde sabemos, este es el primer conjunto de datos de este tipo. Contiene 65.502.201 eventos realizados en OLX Jobs por 3.295.942 usuarios que interactuaron (mostraron, respondieron o marcaron) 185.395 anuncios de trabajo durante dos semanas en 2020. Demostramos que RP3Beta, SLIM y ALS funcionan significativamente mejor que Prod2Vec y LightFM cuando se prueban. en un entorno de laboratorio. Las pruebas A/B online también muestran que el envío de mensajes con recomendaciones generadas por los modelos ALS y RP3Beta aumenta el número de usuarios que contactan con los anunciantes. Además, RP3Beta tuvo un impacto un 20% más significativo en e

Palabras clave: recomendaciones laborales; clasificados; filtración colaborativa; pruebas de escalabilidad; pruebas A/B; sistemas de recomendación; factorización matricial; sistemas de recomendación basados en gráficos; Conjunto de datos de interacciones laborales de OLX ; métricas de diversidad

check for updates

Cita: Kwieci 'nski, R.; Górecki, T.; Filipowska, A.; Dubrov, V. Recomendaciones laborales: evaluación comparativa de métodos de filtrado colaborativo para Clasificados. Electrónica 2024, 13, 3049. https://doi.org/10.3390/electrónica13153049

Editores académicos: Marco Lombardi, Domenico Santaniello, Zilu Liang y Mahoma Khan

Recibido: 30 de mayo de 2024
Revisado: 24 de julio de 2024
Aceptado: 27 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Los clasificados online son sitios web donde los anunciantes publican anuncios relacionados con la venta o alquiler de servicios o productos [1]. Este artículo aborda la publicidad online utilizando el ejemplo de OLX Jobs.

Los anuncios clasificados se esfuerzan por satisfacer las necesidades tanto de los anunciantes como de los que responden a los anuncios en línea. Para unir a estos grupos, es cada vez más importante contar con mejores métodos de recomendación. En comparación con el comercio electrónico tradicional (por ejemplo, Amazon (https://www.amazon.com/, consultado el 26 de junio de 2024) o eBay (https://www.ebay.com/, consultado el 26 de junio de 2024)), los clasificados deben enfrentar diferentes desafíos, que abordamos en nuestro procedimiento de evaluación. Una es la visibilidad temporal de los anuncios, que decidimos abordar reentrenando frecuentemente el modelo. Por lo tanto, la eficiencia del modelo, que reportamos, es esencial para la evaluación. Otro desafío es que un anunciante normalmente necesita un solo usuario para completar la transacción. Este aspecto se abordó incluyendo el análisis de la diversidad en nuestra evaluación.

Machine Translated by Google

En nuestra investigación, nos centramos en enfoques que surgen del filtrado colaborativo. Los modelos de filtrado colaborativo han demostrado su precisión, aunque no utilizan información adicional sobre usuarios o elementos, que a veces es difícil de obtener o procesar en la práctica. Este artículo tiene como objetivo evaluar diferentes métodos de recomendación para su uso en el sector de anuncios clasificados. La gran escasez de nuestro conjunto de datos, junto con la importante cantidad de anuncios y usuarios, contribuye a la complejidad del problema de investigación.

A continuación, enumeramos nuestras principales aportaciones.

- Evaluamos exhaustivamente enfoques de filtrado diversos, escalables y colaborativos en un entorno de laboratorio en cuanto a precisión, diversidad y eficiencia. Evaluamos la precisión para diferentes grupos de usuarios, dependiendo del número de elementos con los que interactuaron, junto con un análisis estadístico de las diferencias. La metodología de evaluación propuesta aborda los principales desafíos de los anuncios clasificados.
- Presentamos los resultados de dos pruebas A/B en línea que demuestran el impacto de los modelos ALS y RP3Beta en los usuarios de OLX. Más de 1 millón de usuarios participaron en cada prueba. El impacto informado puede usarse para estimar la importancia de los sistemas de recomendación en el dominio de anuncios clasificados y permitir que otras empresas tomen decisiones más informadas sobre el desarrollo de dichos modelos. •
- Publicamos y presentamos un conjunto de datos sobre interacciones laborales. Hasta donde sabemos, este es el ma conjunto de datos disponible públicamente sobre interacciones laborales.

Este artículo consta de siete secciones. La sección 2 es una revisión de la literatura sobre los desarrollos subyacentes. La Sección 3 describe el conjunto de datos desarrollado y puesto a disposición del público en Kaggle. El diseño del experimento de laboratorio, así como la implementación de los métodos, se describen en la Sección 4. La Sección 5 se centra en los resultados de la evaluación de laboratorio de nuestras implementaciones, así como en la importancia estadística de los resultados. La Sección 6 presenta los resultados de las implementaciones en línea realizadas durante las pruebas A/B con usuarios, así como una discusión de los resultados. Las conclusiones se presentan en la Sección 7.

2. Trabajo relacionado

En esta sección, comenzamos describiendo las características únicas de los anuncios clasificados y los dominios laborales. Luego proporcionamos una descripción general de los sistemas de recomendación. A continuación, analizamos los factores que influyen en nuestra selección de modelos y proporcionamos una descripción detallada de cada modelo. Finalmente, especificamos las lagunas de la investigación.

2.1. Sitios de anuncios

clasificados Los sitios de anuncios clasificados (clasificados) son versiones en línea de secciones de anuncios de periódicos, con anuncios relacionados con vehículos, bienes raíces, empleo, mascotas, etc. Los anuncios clasificados son un tipo particular de sitio de comercio electrónico, ya que no admiten el finalización de transacciones entre partes; en cambio, se utilizan para comunicar sobre el producto o servicio y programar reuniones mientras la transacción se lleva a cabo fuera de línea; esto los distingue de los sitios tradicionales de comercio electrónico como eBay o Amazon [2].

Nuestra investigación se centra en OLX, que tiene presencia en más de 30 países en todo el mundo. Uno de los tipos de anuncios que se publican en los clasificados son las ofertas de trabajo. En nuestra investigación, identificamos varias características que distinguen los anuncios de empleo en anuncios clasificados de, por ejemplo, los anuncios de automóviles o bienes raíces:

- Los requisitos de un anuncio indican el tipo de usuario que puede responder al anuncio, no todos los usuarios poseen las competencias requeridas.
- Mayor implicación del usuario durante el proceso de búsqueda, ya que encontrar trabajo es una necesidad primaria frente a, por ejemplo, comprar un coche. • La ubicación del
- trabajo impacta dramáticamente al usuario: para comprar un teléfono móvil o un automóvil, un usuario puede viajar o utilizar un servicio de paquetería para entregar el artículo. Aún así, un trabajo requiere reubicación si está alejado del domicilio del usuario.
- Desde un punto de vista técnico, la descripción de un puesto de trabajo tiene muchos aspectos cualitativos y, dependiendo del puesto, las diferencias pueden ser significativas incluso entre anuncios de una misma empresa.

Machine Translated by Google

Además de estas características, durante nuestra investigación, también identificamos los siguientes desafíos para los métodos de recomendación en anuncios clasificados que influyeron en nuestra implementación de los métodos:

- El número de usuarios y ofertas: con OLX Jobs tratamos con millones de usuarios y decenas de miles de ofertas, ambas en constante cambio.
- Un usuario no tiene que crear un perfil para interactuar con los anuncios, lo que significa que la información de un perfil no se puede utilizar para realizar recomendaciones y las recomendaciones están determinadas por el comportamiento del usuario durante la visualización.
- Un anuncio suele tener un número limitado de visitantes (que interactúan con el anuncio), ya que un anuncio suele referirse a una oferta única. Una vez que se aborda la necesidad, el anuncio se desactiva.
- No hay información sobre si ocurrió una transacción; En los anuncios clasificados, la conversión se relaciona con recibir una respuesta a un anuncio publicado, ya que cualquier transacción se realiza fuera de línea.

Estos desafíos crean dificultades no sólo para la implementación sino también para probar la precisión de los métodos propuestos. Consideramos estos desafíos mientras preparábamos el conjunto de datos e implementábamos y evaluamos los métodos descritos en este documento.

2.2. Sistemas de recomendación

Se ha demostrado que el problema del exceso de elección [3] puede disminuir el consumo de productos [4] y reducir los ingresos del sitio [5]. Los proveedores pueden solicitar a sus usuarios información adicional sobre sus expectativas con respecto a los artículos para reducir la cantidad de opciones presentadas. Incluso si el usuario está dispuesto a dedicar tiempo a proporcionar esta información, el número de posibilidades suele ser demasiado grande para presentárselas. Para abordar este problema, muchas empresas, como Netflix [6] y Amazon [7], han creado sistemas de recomendación personalizados cuya función es sugerir elementos relevantes a los usuarios [8].

Las recomendaciones se utilizan en múltiples dominios, incluidos la música, el turismo, la moda y la comida. Se han realizado numerosos estudios en el ámbito del comercio electrónico [9], anuncios clasificados [10] y recomendaciones laborales [11-13]. Li y col. [14] mejoraron significativamente sus recomendaciones en LinkedIn utilizando el aprendizaje de transferencia profunda para crear modelos de comprensión del trabajo específicos de un dominio. Zhu et al. [15] propusieron un modelo de recomendación entre dominios utilizando un gráfico heterogéneo y un algoritmo de detección de comunidad para recomendar cursos y trabajos. Lacic et al. [16] evaluaron diferentes arquitecturas de codificador automático para recomendaciones de trabajo basadas en sesiones y presentaron los resultados en conjuntos de datos de recomendación de trabajo populares.

Normalmente, distinguimos dos enfoques para proporcionar recomendaciones: recomendaciones basadas en contenido y filtrado colaborativo [8].

En las recomendaciones basadas en contenido [17], utilizamos información sobre los usuarios (p. ej., pasatiempos, educación, habilidades) y artículos (p. ej., precio, ubicación, categoría). Estos sistemas suelen utilizar el historial de interacciones (calificaciones, visitas, compras y respuestas) de un solo usuario pero no consideran las calificaciones de todos los usuarios simultáneamente.

Recopilar/procesar información sobre usuarios y elementos no siempre es factible. En el enfoque de filtrado colaborativo [18,19], solo utilizamos información sobre las interacciones del usuario entre elementos. Incluso sin información sobre las funciones del usuario y de los elementos, estos sistemas pueden proporcionar recomendaciones muy precisas. Elegimos este enfoque debido a la falta de funciones de usuario y la dificultad de superar el filtrado colaborativo mediante la utilización de funciones de elementos en un entorno de producción (exploramos esto en la Sección 6.3).

Una de las deficiencias más importantes del filtrado colaborativo es la imposibilidad de proporcionar recomendaciones sobre usuarios y elementos sin interacciones, conocido como problema de arranque en frío [20]. Una posible solución para reducir este problema es el reentrenamiento frecuente del modelo. Con muchas interacciones del usuario, esta estrategia requiere centrarse en la escalabilidad del modelo [21].

Otro factor importante que determina la elección del modelo es el tipo de interacción entre un usuario y un elemento [20]. Llamamos a la retroalimentación explícita cuando el usuario indica explícitamente su preferencia hacia el ítem (por ejemplo, lo califica en una escala de 1 a 5). Otro tipo es la retroalimentación implícita, cuando solo podemos asumir la preferencia del usuario hacia el elemento en función

Machine Translated by Google

sobre el comportamiento del usuario (por ejemplo, comprar un artículo o ver una película). La retroalimentación implícita es menos precisa, más abundante y normalmente sólo expresa preferencias favorables [22].

Las evaluaciones de laboratorio de los sistemas de recomendación generalmente se basan en métricas de precisión [23]. Recientemente, se ha prestado mucha atención a otros aspectos, como la diversidad, la incertidumbre, la novedad y la cobertura [24,25]. Con los clasificados, un artículo normalmente puede ser consumido por un solo usuario, por lo que debemos evitar recomendar el mismo artículo a un número significativo de usuarios. Por lo tanto, centrarse en la cobertura del catálogo [26] es esencial. Una de las tareas más desafiantes en la evaluación de sistemas de recomendación es encontrar la métrica fuera de línea más correlacionada con el objetivo en línea [27].

En este artículo, comparamos modelos de filtrado colaborativo para un conjunto de datos de retroalimentación implícita considerable. Comparamos la precisión, diversidad y eficiencia de métodos de recomendación seleccionados en un entorno de laboratorio y luego demostramos la calidad de los métodos en pruebas en línea con los usuarios.

2.3. Métodos de recomendación

A continuación, enumeramos los aspectos más importantes que afectan la selección del método para nuestra investigación.

- Popularidad en la literatura. Seleccionamos métodos cuyo desempeño fue evaluado minuciosamente. Todos los métodos seleccionados menos uno han sido citados al menos cientos de veces.
- Popularidad en la industria. Evaluar este aspecto fue un desafío porque las empresas rara vez comparten los resultados de los experimentos realizados. Algunos indicadores de popularidad incluyen la disponibilidad de la implementación y la cantidad de personas que la usan (por ejemplo, reflejado en la cantidad de estrellas y bifurcaciones en GitHub). También consideramos la experiencia de los científicos de datos que trabajan dentro de nuestra empresa, quienes implementaron la mayoría de los métodos seleccionados para otros casos de uso en el pasado.
- Escalabilidad. Solo consideramos soluciones capaces de manejar millones de usuarios y elementos. Además, reducimos el problema del arranque en frío al volver a entrenar el modelo con frecuencia. Por lo tanto, tuvimos que elegir técnicas para entrenarnos en nuestro conjunto de datos en unas pocas horas.
- Diversidad de enfoques. Queríamos probar métodos que representaran a diferentes "familias" para evaluar su aplicabilidad a los anuncios clasificados. Planeamos identificar la familia de enfoques más prometedora para continuar la investigación en esta dirección.

Finalmente, se seleccionaron ALS, LightFM, Prod2Vec, RP3Beta y SLIM para pruebas y evaluación . Las siguientes subsecciones describen las razones para elegir cada método específico y la definición del método. Una limitación común de estos métodos es su incapacidad para recomendar elementos que no hayan sido visitados por ningún usuario y generar recomendaciones para usuarios que no hayan visitado ningún elemento (problema de inicio en frío, [21]). Con nuestro conjunto de datos, sin características de usuario y elemento, es imposible superar este problema mediante ningún método personalizado.

Los métodos seleccionados ya se han comparado en diferentes dominios. Anelli et al. [28] compararon RP3Beta, SLIM, ALS y BPRMF (que es equivalente a LightFM cuando se usa la función de pérdida BPR) en tres conjuntos de datos: Amazon Digital Music, Epinions y MovieLens 1M, en términos de precisión, diversidad y eficiencia. El número de interacciones en estos conjuntos de datos es, respectivamente, 145.523, 300.475 y 571.531. Nuestro estudio utilizó un conjunto de datos que contiene decenas de millones de interacciones, similares a las de los sistemas de producción OLX.

Además, proporcionamos los resultados de una evaluación en línea.

Dacrema et al. [29] compararon la precisión de SLIM, RP3Beta y ALS en varios conjuntos de datos (CiteULike-a, MovieLens 1M, Pinterest, Amazon Music, Amazon Movies, MovieLens 20M, Netflix, Yelp y Gowalla). Demostraron que cada uno de estos algoritmos superó a los otros dos en al menos un conjunto de datos. Algunos de sus hallazgos fueron confirmados en los conjuntos de datos MovieLens 1M y Pinterest por Anelli et al. [30]. Zhu et al. [31] compararon BPRMF, SLIM y Prod2Vec en tres conjuntos de datos (Amazon Books, Yelp y Gowalla), mostrando la superioridad de SLIM. Dong et al. [32] analizaron la precisión de RP3Beta, SLIM y ALS en nueve conjuntos de datos, y SLIM proporcionó los mejores resultados en ocho conjuntos de datos y ALS.

Machine Translated by Google

en uno. A diferencia de nuestro estudio, estos artículos no compararon los métodos seleccionados en términos de diversidad o eficiencia ni realizó una evaluación en línea.

Recientemente, se han desarrollado varios métodos de recomendación basados en redes neuronales. propuesto. Se ha demostrado que los modelos simples adecuadamente determinados y ajustados a menudo superarlos [28,31-33]. Además, debido a la complejidad computacional, los modelos basados en redes neuronales se prueban con menos frecuencia en conjuntos de datos que contienen decenas de millones de interacciones [28]. Por lo tanto, lo dejamos para futuras investigaciones para proponer soluciones más avanzadas y métodos escalables que proporcionan resultados superiores en nuestro conjunto de datos.

2.3.1. Modelos de factorización matricial

Las técnicas de factorización matricial se han utilizado con éxito en sistemas de recomendación desde el concurso del Premio Netflix [34]. La idea principal es aproximar la escasa Matriz de interacción usuario-elemento como producto de dos matrices densas y más pequeñas. Evaluamos dos Enfoques de factorización matricial: LightFM y ALS.

El modelo LightFM [35] fue propuesto para superar el problema del arranque en frío de los métodos de factorización matricial. En nuestro caso, se reduce a la factorización matricial clásica sin información sobre usuarios y artículos. A pesar de esto, decidimos utilizar este enfoque debido a su implementación oficial eficiente en el soporte de múltiples funciones de pérdidas: logística, BPR [36], DEFORMACIÓN [37] y -OS DEFORMACIÓN [38].

Sea U un conjunto de usuarios y yo un conjunto de elementos. Para un usuario dado U y un elemento I, tenemos define = 1 si el usuario interactúa con el elemento , y = 0, en caso contrario. El modelo LightFM predice la puntuación de la siguiente manera:

$$\hat{} = \cdot + + \quad ,$$

donde y denotan las representaciones latentes dimensionales del usuario y del elemento, y y son los sesgos del usuario y del elemento. Todos estos parámetros se aprenden durante el entrenamiento.

La función de pérdida logística debe usarse cuando hay retroalimentación tanto positiva como negativa. Hay tipos disponibles, por lo que no es apropiado para nuestro conjunto de datos, lo cual confirmamos experimentalmente durante el ajuste de hiperparámetros.

Las funciones de pérdida BPR, WARP y -OS WARP son enfoques de aprendizaje de clasificación por pares que son más relevantes para nuestra tarea de recomendaciones principales. Intentan modificar parámetros del modelo para maximizar la diferencia entre las puntuaciones de los ítems D con con qué usuario interactúa y de los elementos D con los que el usuario no interactúa.

Específicamente, en la función de pérdida BPR [36], intentamos maximizar la expresión, como sigue:

$$\sum_{(,,)\ S} \ln(\hat{} \quad ^{-} \hat{}) - \Theta ||\Theta||2 \ ,$$

dónde

$$S = \{(,,) | \ U, \ D \text{ y } \ D\},$$

$$() = \frac{1}{1 + -} \ ,$$

Θ es un parámetro de regularización específico del modelo, Θ es un vector de parámetros y || · || es el Norma euclidiana.

Presentamos WARP [37] como un caso de -OS WARP [38]. La función de pérdida -OS WARP es una suma de pérdidas para cada usuario:

$$\sum_{U} (\hat{} \ , D),$$

donde ˆ es un vector de puntuaciones estimadas ˆ para cada ítem I.

Machine Translated by Google

Para un usuario , Ordenamos los elementos D que interactúan en orden decreciente del determinado puntuaciones estimadas. Es decir, ordenamos los elementos como 1, 2 ,. . . , | D | , donde están los índices elegido de tal manera que tengamos lo siguiente:

$$\hat{}_{1} \geq \hat{}_{2} \geq \ldots \geq \hat{}_{|D|}.$$

Luego tenemos lo siguiente:

$$(\hat{}, D) = \frac{1}{} \sum_{=1}^{|D|} ( )\Phi(\text{rango}(\hat{})),$$

donde rango (ˆ) = I\D (1 + ≥ ˆ), es una función indicadora, Φ( ) = $\sum_{=1} \frac{1}{}$, y = $\sum_{=1}^{|D|}$ ( ) normaliza los pesos inducidos por .

En la práctica, tomamos una muestra de un elemento positivo relacionado con la función de ponderación y Elija al azar elementos invisibles hasta que, después de las muestras, 1 + ≥ . Luego, realizamos un paso de gradiente para minimizar Φ($\frac{\text{I\D}|}{}$) (1 − + ˆ).

Finalmente, la pérdida -OS WARP se logra para ( ) = 1 y ( ) = 0 si ≠ . La deformación La pérdida se logra cuando establecemos ( ) = 1 para N. Podemos omitir el pedido de elementos positivos de D para simplificar los cálculos.

En nuestra investigación, todas las funciones de pérdida (logística, BPR, WARP y -OS WARP) fueron tratadas como hiperparámetros del modelo LightFM y optimizados durante el entrenamiento.

El modelo ALS (mínimos cuadrados alternos), también conocido como WRMF (factorización matricial regularizada ponderada) [39], es un ejemplo de un método de factorización matricial diseñado para conjuntos de datos de retroalimentación implícita. Elegimos este método por su rendimiento comprobado, escalabilidad y popularidad en la investigación y la industria. Además, el modelo ALS tiene ya ha sido implementado y utilizado en OLX.

Definimos la confianza de una observación como = 1 + , donde es un hiperparámetro . También definimos la preferencia como = (> 0). Luego, en ALS, optimizamos la siguiente expresión:

$$\text{mín.}_{,} \sum_{,} (-)^{2} + (\sum || ||2 + \sum || ||2),$$

donde está la incrustación -dimensional del usuario, es la incrustación -dimensional del elemento, y es un parámetro de regularización. El nombre del modelo hace referencia al método optimizado. para esta función. El procedimiento de mínimos cuadrados alternos supone que el usuario o elemento latente Los factores son fijos y determinan analíticamente a los demás. El procedimiento se repite eficientemente. algunas veces [39,40].

En los enfoques de factorización matricial, la incorporación para cada usuario se aprende por separado, lo que podría resultar en una gran utilización de tiempo y memoria si la cantidad de usuarios es grande. Además, las recomendaciones pueden carecer de explicabilidad porque dos usuarios con la Las mismas interacciones pueden recibir recomendaciones diferentes. Otros modelos considerados (SLIM, RP3Beta, Prod2Vec) proporcionan el mismo conjunto de recomendaciones para usuarios con el mismas interacciones.

2.3.2. Modelos basados en el vecindario

El modelo SLIM (métodos lineales dispersos para sistemas de recomendación Top-N [41]) es basado en regresión de vecinos más cercanos basada en elementos [8]. Elegimos este método por su ventajas sobre los modelos de factorización matricial y de vecinos más cercanos basados en ítems [41] y buen rendimiento frente a enfoques neuronales y no neuronales [29].

En este modelo, nos aproximamos a la matriz usuario-artículo aprendiendo la relación artículo-artículo matriz de similitud escasa. Explícitamente, se aprende minimizando la siguiente expresión:

$$\frac{1}{} || - 2 \quad ||2 + \frac{}{|| 2} \quad ||2 + || ||1,$$

Machine Translated by Google

donde ≥ 0 y = 0 para todos , , 1 ≤ , ≤ ‖|, || · || es la norma matricial de Frobenius:

$$\| \| = \sum \sum_{=1}^{|yo|} \sum_{=1}^{|yo|} {}^{2},$$

|| · ||1 es la norma ℓ1 de entrada :

$$\| \|1 = \sum_{=1}^{|yo|} \sum_{=1}^{|yo|} | |$$

y y son parámetros de regularización.

Podemos ver que cada columna de se puede aprender de forma independiente, lo que mejora la escalabilidad de este modelo [41].

Una limitación de este método es que no genera incrustaciones de usuarios y elementos, lo que podría resultar útil para otras tareas (por ejemplo, agrupación de usuarios o elementos). Podemos tratar las columnas de la matriz como incrustaciones de elementos, pero son vectores ‖|-dimensionales escasos, por lo que probablemente no se puedan utilizar directamente en otras tareas.

2.3.3. Enfoques basados en gráficos

RP3Beta [42] es un enfoque de filtrado colaborativo basado en gráficos. De manera similar a Dacrema et al. [29], presentamos este modelo como una extensión del modelo P3alpha [43]. Consideramos un gráfico bipartito y no dirigido = (V, E), donde cada vértice V representa un usuario o un elemento y cada borde { , } E representa la interacción entre un usuario determinado y un elemento determinado. Sean la matriz de adyacencia y la matriz de grados del gráfico. Luego, las puntuaciones de P3alpha se almacenan en la matriz.

$$((\quad {}^{-1} \quad)^{\circ} \quad)^{3},$$

donde ◦ denota el poder de elementos de una matriz (poder de Hadamard). Más precisamente, la puntuación ˆ se almacena en la intersección de la fila que representa al usuario y la columna que representa el elemento. Podemos ver que esta puntuación es una suma de puntuaciones asignadas a rutas de longitud 3 que conectan al usuario y al elemento en el gráfico.

En RP3Beta, la puntuación se calcula con P3alpha y se divide por la popularidad de los elementos elevados a la potencia de para mitigar el sesgo de popularidad.

Elegimos este modelo por su simplicidad, escalabilidad y rendimiento probado [29,30], especialmente dada la gran escasez de nuestro conjunto de datos, lo que reduce significativamente la utilización de la memoria al entrenar el modelo. Esto nos permite calcular y almacenar directamente la matriz de similitud elemento-elemento en la memoria en lugar de la aproximación de paseos aleatorios propuesta en el artículo original.

RP3Beta, similar a SLIM, no genera incrustaciones de usuarios ni elementos. Otra limitación relacionada es su incapacidad para recomendar elementos cuya distancia en el gráfico bipartito usuario-elemento sea mayor que tres de un usuario determinado. Específicamente, un artículo se puede recomendar al usuario solo si al menos un usuario ha visitado el artículo y al menos uno de los artículos ha sido visitado por el usuario. Además, el modelo RP3Beta no cuenta con parámetros optimizados durante el entrenamiento; por lo tanto, es posible que no pueda explotar las relaciones complejas de los datos.

2.3.4. Prod2Vec

El modelo Prod2Vec [44] (o Item2vec [45]) está basado en el modelo Word2Vec [46], ampliamente utilizado en el procesamiento del lenguaje natural. El modelo se centra en aprender representaciones vectoriales de elementos utilizando una secuencia de elementos como una “oración” y elementos dentro de esa secuencia como “palabras”. Se eligió este método porque es escalable y muy diferente de los métodos comparados. Además, este enfoque se basa en el actual sistema de recomendación de redes neuronales profundas híbridas de última generación utilizado en otras categorías en OLX.

Machine Translated by Google

Prod2Vec utiliza el modelo de salto de gramo maximizando la función objetivo sobre el conjunto S de secuencias de elementos, definidas de la siguiente manera:

$$= \sum_{S} \sum \sum_{- \le \le \neq 0} \text{Iniciar sesión } P(+ |),$$

¿Dónde está la longitud del contexto para las secuencias de elementos y los elementos de la misma secuencia son ordenado arbitrariamente. La probabilidad P(+ |) de observar un elemento vecino + dada la El elemento actual se define utilizando la función soft-max:

$$PAG(+ | \quad) = \frac{\text{Exp}(\quad ' \quad)}{\sum_{=1}^{|yo|} \text{Exp}(\quad ' \quad)},$$

donde y son las representaciones vectoriales de entrada y salida de item y ||| es el , número de elementos únicos en el vocabulario. Prod2Vec modela el contexto de una secuencia de elementos, donde elementos con contextos similares (es decir, con interacciones vecinas similares) tienen representaciones vectoriales.

Antes de generar recomendaciones, normalizamos todas las representaciones de vectores de entrada, lo que mejora la eficiencia. Para generar recomendaciones, representamos al usuario como un promedio de representaciones de vectores de entrada de elementos interactuados. Luego buscamos elementos cuyas representaciones de entrada tienen la mayor similitud de coseno con la representación del usuario (-vecinos más cercanos en el espacio latente).

Una posible limitación de este método es una dependencia estricta entre el usuario y el elemento. representaciones. Algunas interacciones deberían tener potencialmente un mayor impacto en las representaciones de los usuarios que otras (lo cual es posible en los modelos de factorización matricial).

2.4. Brecha de investigación

Este artículo tiene como objetivo comparar diferentes métodos de recomendación en el ámbito de los clasificados de empleo, abordando una brecha de investigación específica. Hasta donde sabemos, el Los métodos de recomendación abordados nunca han sido probados o comparados en gran medida. escale mientras trabaja en línea en el ámbito laboral. En este trabajo comparamos estos métodos en un entorno de laboratorio utilizando el conjunto de datos que publicamos y en pruebas A/B en línea realizadas en un entorno de producción.

3. Conjunto de datos de interacciones laborales de OLX

Esta investigación proporciona un conjunto de datos comerciales que contiene 65.502.201 eventos realizados en OLX Jobs por 3.295.942 usuarios que interactuaron con 185.395 anuncios de empleo en dos semanas en 2020. Publicamos el conjunto de datos en Kaggle (https://www.kaggle.com/olxdatascience/olx-jobs-interactions , consultado el 26 de junio de 2024).

Cada fila del conjunto de datos representa el evento que realiza un usuario determinado con respecto a un determinado anuncio en un momento dado (Tabla 1). Se incluyeron los siguientes eventos que involucran comportamientos de los usuarios:

- clic: el usuario visitó la página de detalles del artículo;
- marcador: el usuario agregó el elemento a los marcadores;
- chat_click: el usuario abrió el chat para contactar al dueño del artículo;
- contact_phone_click_1: el usuario reveló el número de teléfono adjunto al artículo;
- contact_phone_click_2: el usuario hizo clic para realizar una llamada telefónica al propietario del artículo;
- contact_phone_click_3: el usuario hizo clic para enviar un mensaje SMS al propietario del artículo;
- contact_partner_click: el usuario hizo clic para acceder a la página externa del propietario del elemento;
- contact_chat: el usuario envió un mensaje al propietario del artículo.

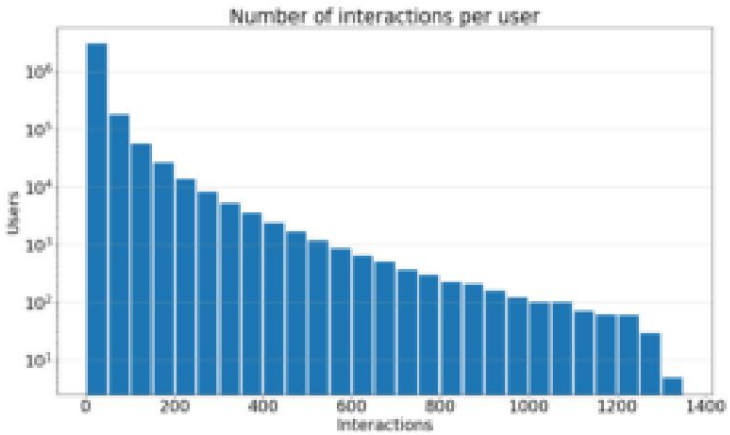
Machine Translated by Google

Tabla 1. Filas de ejemplo del conjunto de datos.

Usuario	Artículo	Evento	Marca de tiempo
1745587	168661	hacer	1582216025
843008	62838	clic	1582485868
14285	30469	hacer clic en	1582247367
1142944	80122	favorito	1581805847
2835659	23728	hacer clic en chat_hacer clic	1582397836

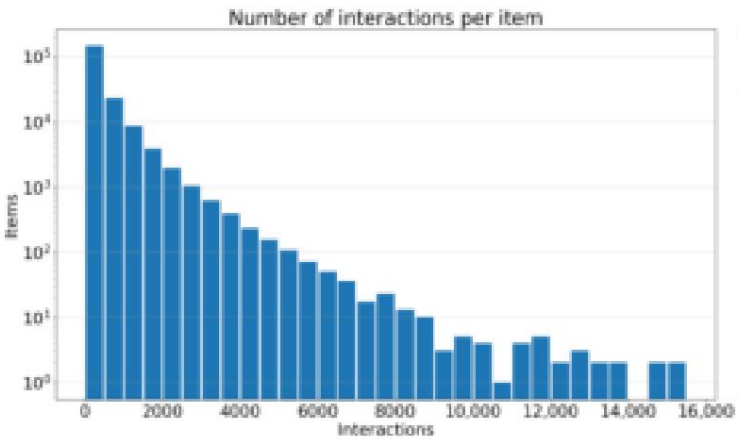
Fuente: estudio propio.

La escasez de datos (% de entradas faltantes en la matriz usuario-elemento) equivale al 99,9923%, que es muy bajo pero típico de los anuncios clasificados (a modo de comparación, la escasez de datos en el El conjunto de datos MovieLens 20M es del 99,47%, lo que lo hace casi 70 veces más denso). Distribuciones de Las interacciones por usuario, las interacciones por elemento y los eventos se proporcionan en las Figuras 1 y 2. y Tabla 2, respectivamente. Usamos una escala logarítmica porque las distribuciones son fuertemente sesgado a la derecha.



Quantile	Value
0.01	1
0.10	1
0.25	2
0.50	6
0.75	18
0.90	46
0.99	221

Figura 1. Número de interacciones por usuario. Fuente: estudio propio.



Quantile	Value
0.01	1
0.10	1
0.25	3
0.50	137
0.75	428
0.90	950
0.99	2944

Figura 2. Número de interacciones por ítem. Fuente: estudio propio.

Según De Ruijt y Bhulai [47], los conjuntos de datos más populares utilizados para la evaluación de sistemas de recomendación laboral son CareerBuilder12 (https://www.kaggle.com/ concursos/recomendación de trabajo, consultado el 16 de junio de 2024), RecSys16 [12] y Rec-Sys17 [13]. La Tabla 3 muestra las estadísticas de los conjuntos de datos considerados. El número de únicos interacciones es el número de pares únicos de usuario-elemento donde el usuario interactuó con el artículo. Aunque los investigadores utilizan los conjuntos de datos RecSys16 y RecSys17, fueron publicados durante concursos de ciencia de datos bajo condiciones estrictamente limitadas y no son Ya no está disponible. Por lo tanto, no pudimos calcular el número de interacciones únicas para estos

Machine Translated by Google

conjuntos de datos. Observamos que el conjunto de datos de interacciones laborales de OLX tiene el mayor número de interacciones y tipos entre los conjuntos de datos considerados.

Tabla 2. Distribución de eventos.

Acción	Frecuencia (%)
haga	89.794
clic en contact_phone_click_1	2.628
favorito	2.511
chat_click	2.136
contact_chat	1.448
contact_partner_click	0.701
contact_phone_click_2	0,679
contact_phone_click_3 Fuente:	0.103

estudio propio.

Tabla 3. Comparación entre conjuntos de datos de recomendaciones laborales. La letra denota la desviación estándar.

	Empleos de OLX Interacciones	CareerBuilder12	RecSys16	RecSys17
Interacciones	65,50 millones	1,60M	8,83M	8,27M
Interacciones únicas	47,17 millones	1,60M	-	-
Usuarios	3,30M	0,3 2M	1,37M	1,50M
Número promedio de únicos interacciones por usuario	14.31 (= 29,23)	4,99 (= 11,42)	<6.46	<5.51
Elementos	0,19 millones	0,37M	1,36M	1,31M
Número promedio de únicos interacciones por elemento	254,42 (= 426,02)	4.38 (= 8,19)	<6,50	<6.31
Densidad de la matriz de interacción (%)	0,0077%	0,0014%	<0,0005%	<0,0004%
Tipos de interacciones	8	1	4	5
Marcas de tiempo				
Funciones de usuario				
Características del artículo				

Fuente: estudio propio.

Cabe señalar que mantener la confidencialidad de los anuncios y de los usuarios era una prioridad al preparar este conjunto de datos. Las medidas tomadas para proteger la privacidad incluyeron las siguientes:

- Los identificadores originales de usuarios y elementos fueron reemplazados por números enteros aleatorios únicos;
- Se agregó algún número entero constante no revelado a cada marca de tiempo;
- Se filtraron algunas fracciones de interacciones;
- Se agregaron algunas interacciones artificiales adicionales.

4. Configuración experimental

4.1. Implementación

Implementamos los métodos mencionados anteriormente en base a desarrollos anteriores. Los detalles sobre cómo nuestras implementaciones difieren de los enfoques probados anteriormente son proporcionado en la Tabla 4. La implementación de los métodos para la reproducibilidad de los resultados es disponible en GitHub (https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recommendations, accedido el 29 de mayo de 2024).

Machine Translated by Google

Tabla 4. Métodos reimplementados para la investigación.

Método	Familia de métodos	Fuente	diferencia con el Método original
Factorización de matriz LightFM		Implementación basada en: [48]. Documento de apoyo: [35].	Ninguno
ELA	Factorización matricial	Implementación basada en: [49]. Artículos de respaldo: [39,40].	Ninguno
DELGADO	Basado en el vecindario	Fuentes que inspiraron nuestra implementación: [50,51]. Documento de apoyo: [41].	Ninguno
RP3Beta	basado en gráficos	Fuente que inspiró nuestra implementación: [52]. Artículos de respaldo: [29,53].	Realizado directo cálculos en matrices dispersas en lugar de aleatorias camina aproximación.
Prod2Vec Palabra2Vec		Implementación basada en: [54]. Artículos de respaldo: [44,45].	Secuencias de interacciones, ordenadas por marca de tiempo. Representar al usuario como un promedio de las representaciones de los elementos interactuados . También experimentamos con CBOW (bolsa continua de palabras).

Fuente: estudio propio.

4.2. Objetivos de investigación de laboratorio y pruebas en línea Nuestro

objetivo comercial final era aumentar la cantidad de usuarios que solicitaban empleo a través de OLX Jobs. Para lograrlo, intentamos resolver un problema de clasificación; más precisamente, recomendamos diez elementos con mayor probabilidad de recibir la interacción de un usuario determinado. Mogenet et al. consideraron la cuestión de encontrar una métrica fuera de línea más correlacionada con la tasa de solicitud en el ámbito laboral. [27]. Dado que nuestro objetivo es similar, seguimos sus resultados optimizando para precisión@10 (precisión para los primeros diez elementos recomendados [23]). Sin embargo, también informamos y analizamos otras métricas de precisión, diversidad y eficiencia.

Estamos enfocados en usuarios que buscan activamente empleo interactuando con anuncios de empleo. Por lo tanto, no consideramos usuarios sin interacciones (usuarios de arranque en frío).

4.3. División de datos

El conjunto de datos descrito en la Sección 3 se dividió en conjuntos de datos de entrenamiento-validación y de prueba según lo requiere la metodología de investigación. El conjunto de prueba incluye el 20% de las interacciones más recientes. Esto significa que de 14 días, se incluyeron aproximadamente 3 días en el conjunto de prueba (consulte la Figura 3). Esta forma de dividir el conjunto de datos en conjuntos de entrenamiento y prueba es la configuración más realista según Meng et al. [55], quienes estudiaron varias estrategias de división para evaluar sistemas de recomendación.

En ambos conjuntos de datos, también limitamos la cantidad de interacciones a interacciones únicas entre un usuario y un elemento. Si un usuario interactuaba más de una vez con un elemento, solo se contaba la primera interacción y la marca de tiempo de esa interacción se asociaba con el elemento. Tampoco distinguimos entre tipos de interacciones. Además, se aplicaron dos modificaciones más: solo los usuarios que aparecían en el conjunto de datos de capacitación y validación se incluyeron en el conjunto de prueba (porque no podíamos brindar recomendaciones personalizadas a otros usuarios sin conocimientos adicionales sobre ellos) y filtramos a todos los usuarios. pares de elementos que estaban presentes en el conjunto de entrenamiento (para evitar recomendar elementos que ya se habían visto). Como resultado, terminamos con aproximadamente 38 M de filas en el conjunto de entrenamiento y validación y aproximadamente 6 M de filas en el conjunto de prueba. En la Tabla 5 se presentan más estadísticas de estos dos conjuntos de datos .

Machine Translated by Google

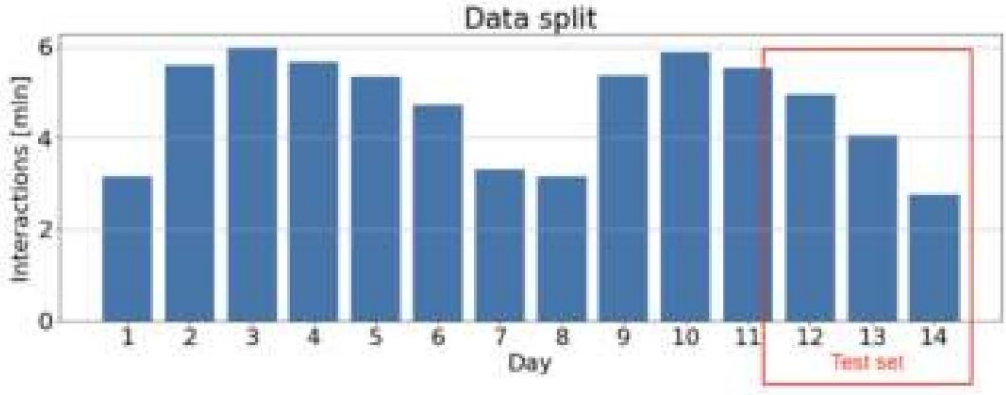


Figura 3. Preparación del conjunto de datos (dividida en capacitación-validación y prueba, según la cantidad de días). Fuente: estudio propio.

Tabla 5. Comparación entre conjuntos de entrenamiento/validación y prueba. La letra denota estándar. desviación.

	Interacciones laborales de OLX Interacciones	Conjunto de formación y validación	Equipo de prueba
Interacciones	65,50 millones	52,40 millones	6,11 millones
Interacciones únicas	47,17 millones	38,25 millones	6,11 millones
Usuarios	3,30M	2,83 millones	0,62 millones
Número promedio de únicos interacciones por usuario	14.31 (= 29,23)	13.50 (= 26,11)	9,87 (= 14,38)
Elementos	0,19 millones	0,18M	0,13M
Número promedio de únicos interacciones por elemento	254,42 (= 426,02)	214.05 (= 365,93)	47,51 (= 83,84)
Densidad de la matriz de interacción (%)	0,0077%	0,0076%	0,0077%

Fuente: estudio propio.

4.4. Ajuste del modelo

Por razones de costo y tiempo, al realizar la optimización de parámetros, Hicimos una restricción al 20% de los usuarios y al 20% de los ítems de la capacitación y validación. colocar. Luego, dividimos el conjunto de datos restringido en el conjunto de datos de entrenamiento-validación con el reglas descritas en la sección anterior. Para cada modelo, se eligieron 100 iteraciones. mediante optimización bayesiana utilizando procesos gaussianos implementados en scikit-learn (https://scikit-optimize.github.io/stable/modules/generated/skopt.gp_minimize.html, accedido el 29 de mayo de 2024). El archivo de configuración define espacios para hiperparámetros y está disponible en nuestro repositorio de código (https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recommendations/blob/principal/src/tuning/config.py, consultado el 29 de mayo de 2024). Por ejemplo, para RP3Beta, nosotros Nos limitamos a buscar y en el intervalo [0, 2].

Se prepararon recomendaciones en el proceso de optimización para 30.000 usuarios y Como se mencionó anteriormente, el puntaje de optimización utilizado fue precisión@10. La figura 4 muestra la puntuación de precisión dependiendo de los parámetros. Es visible que la ELA no era altamente optimizado dentro del proceso, pero para otros métodos, esta optimización fue crucial para mejorando la precisión. Los hiperparámetros para todos los modelos se presentan en la Tabla 6.

Machine Translated by Google

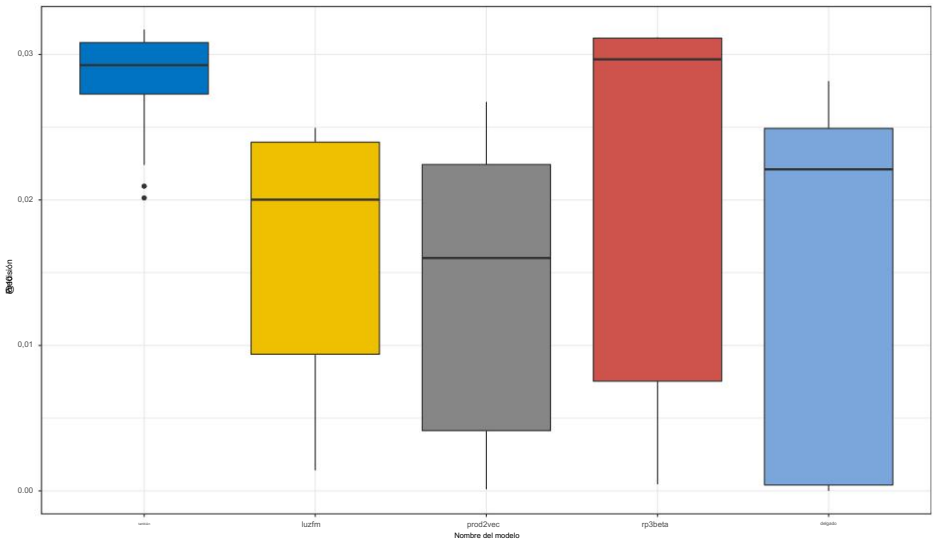


Figura 4. Precisión para cada modelo, en función de los parámetros. Fuente: estudio propio.

Tabla 6. Hiperparámetros del modelo.

Modelo	Hiperparámetros del modelo
también	{'factores': 357, 'regularización': 0.001, 'iteraciones': 20, 'event_weights_multiplier': 63}
luzfm	{'no_components': 512, 'k': 3, 'n': 20, 'learning_schedule': 'adadelta', 'pérdida': 'warp', 'max_sampled': 61, 'épocas': 11}
prod2vec	{'vector_size': 168, 'alfa': 0.028728, 'ventana': 20, 'min_count': 16, 'muestra': 0,002690026, 'min_alpha': 0,0, 'sg': 1, 'hs': 1, 'negativo ': 200, 'ns_exponent': −0,16447846705441527, 'cbow_mean': 0, 'épocas': 22}
RP3Beta	{'alfa': 0,61447198, 'beta': 0,1443548}
delgado	{'alfa': 0.00181289, 'l1_ratio': 0.0, 'iteraciones': 3}

Fuente: estudio propio.

4.5. Evaluación del modelo

Evaluamos nuestros modelos en términos de precisión, diversidad y eficiencia.

La precisión del método de recomendación en conjuntos de datos de retroalimentación implícita suele ser evaluado examinando qué elementos de la lista de las principales recomendaciones el usuario interactuó en el conjunto de prueba [8]. Muchas métricas de evaluación determinan las métricas para cada usuario por separado y presentar la media como puntuación de evaluación final del método [23]. El El sistema de recomendación puede considerarse un clasificador, donde las interacciones del usuario en el conjunto de pruebas son ejemplos positivos y las principales recomendaciones son elementos clasificados como positivo por el modelo. Por lo tanto, los métodos utilizados para evaluar clasificadores pueden ser directamente aplicado a sistemas de recomendación. Por ejemplo, el valor de precision@ para un usuario determinado es el número de elementos recomendados con los que interactuó el usuario en el conjunto de prueba dividido por el número de artículos recomendados a ese usuario. Otras métricas discutidas en este trabajo fueron descrito por Tamm et al. [23].

En el dominio de anuncios clasificados, principalmente en el dominio de empleos, generalmente solo se necesita un usuario para completar una transacción relacionada con un anuncio determinado. En este caso, la diversidad de recomendaciones es incluso más crítico que en otros dominios (como música, películas u otros comercios electrónicos, excluyendo clasificados). Para evaluar este aspecto utilizamos tres medidas: cobertura de prueba, Shannon entropía [56] y el índice de Gini [56]. La cobertura de la prueba se refiere a la fracción de elementos de la prueba. recomendado a al menos un usuario. Con la entropía de Shannon y el índice de Gini, ignoramos elementos fuera del conjunto de prueba. Una mayor cobertura de prueba y los valores de entropía de Shannon indican mayores diversidad, mientras que valores mayores del índice de Gini indican menor diversidad.

Machine Translated by Google

El paso final de evaluación del laboratorio se centra en la eficiencia. Para ello utilizamos una instancia de AWS SageMaker ml.m5.4xlarge equipada con 64 GB de RAM y 16 vCPU, con una CPU Intel(R) Xeon(R) Platinum 8259CL a 2,50 GHz, ejecutándose en Amazon Linux AMI 2018.03. Todos los métodos fueron evaluados en relación con tres funciones: preprocesamiento de datos, ajuste del modelo y recomendación de artículos. El tiempo de ejecución se calculó para el tiempo total necesario para calcular el modelo (en horas). Se calculó el pico de memoria. en GB, y se consideró el uso máximo de memoria al ejecutar una función determinada.

Esta evaluación se realizó utilizando la biblioteca tracemalloc (https://docs.python.org/3/biblioteca/tracemalloc.html, consultado el 29 de mayo de 2024).

5. Evaluación de laboratorio

Esta sección describe la evaluación de laboratorio de los métodos discutidos en el conjunto de datos desarrollado. Utilizamos los hiperparámetros de mejor rendimiento que se encuentran en la sección anterior. Cada modelo se entrenó con todo el conjunto de datos de entrenamiento y validación, y se produjeron recomendaciones para los 619.389 usuarios del conjunto de prueba. Para presentar mejor los valores de Para cada métrica fuera de línea, comparamos los métodos descritos con métodos simples y no personalizados. líneas de base: el enfoque de producto más popular y recomendaciones aleatorias.

5.1. Exactitud

Todas las métricas de esta sección consideran las primeras diez recomendaciones, por ejemplo, precisión@10, recordar@10. Los valores de métricas más altos indican una mayor calidad de las recomendaciones. Los valores no debe compararse directamente con los resultados obtenidos en otros conjuntos de datos porque Las métricas dependen en gran medida de la distribución del conjunto de datos (por ejemplo, alta escasez) y la estrategia de división tren/prueba [55].

5.1.1. Evaluación de precisión

La Tabla 7 presenta los resultados de la evaluación. La mayoría de las diferencias observadas son estadísticamente significativo debido al gran número de usuarios evaluados. Desarrollamos más sobre la significancia estadística de los resultados en la Sección 5.1.2.

Tabla 7. Precisión: resultados de la evaluación. Todas las métricas presentadas fueron descritas por Tamm et al. [23]. Para Para la métrica mAP, utilizamos la variante con = min(,).

Métrico	RP3Beta	SLIM	ALS	Prod2Vec	LightFM	Más popular	Aleatorio
precisión 0,0484	0,0472	0,0434	0,0368	0,0359	0,0012	0.00006	
recuperación 0,0783	0,0736	0,0657	0,0580	0,0564	0,0012	0.00005	
ndcg 0,0759 mAP	0,0721	0,0657	0,0567	0,0545	0,0016	0.00007	
0,0393 MRR 0,1365	0,0365	0,0329	0,0282	0,0264	0,0006	0.00002	
LAUC 0,5391 HR 0,3131	0,1314	0,1230	0,1065	0,1034	0,0038	0.00019	
	0,5368	0,5328	289 0,3066	0,5281	0,5006	0,49999	
	0,2878	0,2537		0,2547	0,0112	0.00059	

Fuente: estudio propio.

Nuestros enfoques superan significativamente las recomendaciones de artículos aleatorios y más populares . El bajo rendimiento del enfoque más popular se debe a la naturaleza de clasificados, principalmente el dominio del trabajo, donde los usuarios están más interesados en un área específica ubicación y categoría. Creación de sistemas de recomendación más sofisticados y personalizados es razonable en tal escenario.

Está demostrado que RP3Beta supera a otros enfoques en términos de precisión métrica. Creemos que esto está relacionado con la gran escasez de nuestro conjunto de datos. RP3Beta calcula las recomendaciones de manera determinista (aprovechando rutas de longitud tres en un usuario-elemento gráfica bipartita). Todos los demás enfoques utilizan técnicas de aprendizaje automático para encontrar usuarios. representaciones (ALS, LightFM), representaciones de elementos (ALS, LightFM, Prod2Vec) o directas. similitudes entre elementos (SLIM), que pueden ocurrir en los casos en que los usuarios o elementos tienen un bajo número de interacciones.

Machine Translated by Google

5.1.2. Comparación estadística de Precision@10

Presentamos una comparación estadística detallada para nuestra métrica principal, precision@10, para identificar diferencias entre los métodos. Para empezar, probamos la hipótesis nula de que todos los métodos funcionan igual y las diferencias observadas son meramente aleatorias (prueba ómnibus). La prueba de Friedman [57,58] con la extensión de Iman y Davenport [59] es probablemente la prueba general más popular y suele ser una buena opción cuando se comparan más de cinco algoritmos diferentes [60,61]. Sea el rango del ésimo de métodos sobre el ésimo de muestras y

$$= \frac{1}{} \sum_{=1} .$$

En nuestro caso, el número de muestras, es el número de usuarios en el conjunto de prueba, = 619,389. La prueba compara los rangos medios de los métodos y se basa en las siguientes estadísticas:

$$= \frac{(-1)\ ^{2}}{(-1) -\ ^{2}},$$

dónde

$$^{2} = \frac{12}{(+1)} \sum_{=1} \ ^{2} - 3\,(+1)$$

es el estadístico de Friedman, que tiene la distribución con − 1 y (− 1) (− 1) grados de libertad. El valor de esta prueba es igual a 0. El valor obtenido indica que podemos rechazar con seguridad la hipótesis nula de que todos los algoritmos funcionan igual. Por lo tanto, podemos proceder con las pruebas post hoc para detectar diferencias significativas por pares entre todos los métodos. Demšar [62] propone el uso de la prueba de Nemenyi [63], que compara todos los algoritmos por pares. Para un nivel de significancia, la prueba determina la diferencia crítica (CD). Si la diferencia entre las clasificaciones promedio de dos algoritmos es mayor que

$$CD = \sqrt{\quad} \quad \frac{\qquad}{(+ 1)},$$

Se rechaza la hipótesis nula de que los algoritmos tienen el mismo rendimiento (sobre el Es basado estadístico de rango estudentizado dividido por √ 2). Demšar [62] propuso un gráfico para comprobar las diferencias (el gráfico CD visualmente). Los algoritmos que no están unidos por una línea pueden considerarse diferentes en el gráfico.

En nuestro caso, con una significación de = 0,05, dos algoritmos cualesquiera con una diferencia en el el rango medio superior a 0,0114 se considerará no igual (Figura 5).

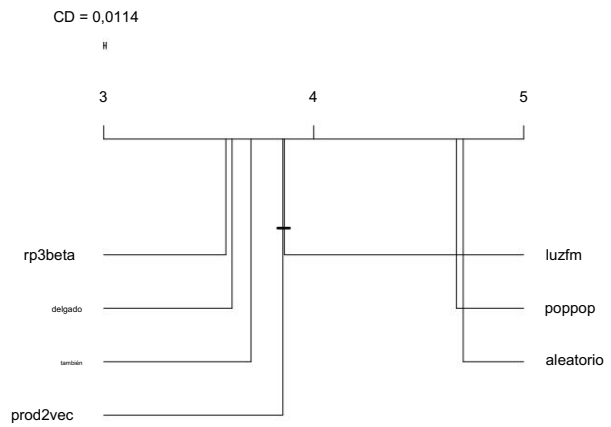


Figura 5. Gráfico de diferencia crítica (para mayor precisión). Fuente: estudio propio.

Machine Translated by Google

5.1.3. Precisión para usuarios con diferentes números de interacciones

La única información que tenemos sobre nuestros usuarios son sus interacciones. En la Figura 6, examinamos cómo la cantidad de elementos con los que ha interactuado un usuario influye en nuestra métrica principal, precision@10. Dividimos a nuestros usuarios en diez grupos de tamaño similar según la cantidad de interacciones.

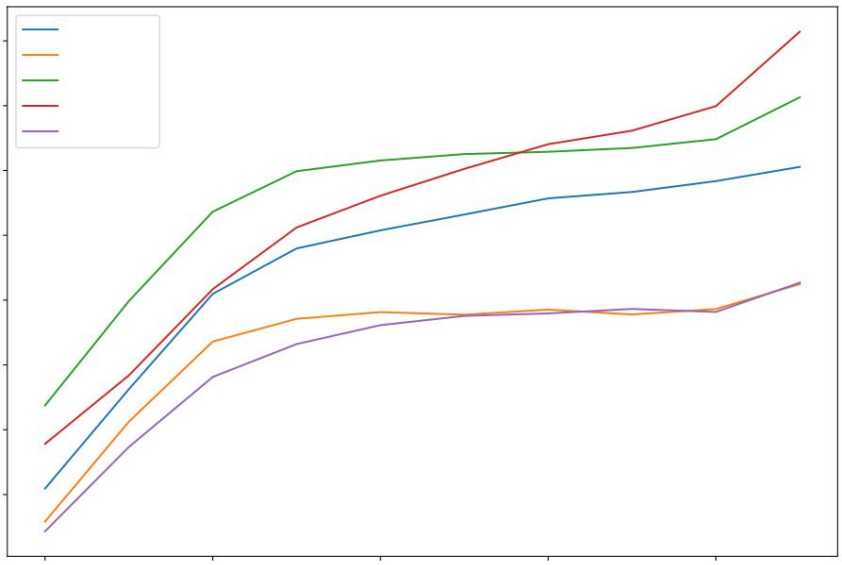


Figura 6. Precisión@10 para cada modelo, dependiendo del número de elementos con los que interactuó el usuario. Se ve mejor en color. Fuente: estudio propio.

Podemos ver que el orden de los modelos ordenados por precisión@10 no depende del grupo, excepto que SLIM tuvo un mejor desempeño que RP3Beta para usuarios con al menos 22 interacciones. La diferencia es estadísticamente significativa para cada grupo de usuarios (que se analiza en la Sección 5.1.4). El modelo RP3Beta puede verse como un caso particular del enfoque de filtrado colaborativo basado en elementos, que utiliza una medida de similitud determinista entre elementos [64]. Por otro lado, SLIM utiliza métodos de aprendizaje automático para conocer similitudes.
Suponemos que dichas puntuaciones de similitud aprendidas están menos sesgadas pero tienen una mayor varianza, lo que conduce a un mejor rendimiento para los usuarios con muchas interacciones porque el promedio se realiza sobre un número más significativo de puntuaciones.

5.1.4. Evaluación estadística de la precisión para usuarios con diferentes números de interacciones En esta subsección, analizamos la diferencia entre los modelos RP3Beta y SLIM.
dependiendo del número de interacciones del usuario, como se observa en la Figura 6.

Para comparar estadísticamente dos métodos en múltiples conjuntos de datos, Demšar [62] recomienda la prueba de rangos con signo de Wilcoxon [65]. La prueba de rangos con signos de Wilcoxon es una alternativa no paramétrica a la prueba pareada, que clasifica las diferencias en el rendimiento de dos algoritmos para cada conjunto de datos, ignorando los signos. Compara los rangos de las diferencias positivas y negativas.

La Tabla 8 muestra que la diferencia entre los modelos RP3Beta y SLIM es estadísticamente significativo para cada grupo de usuarios.

Machine Translated by Google

Tabla 8. Resultados de la prueba de rangos con signo de Wilcoxon entre los modelos RP3Beta y SLIM dependiendo del Número de elementos con los que interactuó el usuario.

Papelera	Valor p
[1,0, 3,0)	0
[3,0, 5,0)	0
[5,0, 8,0)	0
[8,0, 11,0)	0
[11,0, 16,0)	0
[16,0, 22,0)	1,25 × 10−6
[22,0, 31,0)	9,27 × 10−7
[31,0, 45,0)	0
[45,0, 74,0)	0
[74,0, 852,0]	0

Fuente: estudio propio.

5.2. Diversidad

En la Tabla 9 podemos observar que Prod2Vec y LightFM proporcionan la mayor diversidad después de excluir las recomendaciones aleatorias (que deberían tener la mayor diversidad). El Las diversidades de los modelos más precisos, RP3Beta, SLIM y ALS, son similares, excepto por el caso de la menor cobertura de pruebas de ALS. La relación entre cobertura de prueba y precisión@10 se muestra en la Figura 7.

Tabla 9. Diversidad: resultados de la evaluación.

Métrico	RP3Beta	SLIM	ALS	Prod2Vec	LightFM	Más Popular	Aleatorio
cobertura de prueba	0,5725	0,5171	0,3038	0,7400	0,7031	0,0002	0.9778
Shannon	9,5271	9,6728	9,6270	10,4031	10,1385	2,3296	11.7267
Gini	0,9083	0,9029	0,9120	0,7956	0,8397	0,9999	0.1159

Fuente: estudio propio.

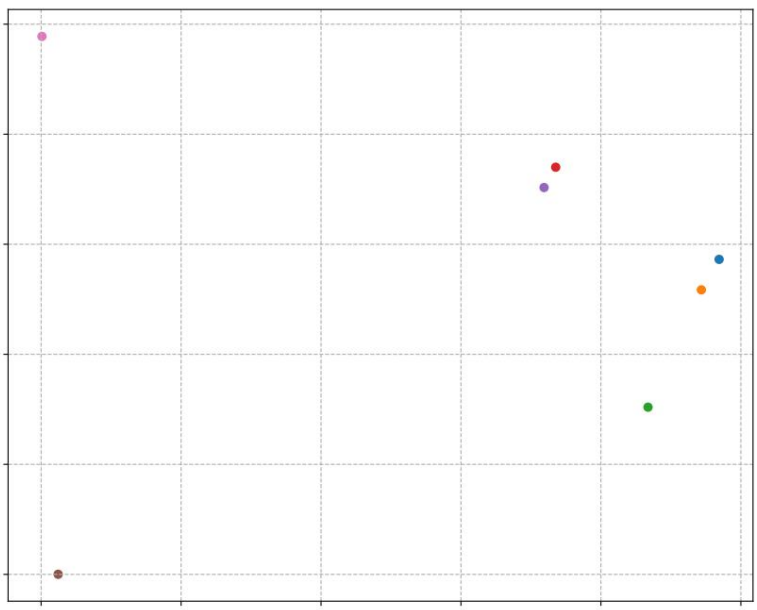


Figura 7. Cobertura de prueba versus precisión@10 para los modelos considerados. Fuente: estudio propio.

Machine Translated by Google

5.3. Superposición de métodos

En nuestra investigación, nos centramos en métodos que vale la pena probar con usuarios reales. Por lo tanto, estudiamos la superposición entre las recomendaciones ofrecidas por los métodos implementados con respecto a los pares usuario-elemento (coeficiente de superposición [66]). Esperamos más significativos diferencias en las recomendaciones al comparar métodos con un bajo solapamiento.

Los resultados de este experimento se presentan en la Tabla 10. RP3Beta y SLIM ofrecen recomendaciones similares. Aunque se calculan de forma diferente, utilizan un elemento escaso matriz de similitud. El grupo de comparación con ELA tiene similitudes medias con otros métodos. Los más diferentes desde la perspectiva de la superposición son también los modelos más diversos, a saber, Prod2Vec y LightFM. La baja superposición de ALS y LightFM enfatiza la Importancia de elegir la función de pérdida en los enfoques de factorización matricial.

Tabla 10. Superposición de modelos.

Modelo	RP3Beta	DELGADO	ELA	Prod2Vec	LuzFM
RP3Beta	100%	73%	53%	37%	38%
SLIM	73%	100%	50%	35%	35%
ALS	53%	50%	100%	38%	37%
Prod2Vec	37%	35%	38%	100%	28%
LightFM	38%	35%	37%	28%	100%

Fuente: estudio propio.

5.4. Evaluación de Eficiencia

Los resultados de la evaluación de eficiencia se presentan en la Figura 8. RP3Beta, ALS y LightFM supera a SLIM y Prod2Vec en cuanto a tiempo de ejecución, mientras que Prod2Vec es el que requiere menos memoria. Para volver a entrenar el modelo con frecuencia, configuramos el máximo aceptable El tiempo de ejecución fue de 3 h, que fue satisfecho por ALS, LightFM y RP3Beta. de un costo perspectiva, la utilización de memoria aceptable se configuró en 110 GB, que todos los modelos cumplido. Podemos observar que nuestros modelos podrían entrenarse incluso en una sola computadora portátil.

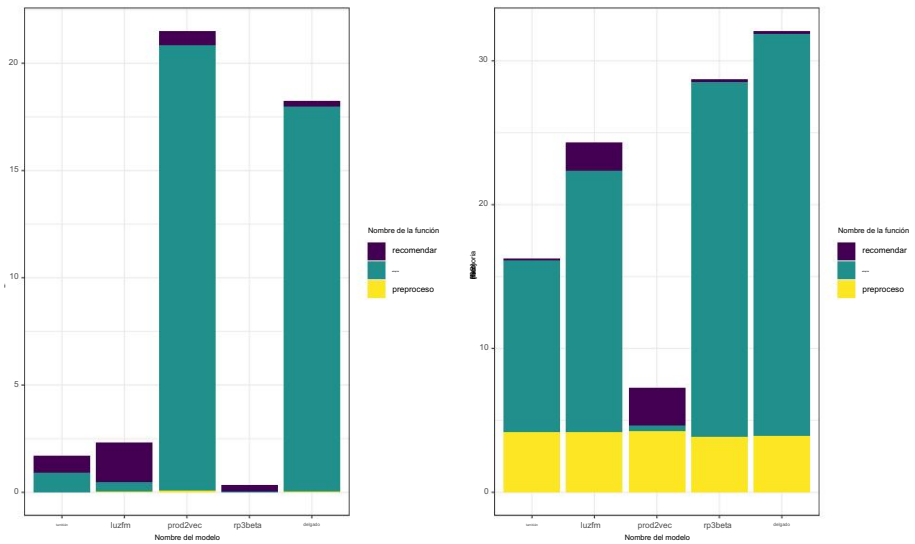


Figura 8. Tiempo de ejecución y utilización de memoria. Se ve mejor en color. Fuente: estudio propio.

5.5. Resumen

La investigación de laboratorio nos permitió seleccionar modelos para probarlos en línea con OLX. usuarios. En primer lugar, elegimos el modelo RP3Beta para las pruebas online porque es el mejor enfoque. en cuanto a precisión y tiempo de ejecución. El consumo de memoria relativamente alto sigue siendo lo suficientemente bajo como para que el modelo sea probado en producción. Investigando el impacto de este La diversidad relativamente baja del método puede ser una línea interesante de investigación futura.

Machine Translated by Google

SLIM es el segundo mejor modelo en términos de precisión@10. Sin embargo, no seleccionamos este método para la evaluación en línea debido a su baja eficiencia y alta superposición con el modelo RP3Beta ya seleccionado. Mejorar la eficiencia de la implementación de SLIM podría cambiar esta decisión.

Entre otros modelos, la máxima precisión @10 la consigue ALS. Además, ALS ya estaba implementado y utilizado para recomendaciones laborales en OLX; por lo tanto, decidimos incluirlo en la comparación en línea.

Aunque Prod2Vec y LightFM producen las recomendaciones más diversas, decidimos no probarlas online debido a la precisión@10 y la eficiencia significativamente peores de Prod2Vec.

6. Evaluación en línea

Para evaluar la efectividad de los métodos seleccionados, realizamos dos pruebas A/B en línea con usuarios de OLX Jobs. Nos centramos en los usuarios que habían visitado recientemente anuncios de empleo en nuestra plataforma. Les enviamos correos electrónicos con diez anuncios de trabajo recomendados y, cuando un usuario había instalado una aplicación OLX, también se enviaba una notificación automática con un anuncio de trabajo recomendado . Luego, observamos si el usuario solicitó algún trabajo dentro de las siguientes 48 h (usuario convertido).

6.1. Impacto del modelo ALS

El primer experimento tenía como objetivo responder a la pregunta: ¿la introducción del método de recomendación aumenta el número de usuarios que solicitan empleo? En esta prueba, dividimos a los usuarios en dos grupos: un grupo de control sin recomendaciones y un grupo con recomendaciones generadas mediante el modelo ALS. Solo ≈ 10 % de los usuarios fueron asignados al grupo de control porque el modelo ALS ya estaba implementado y utilizado para recomendaciones laborales en OLX antes de la prueba. Preferimos recopilar una muestra mínima realizando una prueba más extensa para observar un impacto a largo plazo en nuestros usuarios. La prueba se llevó a cabo durante 25 días en marzo de 2021. Los resultados se presentan en la Tabla 11. La significación estadística de la ventaja de la ELA sobre el grupo de control se examinó mediante la prueba de chi-cuadrado y se encontró que el valor era igual a 0. Este experimento confirmó nuestra hipótesis de que las recomendaciones afectan la actividad, ya que el porcentaje de usuarios convertidos después de recibir una comunicación aumentó significativamente en (16,83% − 15,98%)/15,98% ≈ 5,3%.

El aumento observado se traduce en cientos de usuarios adicionales que solicitan empleo a través de OLX Jobs diariamente.

Tabla 11. Comparación de actividad con o sin recomendaciones.

Variante	Usuarios	% de usuarios convertidos
control	129.308	15,98%
ELA	1.170.262	16,83%

Fuente: estudio propio.

6.2. Comparación de los modelos ALS y RP3Beta

En el segundo experimento, probamos si el mejor modelo de las pruebas de laboratorio superaba al ALS. Dividimos a nuestros usuarios en tres grupos y recibimos recomendaciones de diferentes sistemas de recomendación: ALS, RP3Beta y una variante mixta. Generamos la mitad de las recomendaciones con ALS y la otra mitad con RP3Beta. El segundo experimento se realizó durante 28 días en marzo y abril de 2021. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

El porcentaje de usuarios convertidos se calcula aquí en relación con todos los usuarios; sin embargo, cambiar el sistema de recomendaciones no afectó a los usuarios que no abrieron el mensaje. Decidimos filtrarlos porque su comportamiento añadía ruido innecesario a nuestros datos. La Tabla 13 presenta el impacto en los usuarios que abrieron el mensaje. La ventaja de RP3Beta sobre ALS es estadísticamente significativa (valor de p ≈ 10-6). La diferencia entre las variantes RP3Beta y ALS+RP3Beta no es estadísticamente significativa (el valor de p es 0,19).

Machine Translated by Google

Tabla 12. Comparación de diferentes métodos de recomendación.

Variante	Usuarios	% de usuarios convertidos
ELA	343.892	15,25%
RP3Beta	345.273	15,40%
ELA+RP3Beta	343.896	15,30%

Fuente: estudio propio.

Tabla 13. Comparación de diferentes métodos de recomendación para los usuarios que abrieron el mensaje.

Variante	Usuarios	% de usuarios convertidos
ELA	44.775	19,66%
RP3Beta	46.097	20,94%
ELA+RP3Beta	45.469	20,59%

Fuente: estudio propio.

De los usuarios que abrieron el mensaje observamos 1,28 pp (puntos porcentuales) más usuarios convertidos de RP3Beta que de ALS. Dado que la tasa de apertura de mensajes fue del 13,2%, esto equivale a un aumento de 1,28 × 0,132 ≈ 0,17 pp de todos los usuarios objetivo. Basado en el Según los resultados del primer experimento, la ELA supone un aumento de 0,85 pp con respecto al grupo de control. Esto significa que reemplazar ALS con RP3Beta aumenta nuestro impacto en todos los usuarios objetivo en aproximadamente 0,17/0,85 = 20%.

6.3. Discusión

Hemos demostrado que enviar recomendaciones laborales desde el modelo ALS aumenta la número de usuarios que respondieron a anuncios de empleo en más del 5%. Además, RP3Beta significativamente supera a la ELA.

Además, realizamos otra prueba A/B online comparando el modelo RP3Beta con una variante en la que reemplazamos la mitad de las recomendaciones de RP3Beta con recomendaciones generado a partir del sistema de recomendación híbrido de aprendizaje profundo utilizado en OLX (https://tech.olx.com/item2vec-neural-item-embeddings-to-enhance-recommendations-1fd948a6f293, consultado el 29 de mayo de 2024). Decidimos no describir esa prueba en este artículo, ya que este trabajo se centra en enfoques de filtrado colaborativo. También queríamos mantener nuestros resultados reproducibles en el conjunto de datos publicado. Desafortunadamente, no pudimos publicar todas las funciones. utilizado por nuestro modelo interno. No observamos ninguna mejora con respecto a RP3Beta, aunque el segundo modelo utiliza conocimientos adicionales sobre anuncios de empleo. Por lo tanto, nosotros confirmó que un modelo simple adecuadamente determinado y ajustado podría superar a más Soluciones profundas avanzadas. Esto es consistente con los resultados de Dacrema et al. [64] y Anelli et al. [30], que comparó varios enfoques no neuronales, incluido RP3Beta, con Modelos neuronales más avanzados.

La eficiencia del modelo RP3Beta permite a OLX Jobs entrenarlo desde cero múltiples veces al día con costos muy bajos (en una CPU). El filtrado colaborativo de última generación El modelo en OLX Jobs se utiliza actualmente para generar correos electrónicos y enviar recomendaciones para nuestros usuarios. Recientemente adaptamos este modelo para ofrecer recomendaciones in situ en tiempo real, considerando las interacciones recientes del usuario con elementos [67]. También propusimos que el P3 aprendiera a modelo de rango (P3LTR) [68], una generalización del RP3Beta, donde aprendemos la importancia de relaciones usuario-elemento basadas en tipos de interacciones pasadas usuario-elemento y marcas de tiempo.

En este trabajo, hemos abordado la brecha de investigación de la falta de comparaciones de enfoques clásicos de filtrado colaborativo en el ámbito laboral al proporcionar investigación de laboratorio sobre un conjunto de datos del mundo real y una evaluación en línea con millones de usuarios. Además, hemos hecho públicos el código fuente para la evaluación fuera de línea y el conjunto de datos. disponible. Alentamos a otros investigadores a desarrollar nuevos métodos de recomendación para ayudar a los usuarios a encontrar su trabajo ideal más rápidamente.

Los métodos considerados en este trabajo solo requieren tripletes (usuario, elemento y marca de tiempo) como datos de entrada para capacitación y evaluación; por lo tanto, se pueden aplicar en varios dominios,

Machine Translated by Google

incluso para conjuntos de datos que constan de decenas de millones de interacciones. Esperamos buenos resultados en el dominio de clasificados en base a nuestros resultados iniciales obtenidos en otras categorías de OLX.

7. Resumen

Este artículo ha abordado el tema de las recomendaciones de empleo en anuncios clasificados online, utilizando el ejemplo de OLX Jobs. Realizamos una evaluación exhaustiva de enfoques que representan diferentes familias de métodos de recomendación.

Durante la investigación de laboratorio, demostramos que RP3Beta, SLIM y ALS funcionan significativamente mejor que LightFM y Prod2Vec. También descubrimos que Prod2Vec ofrece la diversidad más extraordinaria, que puede ser necesaria cuando se trabaja en la novedad de las recomendaciones. Además, examinamos cuán similares son las recomendaciones generadas por diferentes modelos.

También realizamos una evaluación enviando millones de mensajes a usuarios en línea. Las pruebas A/B se realizaron utilizando ALS y RP3Beta. Los resultados de estas pruebas demostraron que el envío de recomendaciones laborales generadas por estos modelos aumenta el número de usuarios que contactan con anunciantes de OLX Jobs. Con RP3Beta disponible en el entorno de producción, mejoramos nuestra efectividad en un 20% (teniendo en cuenta las reacciones de los usuarios).

Al evaluar los métodos desde la perspectiva de los anuncios clasificados, un modelo que recomendaba los artículos más populares (aún no vistos) no era adecuado para las recomendaciones de empleo. También se agregó un modelo de recomendación basado en recomendaciones aleatorias para comparar y demostrar la ventaja de los métodos investigados.

Otro resultado importante de esta investigación es el conjunto de datos, que permitirá realizar más investigaciones sobre recomendaciones para necesidades clasificadas.

Una de las debilidades de nuestro trabajo es la falta de comparación con redes neuronales profundas (DNN) o redes neuronales de gráficos (GNN). Para tales métodos, satisfacer nuestras limitaciones de tiempo sin una infraestructura más costosa (por ejemplo, con GPU) es un desafío. Relajar nuestras restricciones o comparar las DNN o GNN más eficientes sería interesante para trabajos futuros. Otra debilidad es que la comparación se realiza solo en un único conjunto de datos. El tamaño del conjunto de datos tiene un impacto significativo en la selección del método. Sería interesante comparar los mismos métodos con conjuntos de datos de diferentes tamaños, ya sean subconjuntos del conjunto de datos original u otros conjuntos de datos del ámbito laboral (por ejemplo, de diferentes mercados en los que opera OLX). Además, sería interesante explorar la correlación entre diversidad y resultados en línea, con el objetivo de desarrollar una métrica fuera de línea que se alinee mejor con los objetivos

Contribuciones de los autores: Conceptualización, RK; metodología, RK y TG; software, RK y VD; validación, RK, VD, TG y AF; análisis formal, RK y TG; investigación, RK y TG; recursos, RK; curación de datos, RK y VD; redacción: preparación del borrador original, RK, AF y TG; redacción: revisión y edición, RK, AF y TG; visualización, RK y TG; supervisión, TG y AF; administración del proyecto, RK Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: Conjunto de datos: https://www.kaggle.com/datasets/olxdatascience/olx-jobs-interactions , consultado el 29 de mayo de 2024; código fuente: https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recomendaciones , consultado el 29 de mayo de 2024.

Conflictos de intereses: Los autores Robert Kwieci ´nski, Agata Filipowska y Viacheslav Dubrov fueron empleados de la empresa OLX Group. El resto del autor declara que la investigación se realizó en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un potencial conflicto de intereses.

Referencias

1. Davis, M. ¿Qué son los clasificados online? Revista Big Easy, 4 de enero de 2021. 2.
Jones, S. Clasificados en línea; Proyecto Pew Internet & American Life: Washington, DC, EE. UU., 2009.
3. Gourville, J.; Soman, D. Exceso de elección y tipo de surtido: cuándo y por qué la variedad fracasa. Marca. Ciencia. 2005, 24, 382–395. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

4. Chernev, A. Cuando más es menos y menos es más: el papel de la disponibilidad y el surtido de puntos ideales en la elección del consumidor. J. Consumir. Res. 2003, 30, 170–183. [Referencia cruzada]
5. Boatwright, P.; Nunes, J. Reducción del surtido: un enfoque basado en atributos. J. Marcos. 2001, 65, 50–63. [Referencia cruzada]
6. Gómez-Uribe, C.; Hunt, N. El sistema de recomendación de Netflix. Transmisión ACM. Gestionar. Inf. Sistema. 2015, 6, 1–19. [Referencia cruzada]
7. Smith, B.; Linden, G. Dos décadas de sistemas de recomendación en Amazon.com. Computación de Internet IEEE. 2017, 21, 12-18. [Referencia cruzada]
8. Aggarwal, CC Recommender Systems: The Textbook, 1ª ed.; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2016. 9. Li, S.; Karahanna, E. Sistemas de recomendación en línea en un contexto de comercio electrónico B2C: una revisión y direcciones futuras. J. Asociación. Inf. Sistema. 2015, 16, 72-107. [Referencia cruzada]
10. Twardowski, B. Modelado de información contextual en sistemas de recomendación conscientes de sesiones con redes neuronales. En Actas de la Décima Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Boston, MA, EE. UU., 15 a 19 de septiembre de 2016; págs. 273–276. [Referencia cruzada]
11. Alotaibi, S. Una encuesta sobre sistemas de recomendación de empleo. En t. J. Física. Ciencia. 2012, 7, 5127–5142. [Referencia cruzada]
12. Abel, F.; Benczúr, A.; Kohlsdorf, D.; Larson, M.; Pálovics, R. RecSys Challenge'16: Actas del Recommender Systems Challenge; Association for Computing Machinery: Nueva York, NY, EE. UU., 2016.
13. Abel, F.; Deldjoo, Y.; Elahi, M.; Kohlsdorf, D. RecSys Challenge'17: Actas del Recommender Systems Challenge 2017; Association for Computing Machinery: Nueva York, NY, EE. UU., 2017.
14. Li, S.; Shi, B.; Yang, J.; Yan, J.; Wang, S.; Chen, F.; Él, Q. Profunda comprensión laboral en LinkedIn. En actas de la 43.ª Conferencia internacional ACM SIGIR sobre investigación y desarrollo en recuperación de información, virtual, 25 a 30 de julio de 2020; págs. 2145-2148. [Referencia cruzada]
15. Zhu, G.; Chen, Y.; Wang, S. Recomendaciones de trabajos y cursos personalizados habilitadas por Graph-Community con datos entre dominios Integración. Sostenibilidad 2022, 14, 7439. [CrossRef]
16. Lacic, E.; Reiter-Haas, M.; Kowald, D.; Reddy Dareddy, M.; Cho, J.; Lex, E. Uso de codificadores automáticos para recomendaciones de trabajos basadas en sesiones. daciones. Modelo de usuario. Adaptación del usuario. Interactuar. 2020, 30, 617–658. [Referencia cruzada]
17. Pazzani, MJ; Billsus, D. Sistemas de recomendación basados en contenido. En La Web Adaptativa: Métodos y Estrategias de la Web Personalización; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2007; págs. 325–341. [Referencia cruzada]
18. Chen, R.; Hua, Q.; Chang, YS; Wang, B.; Zhang, L.; Kong, X. Una encuesta sobre sistemas de recomendación basados en filtrado colaborativo: de métodos tradicionales a métodos híbridos basados en redes sociales. Acceso IEEE 2018, 6, 64301–64320. [Referencia cruzada]
19. Wang, X.; Él, X.; Wang, M.; Feng, F.; Chua, TS Filtrado colaborativo de gráficos neuronales. En Actas de la 42.ª Conferencia Internacional ACM SIGIR sobre Investigación y Desarrollo en Recuperación de Información, París, Francia, 21 a 25 de julio de 2019; págs. 165-174. [Referencia cruzada]
20. Schafer, JB; Frankowski, D.; Herlocker, J.; Sen, S. Sistemas colaborativos de recomendación de filtrado. En La Web Adaptable; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2007; págs. 291–324. [Referencia cruzada]
21. Takács, G.; Pilászy, I.; Nemeth, B.; Tikk, D. Enfoques de filtrado colaborativo escalables para grandes sistemas de recomendación. J. Mach. Aprender. Res. 2009, 10, 623–656. [Referencia cruzada]
22. Jawaheer, G.; Szomszor, M.; Kostkova, P. Comparación de comentarios implícitos y explícitos de un servicio de recomendación de música en línea. En Actas del 1er Taller Internacional sobre Heterogeneidad y Fusión de la Información en Sistemas de Recomendación, Barcelona, España, 26 de septiembre de 2010; págs. 47–51. [Referencia cruzada]
23. Tamm, YM; Damdinov, R.; Vasilev, A. Métricas de calidad en sistemas de recomendación: ¿calculamos métricas de forma coherente? En Actas de la Decimoquinta Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Ámsterdam, Países Bajos, 27 de septiembre a 1 de octubre de 2021; págs. 708–713. [Referencia cruzada]
24. Kaminskas, M.; Bridge, D. Diversidad, casualidad, novedad y cobertura: una encuesta y análisis empírico de objetivos más allá de la precisión en sistemas de recomendación. Transmisión ACM. Interactuar. Intel. Sistema. 2016, 7, 1–42. [Referencia cruzada]
25. Kunaver, M.; Pozrl, T. Diversidad en sistemas de recomendación, una encuesta. Sistema basado en el conocimiento. 2017, 123, 154-162. [Referencia cruzada]
26. Ge, M.; Delgado-Battenfeld, C.; Jannach, D. Más allá de la precisión: evaluación de los sistemas de recomendación por cobertura y casualidad. En Actas de la Cuarta Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Barcelona, España, 26 a 30 de septiembre de 2010; págs. 257–260. [Referencia cruzada]
27. Mogenet, A.; Pham, bronceado; Kazama, M.; Kong, J. Predicción del rendimiento en línea de los sistemas de recomendación de empleo con evaluación fuera de línea. En Actas de la 13.ª Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Copenhague, Dinamarca, 16 a 20 de septiembre de 2019; págs. 477–480. [Referencia cruzada]
28. Anelli, VW; Bellogín, A.; Di Noia, T.; Jannach, D.; Pomo, C. Algoritmos de recomendación Top-N: una búsqueda de lo último en tecnología. En actas de la 30.ª Conferencia ACM sobre modelado, adaptación y personalización de usuarios, Barcelona, España, 4 a 7 de julio de 2022; págs. 121-131. [Referencia cruzada]
29. Dacrema, MF; Boglio, S.; Cremonesi, P.; Jannach, D. Un análisis inquietante de la reproducibilidad y el progreso del recomendador Investigación de sistemas. Transmisión ACM. Inf. Sistema. 2021, 39, 1–49. [Referencia cruzada]
30. Anelli, VW; Bellogín, A.; Di Noia, T.; Pomo, C. Reimaginando la comparación entre el filtrado colaborativo neuronal y la factorización matricial. En Actas de la Decimoquinta Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Ámsterdam, Países Bajos, 27 de septiembre a 1 de octubre de 2021; págs. 521–529. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

31. Zhu, J.; Dai, Q.; Su, L.; Mar.; Liu, J.; Cai, G.; Xiao, X.; Zhang, R. BARS: Hacia una evaluación comparativa abierta para sistemas de recomendación. En actas de la 45.ª Conferencia Internacional ACM SIGIR sobre Investigación y Desarrollo en Recuperación de Información, Madrid, España, 11 a 15 de julio de 2022; págs. 2912-2923. [Referencia cruzada]
32. Dong, Y.; Li, J.; Schnabel, T. Cuando lo nuevo no es mejor: ¿El aprendizaje profundo realmente se beneficia de la recomendación de la retroalimentación implícita? En actas de la 46.ª Conferencia Internacional ACM SIGIR sobre Investigación y Desarrollo en Recuperación de Información, Taipei, Taiwán, 23 a 27 de julio de 2023; págs. 942–952. [Referencia cruzada]
33. Anelli, VW; Malitesta, D.; Pomo, C.; Bellogin, A.; Di Sciascio, E.; Di Noia, T. Desafiando el mito del filtrado colaborativo de gráficos: un análisis razonado y basado en la reproducibilidad. En actas de la 17.ª Conferencia ACM sobre sistemas de recomendación, Singapur, 18 a 22 de septiembre de 2023; págs. 350–361. [Referencia cruzada]
34. Koren, Y.; Bell, R.; Volinsky, C. Técnicas de factorización matricial para sistemas de recomendación. Computadora 2009, 42, 30–37. [Referencia cruzada]
35. Kula, M. Incorporaciones de metadatos para recomendaciones de arranque en frío de usuarios y elementos. arXiv 2015, arXiv:1507.08439.
36. Rendle, S.; Freudenthaler, C.; Gantner, Z.; Schmidt-Thieme, L. BPR: Clasificación personalizada bayesiana a partir de comentarios implícitos. arXiv 2012, arXiv:1205.2618 37. Weston, J.; Bengio, S.; Usunier, N.
Wsabie: Ampliación a anotación de imágenes de vocabulario amplio. En Actas de la Vigésima Segunda Conferencia Internacional Conjunta sobre Inteligencia Artificial, Barcelona, España, 16 a 22 de julio de 2011; págs. 2764–2770.
38. Weston, J.; Sí, H.; Weiss, RJ Aprendiendo a clasificar las recomendaciones con la estadística de pérdida de orden K. En Actas de la Séptima Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Hong Kong, China, 12 a 16 de octubre de 2013; págs. 245–248. [Referencia cruzada]
39. Hu, Y.; Koren, Y.; Volinsky, C. Filtrado colaborativo para conjuntos de datos de retroalimentación implícita. En actas del octavo IEEE de 2008 Conferencia internacional sobre minería de datos, Pisa (Italia), 15 a 19 de diciembre de 2008; págs. 263–272. [Referencia cruzada]
40. Takács, G.; Pilászy, I.; Tikk, D. Aplicaciones del método de gradiente conjugado para el filtrado colaborativo de retroalimentación implícita. En Actas de la Quinta Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Chicago, IL, EE. UU., 23 a 27 de octubre de 2011; págs. 297–300. [Referencia cruzada]
41. Ning, X.; Karypis, G. SLIM: Métodos lineales dispersos para sistemas de recomendación Top-N. En Actas de la 11.ª Conferencia Internacional sobre Minería de Datos del IEEE de 2011, Vancouver, BC, Canadá, 11 a 14 de diciembre de 2011; págs. 497–506. [Referencia cruzada]
42. Christoffel, F.; Paudel, B.; Newell, C.; Bernstein, A. Blockbusters y Wallflowers: recomendaciones precisas, diversas y escalables con paseos aleatorios. En Actas de la 9ª Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Viena, Austria, 16 a 20 de septiembre de 2015; págs. 163-170. [Referencia cruzada]
43. Cooper, C.; Lee, SH; Radzik, T.; Siantos, Y. Paseos aleatorios en sistemas de recomendación: cálculos exactos y simulaciones. En Actas de la 23.ª Conferencia Internacional sobre la World Wide Web, Nueva York, NY, EE. UU., 7 a 11 de abril de 2014; págs. 811–816. [Referencia cruzada]
44. Grbovic, M.; Radosavljevic, V.; Djuric, N.; Bhamidipati, N.; Savla, J.; Bhagwan, V.; Sharp, D. Comercio electrónico en su bandeja de entrada: recomendaciones de productos a escala. En Actas de la 21ª Conferencia Internacional ACM SIGKDD sobre Descubrimiento de Conocimiento y Minería de Datos, Sydney, NSW, Australia, 10 a 13 de agosto de 2015; págs. 1809–1818. [Referencia cruzada]
45. Barkan, O.; Koenigstein, N. ITEM2VEC: Incrustación de elementos neuronales para filtrado colaborativo. En actas del 26.º taller internacional del IEEE de 2016 sobre aprendizaje automático para el procesamiento de señales (MLSP), Vietri sul Mare, Italia, 13 a 16 de septiembre de 2016; págs. 1–6. [Referencia cruzada]
46. Mikolov, T.; Sutskever, I.; Chen, K.; Corrado, G.; Dean, J. Representaciones distribuidas de palabras y frases y su composicionalidad. En Actas de la 26.ª Conferencia Internacional sobre Sistemas de Procesamiento de Información Neural: Volumen 2, Red Hook, Nueva York, EE. UU., 5 a 10 de diciembre de 2013; págs. 3111–3119.
47. De Ruijt, C.; Bhulai, S. Sistemas de recomendación de empleo: una revisión. arXiv 2021, arXiv:2111.13576.
48. Kula, M. LightFM: Repositorio Github. 2023. Disponible en línea: https://github.com/lyst/lightfm (consultado el 29 de mayo de 2024).
49. Frederickson, B. ALS—Repositorio Github. 2022. Disponible en línea: https://github.com/benfred/implicit/blob/main/implicit/als.py (consultado el 29 de mayo de 2024).
50. Levy, M.; Grisel, O. SLIM: Repositorio Github. 2014. Disponible en línea: https://github.com/Mendeley/mrec/blob/master/ mrec/item_similarity/slim.py (consultado el 29 de mayo de 2024).
51. Quadrana, M. SLIM—Repositorio Github. 2021. Disponible en línea: https://github.com/MaurizioFD/RecSys2019_DeepLearning_ Evaluación/blob/master/SLIM_ElasticNet/SLIMElasticNetRecommender.py (consultado el 29 de mayo de 2024).
52. Bernardis, C. RP3Beta—Repositorio Github. 2021. Disponible en línea: https://github.com/MaurizioFD/RecSys2019_DeepLearning_ Evaluación/blob/master/GraphBased/RP3betaRecommender.py (consultado el 29 de mayo de 2024).
53. Paudel, B.; Christoffel, F.; Newell, C.; Bernstein, A. Recomendaciones actualizables, precisas, diversas y escalables para aplicaciones interactivas Aplicaciones. Transmisión ACM. Interactuar. Intel. Sistema. 2016, 7, 1–34. [Referencia cruzada]
54. Reh ˚u˘rek, R.; Sojka, P. Marco de software para modelado de temas con grandes corporaciones. En actas del taller LREC 2010 sobre nuevos desafíos para los marcos de PNL, La Valeta, Malta, 22 de mayo de 2010; págs. 45–50, ISBN 2-9517408-6-7. Disponible en línea: http://is.muni.cz/publication/884893/en (consultado el 29 de mayo de 2012).
55. Meng, Z.; McCreadie, R.; Macdonald, C.; Ounis, I. Exploración de estrategias de división de datos para la evaluación de modelos de recomendación. En actas de la 14.ª Conferencia ACM sobre sistemas de recomendación, virtual, 22 a 26 de septiembre de 2020; págs. 681–686. [Referencia cruzada]
56. Shani, G.; Gunawardana, A., Evaluación de sistemas de recomendación. En Manual de sistemas de recomendación; Springer: Boston, MA, EE.UU., 2011; págs. 257–297. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

57. Friedman, M. El uso de rangos para evitar el supuesto de normalidad implícito en el análisis de varianza. Mermelada. Estadística. Asociación 1937, 32, 675–701. [Referencia cruzada]
58. Friedman, M. Comparación de pruebas de significancia alternativas para el problema de las clasificaciones. Ana. Matemáticas. Estadística. 1940, 11, 86–92. [Referencia cruzada]
59. Imán, RL; Davenport, JM Aproximaciones de la región crítica del estadístico de Friedman. Comunitario. Métodos de teoría estadística 1980, 9, 571–595. [Referencia cruzada]
60. García, S.; Herrera, F. Una extensión sobre “Comparaciones estadísticas de clasificadores en múltiples conjuntos de datos” para todas las comparaciones por pares. J. Mach. Aprender. Res. 2008, 9, 2677–2694.
61. García, S.; Fernández, A.; Luengo, J.; Herrera, F. Pruebas No Paramétricas Avanzadas para Comparaciones Múltiples en el Diseño de Experimentos en Inteligencia Computacional y Minería de Datos: Análisis Experimental de Potencia. Inf. Ciencia. 2010, 180, 2044–2064. [Referencia cruzada]
62. Demšar, J. Comparaciones estadísticas de clasificadores sobre múltiples conjuntos de datos. J. Mach. Aprender. Res. 2006, 7, 1–30.
63. Nemenyi, P. Comparaciones múltiples sin distribución. Doctor. Tesis, Universidad de Princeton, Princeton, Nueva Jersey, EE. UU., 1963.
64. Dacrema, MF; Cremonesi, P.; Jannach, D. ¿Realmente estamos avanzando mucho? Un análisis preocupante de los enfoques recientes de recomendación neuronal. En Actas de la 13.ª Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Copenhague, Dinamarca, 16 a 20 de septiembre de 2019; págs. 101-109. [Referencia cruzada]
65. Wilcoxon, F. Comparaciones individuales mediante métodos de clasificación. Bioma. Toro. 1945, 1, 80–83. [Referencia cruzada]
66. Vijaymeena, M.; Kavitha, K. Una encuesta sobre medidas de similitud en la minería de textos. Mach. Aprender. Aplica. En t. J. 2016, 3, 19-28. [Referencia cruzada]
67. Kwieci 'nski, R.; Melniczak, G.; Górecki, T. Comparación de recomendaciones de trabajos por lotes y en tiempo real. Acceso IEEE 2023, 11, 20553–20559. [Referencia cruzada]
68. Kwieci'nski, R.; Górecki, T.; Filipowska, A. La importancia del aprendizaje en las recomendaciones basadas en gráficos bipartitos. En Actas de la 17.ª Conferencia sobre Ciencias de la Computación y Sistemas de Inteligencia (FedCSIS) de 2022, Sofía (Bulgaria), 4 a 7 de septiembre de 2022; págs. 227-233. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Reducción eficiente de la dimensionalidad de la señal de voz mediante Técnicas de valor complejo

Sungkyun Ko [1] y Parque Minho 2,*

[1] Departamento de Convergencia de TI de IA, Universidad Soongsil, Seúl 06978, República de Corea;
[2] kosungkyun@naver.com Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad Soongsil, Seúl 06978, República de Corea
* Correspondencia: mhp@ssu.ac.kr

Resumen: En este estudio, proponemos el algoritmo CVMFCC-DR (Reducción de Dimensionalidad de Coeficientes Cepstrales de Frecuencia Mel de Valor Complejo) como un método eficiente para reducir la dimensionalidad de las señales de voz. Al utilizar la técnica MFCC de valores complejos, que considera componentes tanto reales como imaginarios, nuestro algoritmo permite la reducción de dimensionalidad sin pérdida de información y al mismo tiempo reduce los costos computacionales. La eficacia del algoritmo propuesto se valida mediante experimentos que demuestran su eficacia en la construcción de un modelo de reconocimiento de voz utilizando una red neuronal de valores complejos. Además, se introduce un método de interpretación softmax de valores complejos para números complejos. Los resultados experimentales indican que el enfoque produce un rendimiento mejorado en comparación con las técnicas tradicionales basadas en MFCC, destacando así su potencial en el campo del reconocimiento de voz.

Palabras clave: coeficientes cepstrales de frecuencia mel; corrección de errores de redes neuronales de valor complejo; propagación hacia atrás; softmax de valores complejos

check for updates

Cita: Ko, S.; Park, M. Reducción eficiente de la dimensionalidad de la señal del habla mediante técnicas de valores complejos. Electrónica 2024, 13, 3046. https://doi.org/10.3390/electrónica13153046

Editores académicos: Xin Geng, Padma Iyenghar y Elke Pulvermüller

Recibido: 3 de junio de 2024
Revisado: 31 de julio de 2024
Aceptado: 31 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Hoy en día, el procesamiento y el reconocimiento de señales de voz desempeñan papeles cruciales en diversos dominios de aplicación. Estas tecnologías se utilizan para diversos fines, como convertir comandos de voz en texto o identificar al propietario de una voz. El avance de la tecnología de reconocimiento de voz puede mejorar la interacción hombre-máquina, mejorando así la productividad y la eficiencia en diversas industrias. Sin embargo, las señales del habla poseen formas muy diversas y características de alta dimensión, lo que hace que el procesamiento y el reconocimiento efectivos sean un desafío persistente. La diversidad y la alta dimensionalidad de las señales de voz dificultan la reducción de la dimensionalidad y el reconocimiento de patrones, lo que genera mayores costos computacionales. Por lo tanto, reducir de manera eficiente la dimensionalidad de las señales de voz y mejorar el rendimiento de los modelos de reconocimiento de voz basados en redes neuronales es un desafío importante.

Las tecnologías de procesamiento y reconocimiento de voz son esenciales en diversas aplicaciones, como interfaces de voz, asistentes virtuales y traducción automática. Lograr resultados de reconocimiento y procesamiento de señales de voz más precisos y eficientes puede mejorar significativamente la experiencia del usuario de los servicios relacionados. En consecuencia, se llevan a cabo investigaciones continuas en el campo del procesamiento y reconocimiento de señales de voz. Las señales de voz exhiben características de alta dimensión, lo que dificulta la reducción efectiva de la dimensi Además, el reconocimiento preciso de diversos patrones de habla requiere modelos complejos de redes neuronales, lo que, a su vez, aumenta los costos computacionales [1]. Por lo tanto, reducir efectivamente la dimensionalidad de las señales de voz sin pérdida de información y al mismo tiempo mejorar la precisión y eficiencia de los modelos de reconocimiento de voz basados en redes neuronales es una tarea crucial.

A pesar de la rica literatura sobre redes de valores complejos, ha habido pocos ejemplos de su aplicación en el procesamiento de audio o voz. Dado que el sistema auditivo humano

Machine Translated by Google

procesa el sonido en el dominio de la frecuencia, también tiene sentido explorar redes neuronales de valor complejo para el procesamiento de audio en lugar de depender únicamente de redes neuronales de valor real en el dominio del tiempo [2].

Investigaciones recientes han logrado avances significativos en el reconocimiento de voz al combinar métodos tradicionales como los coeficientes cepstrales de frecuencia de fusión (MFCC) con redes neuronales [3]. Si bien la técnica MFCC se ha utilizado ampliamente para la extracción de características del habla, tiene el inconveniente de no poder realizar una reducción de dimensionalidad sin pérdidas, ya que sólo utiliza valores reales. En otras palabras, reducir la cantidad de MFCC conduce a la pérdida de información, lo que disminuye la precisión del reconocimiento de voz. Estos métodos todavía muestran una eficacia limitada y son necesarios enfoques mejorados más allá de los métodos de aprendizaje tradicionales.

La utilización de la representación compleja de MFCC permite la consideración de partes tanto reales como imaginarias, lo que permite una reducción de dimensionalidad sin pérdidas. Además, el empleo de redes neuronales de valores complejos puede reflejar cambios de fase mediante operaciones de multiplicación complejas [4], representando mejor las características de las señales de voz. Se espera que este enfoque permita una reducción de dimensionalidad y un reconocimiento de voz basado en redes neuronales más eficientes en comparación con los métodos existentes.

En este estudio, proponemos el algoritmo CVMFCC-DR para una reducción de dimensionalidad de la señal de voz eficiente y sin pérdidas. Al combinar CVMFCC-DR con redes neuronales de valores complejos, esta técnica puede demostrar un rendimiento de reconocimiento de voz superior en comparación con los métodos existentes.

Las principales aportaciones de este estudio son las siguientes:

- Proponer una técnica eficiente de reducción de dimensionalidad (CVMFCC-DR) utilizando la representación compleja de MFCC.
- Mejorar el rendimiento del reconocimiento de voz mediante la combinación de MFCC de valores complejos y redes neuronales de valores complejos.
- Proponer un nuevo método de interpretación para una función softmax de valores complejos con entradas complejas.

Este artículo comienza presentando la técnica MFCC existente y las redes neuronales de valores complejos. Luego proporciona una explicación detallada del algoritmo CVMFCC-DR propuesto y el método de aprendizaje para redes neuronales de valores complejos [5]. Posteriormente, se valida experimentalmente la efectividad del método propuesto y se analizan los resultados. Finalmente, el artículo concluye con un resumen de los hallazgos del estudio y sugiere direcciones para futuras investigaciones.

2. Trabajos relacionados

En el campo del reconocimiento de voz, se utilizan varios enfoques y técnicas basados en redes neuronales . Se utilizan diferentes tipos de redes neuronales, como CNN, RNN, LSTM y DNN, cada una con sus propias ventajas y desventajas [3]. Además, también se están investigando modelos híbridos que combinen métodos tradicionales con estructuras de redes neuronales . Los modelos híbridos pueden optimizar el rendimiento combinando las fortalezas de cada estructura, pero también tienen el inconveniente de una mayor complejidad en la implementación e interpretación [6].

En medio de estos desarrollos, las técnicas tradicionales de extracción de características, como la técnica MFCC, todavía se utilizan ampliamente como entradas para redes neuronales [3]. Además, la exploración de arquitecturas neuronales novedosas, como las redes neuronales de valores complejos, podría descubrir nuevas perspectivas y posibles avances en las capacidades de reconocimiento de voz. Recientemente, se han realizado estudios que muestran que los FPGA se pueden utilizar para mejorar significativamente la velocidad de cálculo de números complejos [7]. Los resultados de esta investigación demuestran empíricamente que la implementación de hardware de operaciones con números complejos puede generar mejoras prácticas en el rendimiento. Además, un estudio reciente implementó redes neuronales de valor complejo en FPGA para clasificación, lo que demuestra una precisión superior en comparación con las redes neuronales de valor real y logra mejoras significativas en la velocidad con respecto a los sistemas basados en CPU [8]. Esto da lugar a la expectativa de que en el futuro, las CPU que actualmente solo admiten operaciones con números reales algún día puedan admitir también operaciones con n

Machine Translated by Google

Según estos estudios, la utilización de representaciones de números complejos permite codificar pares de números reales como números complejos únicos, lo que reduce efectivamente la dimensión de entrada a la mitad. Esta reducción de dimensionalidad disminuye la cantidad de parámetros del modelo y mejora la eficiencia computacional. En consecuencia, la evidencia experimental muestra que las redes neuronales de valores complejos pueden lograr un rendimiento igual o superior con menos parámetros en comparación con las redes neuronales convencionales de valor real.

A medida que la investigación continúa superando los límites, una combinación sinérgica de métodos probados y enfoques innovadores puede allanar el camino para la próxima generación de sistemas de reconocimiento de voz robustos y de alto rendimiento.

3. Conocimientos previos

Se están realizando varios estudios en el campo del reconocimiento y clasificación del habla, y en esta sección presentamos los MFCC (coeficientes cepstrales de frecuencia de fusión) [3]. La técnica MFCC es uno de los métodos de extracción de características comúnmente utilizados en los campos del procesamiento de señales de voz y el reconocimiento de voz. La técnica MFCC representa las características de frecuencia de las señales de voz y se utiliza principalmente para representar y reconocer señales de voz de forma eficaz. El principio básico de la técnica MFCC se ilustra en la Figura 1.

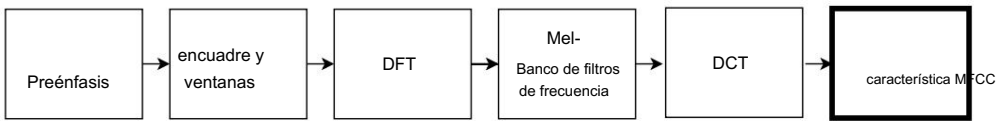


Figura 1. Una visión general del proceso de la técnica MFCC.

Preénfasis: el preénfasis es esencialmente un filtro de paso alto. Debido a la estructura del cuerpo humano, los componentes de alta frecuencia tienden a disminuir en el sonido emitido durante la producción del habla. Por lo tanto, el preénfasis es el proceso de aplicar un filtro de paso alto para amplificar primero los componentes atenuados de alta frecuencia.

Encuadre y ventanas: las señales de voz se dividen en segmentos cortos llamados marcos para su análisis. Esto se debe a que las características del habla permanecen relativamente estables durante períodos breves. Estos cuadros se superponen ligeramente para capturar los cambios del habla de manera más efectiva. Cada fotograma se procesa mediante una técnica de ventana, que mejora el análisis. Los tipos de ventanas comunes incluyen las ventanas Hamming y Hanning. Este método de encuadre permite un análisis más preciso de datos de voz complejos, lo cual es crucial para desarrollar tecnologías de síntesis y reconocimiento de voz. Si bien los detalles de implementación específicos pueden variar, estos principios fundamentales se utilizan ampliamente en los sistemas de procesamiento del habla.

Transformada de Fourier discreta: para calcular el espectro de potencia, se utiliza DFT (Transformada de Fourier discreta) para calcular el espectro de potencia para cada cuadro obtenido anteriormente. Este proceso permite discernir la distribución de energía específica de la frecuencia de la señal de voz en cada cuadro.

Banco de filtros Mel-Frequency: El filtro de paso de banda mel es un conjunto de filtros diseñados para extraer señales de voz de forma no lineal, imitando el sistema auditivo humano.
Normalmente construido con 40 filtros triangulares, analiza las características de frecuencia de las señales de voz.

Transformada de coseno discreta: DCT (Transformada de coseno discreta) expresa una secuencia finita de puntos de datos como una suma de funciones coseno que oscilan a diferentes frecuencias. En el proceso MFCC, se aplica DCT al banco de filtros mel para seleccionar coeficientes de aceleración o para separar la relación en magnitudes logarítmicas espectrales del banco de filtros.

El reconocimiento de voz utilizando MFCC se puede emplear eficazmente en diversos entornos [9], y este método puede lograr una alta precisión cuando se combina con modelos de aprendizaje profundo. Por lo tanto, MFCC sirve como un insumo crucial para los modelos de aprendizaje profundo para el reconocimiento de voz [10].

Machine Translated by Google

4. Método propuesto En

esta sección, proponemos un método para realizar eficientemente la reducción de la dimensionalidad de la señal de voz utilizando MFCC de valores complejos y redes neuronales de valores complej En la Figura 2 se presenta una descripción general del enfoque propuesto. Esta figura ilustra el enfoque propuesto para la clasificación de voz utilizando redes neuronales de valores complejos. El proceso comienza con la entrada de voz, seguida de la extracción de características utilizando coeficientes cepstrales de frecuencia de fusión (MFCC). Luego, estas características se someten a una reducción de dimensionalidad y se transforman en representaciones de valores complejos, lo que da como resultado MFCC de valores complejos. Las características procesadas se introducen posteriormente en una red neuronal de valores complejos. El rendimiento de la red se mejora mediante la selección de funciones de activación y algoritmos de aprendizaje apropiados. En última instancia, la salida de la red neuronal se utiliza con fines de clasificación.

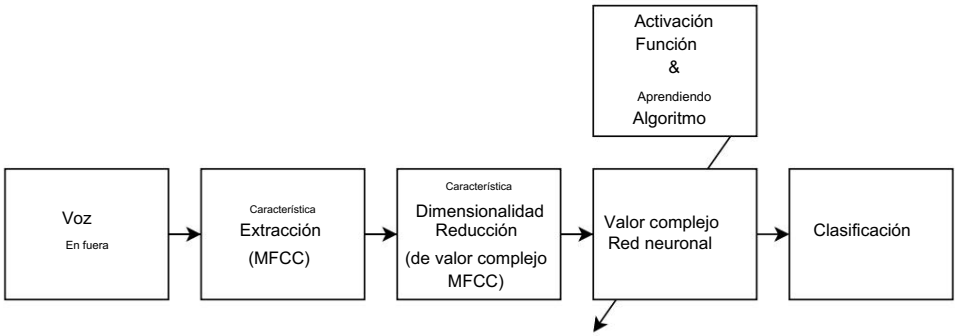


Figura 2. Descripción general del enfoque propuesto.

MFCC de valores complejos: la cantidad de MFCC utilizados en el reconocimiento de voz puede variar según las aplicaciones y modelos específicos. Sin embargo, normalmente se utilizan MFCC que oscilan entre 13 y 40. Se sabe que esta gama funciona eficazmente en varios sistemas de reconocimiento de voz. Generalmente, una mayor cantidad de MFCC puede permitir que el modelo capture más frecuencia y detalles espectrales, pero también aumenta el costo computacional del moc Por lo tanto, el número seleccionado de MFCC se determina considerando un equilibrio entre la eficiencia computacional y el rendimiento del modelo.

Al representar problemas físicos utilizando números complejos, existen dos métodos principales. Uno es un método de sustitución simple y el otro es un enfoque más elegante conocido como equivalencia matemática, como la Transformada de Fourier. La sustitución toma dos parámetros físicos reales y coloca uno en la parte real del número complejo y otro en la parte imaginaria. Esto permite manipular los dos valores como una sola entidad, es decir, un único número complejo [11]. El método propuesto para la reducción de dimensionalidad en este artículo implica convertir n valores de MFCC en números complejos. El primer MFCC se utiliza como parte real y el segundo MFCC se utiliza como parte imaginaria del número complejo.
Posteriormente, cada MFCC alterna entre ser la parte real y la imaginaria dentro del número complejo. Este patrón continúa hasta el enésimo MFCC, lo que da como resultado n/2 números complejos. Por ejemplo, cuando tenemos n valores de MFCC, podrían ser los siguientes:

$$[x1, x2, x3, x4, \ldots, xn-1, xn]$$

En este caso, el primer MFCC x1 se utiliza como parte real del primer número complejo. El segundo MFCC x2 se utiliza como parte imaginaria del primer número complejo. El tercer MFCC x3 se utiliza como parte real del segundo número complejo. El cuarto MFCC x4 se utiliza como parte imaginaria del segundo número complejo. Este patrón continúa alternando entre partes reales e imaginarias hasta el enésimo MFCC xn, que se convierte en la parte imaginaria del (n/2)-ésimo número complejo. Por lo tanto, con n valores de MFCC, se generan n/2 números complejos. El primer número complejo es x1 + jx2, el segundo complejo

Machine Translated by Google

El número es x3 + jx4, y así sucesivamente hasta el último número complejo, que es xn−1 + jxn. Hemos ilustrado esta explicación en la Figura 3.

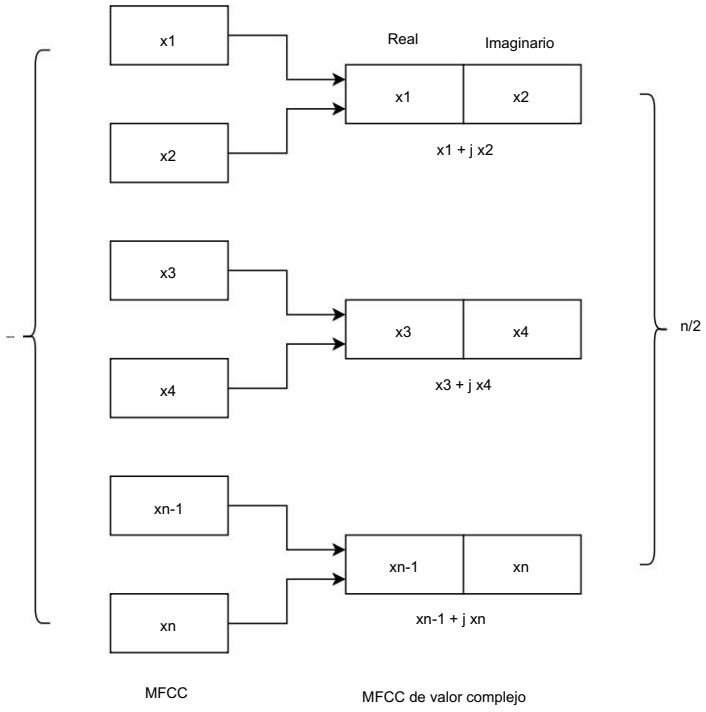


Figura 3. Proceso de generación de MFCC de valor complejo.

Red neuronal de valores complejos: las redes neuronales de valores complejos son modelos de redes neuronales que utilizan números complejos como valores de entrada o pesos, y tienen la ventaja de manejar información más rica en comparación con las redes neuronales de valores reales. Además , se han llevado a cabo diversos estudios de investigación en diversos campos y se están utilizando eficazmente métodos de reducción de dimensionalidad de valores complejos o clasificación y detección utilizando números complejos. Para ello se realiza la multiplicación de entradas complejas y pesos complejos, lo que implica rotación en el plano complejo y por tanto introduce cambios de fase [5]. La suma de la multiplicación de la entrada X y el peso W se puede representar como las ecuaciones (1) y (2).

$$Z = W0 + W1X1 + W2X2 + \ldots + WnXn \tag{1}$$

$$Z = \sum n\ Wn \cdot Xn \tag{2}$$

Función de activación y algoritmo de aprendizaje: en redes neuronales de valores complejos, se utiliza una función de activación dependiente de la fase, lo que obliga a normalizar la información de magnitud a un círculo unitario de 1 y solo la extracción de la información de fase, como se muestra en la Ecuación (3).

$$P(Z) = \frac{z}{|Z|} = mi^{j \cdot \arg(Z)} \tag{3}$$

El algoritmo de aprendizaje de redes neuronales de valores complejos es el siguiente. Cuando hay un objetivo deseado t y un valor de salida z, como se muestra en la Figura 4, los pesos se ajustan de acuerdo con la Ecuación (4) para moverse gradualmente en la dirección del objetivo deseado [12].

Machine Translated by Google

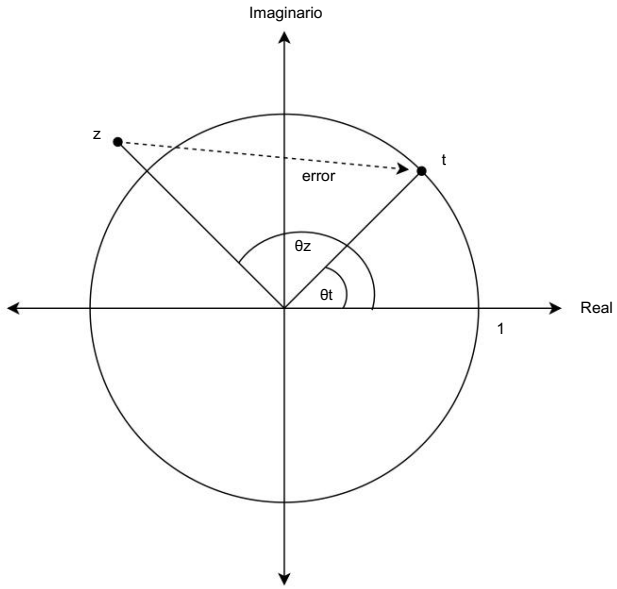


Figura 4. Algoritmo de aprendizaje para CVNN.

$$t = \sum n\ (Wn + \Delta Wn)\cdot Xn \tag{4}$$

El error con respecto al objetivo de entrenamiento t es e = t − z , como se muestra en la Ecuación (5).

$$e = \sum n\ (Wn + \Delta Wn)\cdot Xn - \sum n\ (Wn)\cdot Xn = \sum n\ (\Delta Wn)\cdot Xn \tag{5}$$

Para simplificar y acelerar el cálculo del error con respecto a los cambios de peso, suponiendo que cada nodo contribuye igualmente al error, el símbolo de suma σ se elimina de la ecuación y ambos lados se dividen por el número de nodos contribuyentes N en el complejo. Red neuronal valorada para conveniencia computacional. La ecuación resultante es la ecuación (6).

$$\Delta Wn \cdot Xn = \frac{mi}{norte} \tag{6}$$

Para obtener ΔWn y cambiar los pesos, multiplicar ambos lados de la ecuación (6) por se convierte en Xn cuando se X_{n}^{-1}. X_{norte}^{-1} multiplica por el conjugado complejo Xn, siendo n tanto el numerador como el denominador; por lo tanto, $X_{norte}^{-1} = \frac{\overline{Xn}}{|Xn|^2}$, donde |Xn| = 1 para Xn dentro de la unidad círculo. Por lo tanto, $X_{norte}^{-1} = \overline{Xn}$, y la ecuación (6) se deriva nuevamente como las ecuaciones (7) y (8).

$$\Delta Wn \cdot Xn \cdot X_{norte}^{-1} = \frac{mi}{norte} \cdot X_{norte}^{-1} = \frac{mi}{norte} \cdot \overline{Xn} \tag{7}$$

$$\Delta Wn = \frac{mi}{norte} \cdot \overline{Xn} \tag{8}$$

De esta forma, el cambio de pesos obtenido se puede observar en la Ecuación (8). Este cambio representa el ajuste de pesos complejos para cada nodo que contribuye al error con respecto al objetivo de entrenamiento y se aplica de manera uniforme en toda la red.

A través de este proceso, las redes neuronales de valores complejos se ajustan más cerca del objetivo utilizando funciones de activación dependientes de la fase y algoritmos de aprendizaje eficientes mientras manejan información rica a través de complejas operaciones de multiplicación entre entradas y pesos [13].

Propagación hacia atrás de dominio complejo: cuando se utilizan capas ocultas, el error de la capa de salida se propaga hacia atrás a las capas ocultas para calcular cuánto mide cada nodo.

Machine Translated by Google

en las capas ocultas contribuyó a ese error. En base a esto, los pesos entre las capas oculta y de salida deben ajustarse adecuadamente. Este proceso se denomina retropropagación de errores, mediante el cual la red neuronal puede ajustar los pesos para minimizar el error en los valores de salida durante el aprendizaje. La estructura de una red neuronal de valores complejos multicapa se ilustra en la Figura 5.

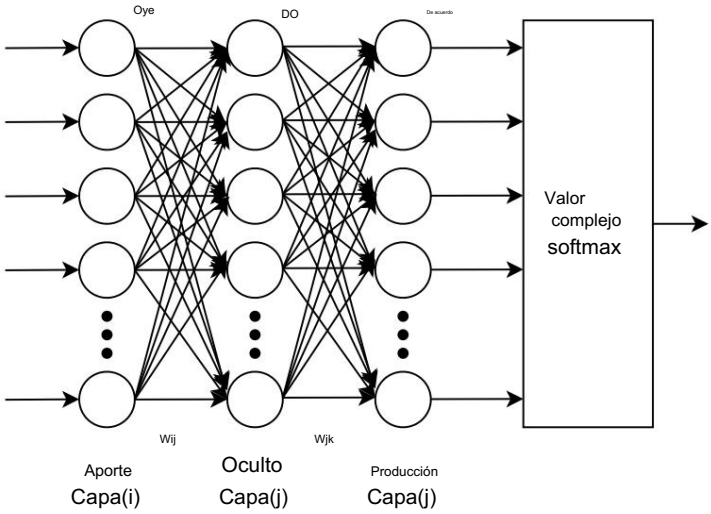


Figura 5. CVNN multicapa.

En este artículo, se utiliza un método de corrección de errores para que la capa de salida k actualice los pesos, mientras que se emplea un método de retropropagación de errores para la capa oculta j para examinar su influencia en la salida. En otras palabras, la capa de salida k utiliza el método de corrección de errores para evitar caer en mínimos locales, mientras que el método de retropropagación de errores se aplica a la capa oculta j para garantizar una mejor distribución de los errores desde la capa de salida a la capa oculta. Se puede esperar que esta combinación de retropropagación de errores en la capa oculta y corrección de errores en la capa de salida mejore el problema de que toda la red neuronal se atasque en mínimos locales y al mismo tiempo permita una converger
El método de retropropagación de errores para redes neuronales de valores complejos es el siguiente.

Cuando se utiliza el descenso de gradiente para actualizaciones de peso en redes neuronales de valores complejos, se emplea el cálculo de Wirtinger para diferenciar funciones complejas. Como las funciones complejas comprenden partes reales e imaginarias, el cálculo de Wirtinger realiza la diferenciación por separado para las partes reales e imaginarias. Para un número complejo z = x + jy definido con partes reales e imaginarias x e y, respectivamente, y una función compleja f(z) = u(x, y) + jv(x, y), las derivadas de Wirtinger se definen como sigue [14].

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial x} - j\frac{\partial f}{\partial y}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + j\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right) \tag{9}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial f}{\partial x} + j\frac{\partial f}{\partial y}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} + j\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right) \tag{10}$$

$$df = \frac{\partial f}{\partial z}dz + \frac{\partial f}{\partial \bar{z}}d\bar{z} \tag{11}$$

En este contexto, $\bar{z}$ denota el conjugado complejo de z. En el método de la derivada de Wirtinger, las funciones complejas se pueden tratar como extensiones de funciones reales dividiéndolas en partes reales e imaginarias para su diferenciación. A continuación se describe el proceso de actualización de variables complejas utilizando el tamaño de paso α/2 y la función de pérdida L.

Machine Translated by Google

$$xn+1 = xn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x} \tag{12}$$

$$yn+1 = yn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial y} \tag{13}$$

Sustituyendo zn+1 = xn+1 + j yn+1 en las ecuaciones (12) y (13) y luego sustituyendo la derivada de Wirtinger al final del proceso de derivación, queda como sigue.

$$zn+1 = xn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x} + j\, yn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial y}$$

$$= xn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x} + jyn - j\frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial y}$$

$$= xn + jyn - \frac{\alpha}{2}\frac{\partial L}{\partial x}\frac{\partial L}{\partial y} + j\frac{\partial L}{\partial x}$$

$$1 = zn - \alpha\frac{\partial L}{\partial x}\frac{\partial L}{\partial y} + j\frac{\partial L}{\partial x}$$

$$= zn - \alpha\frac{\partial L}{\partial z} \tag{14}$$

La derivada parcial de L con respecto al conjugado complejo como Derivada Conjugada $\frac{\partial L}{\partial \bar{z}}$ se refiere de Wirtinger. Esto demuestra cómo se puede utilizar la derivada conjugada de Wirtinger para simplificar la fórmula de actualización de variables complejas. En términos de utilizar el método anterior, reescribir la ecuación (5) como un error de la capa de salida produce la ecuación (15), donde tk representa el valor objetivo y ok representa el valor de salida real de la capa de salida k.

$$ek = tk - ok \tag{15}$$

Y la función de pérdida se define como la ecuación (16).

$$L = mi\,\frac{2}{k} = |tk - bien|\overline{|tk - bien|} \tag{dieciséis}$$

Si los pesos son grandes, es más probable que el error se propague a las capas ocultas. El error de capa oculta ej se puede expresar mediante la siguiente ecuación.

$$ej = peso_{jk} \cdot ek \tag{17}$$

Usando el resultado de la Ecuación (14), el gradiente de la función de error con respecto al peso Wij entre la capa de entrada i y la capa oculta j se puede expresar de la siguiente manera. Aquí, oi es el valor de salida de la capa de entrada i y oj es el valor de salida de la capa oculta j.

$$\frac{\partial L}{\partial Wij} = \frac{\partial L}{\partial oj} \cdot \frac{\partial oj}{\partial Wij} \tag{18}$$

$$\frac{\partial L}{\partial Wij} - ej \cdot \frac{\partial}{\partial Wij} P \sum Wij \cdot oi = \tag{19}$$

Machine Translated by Google

$$\frac{\partial L}{\partial Wij} = -ej \cdot P' \cdot \overline{oye} \quad (20)$$

En las ecuaciones (19) y (20), P representa la función de activación dependiente de la fase utilizada en la salida de la capa oculta, y P La $'$ es la derivada de la función de activación dependiente. actualización de los pesos de la capa oculta se puede expresar de la siguiente manera.

$$\text{nuevo Wij} = \text{antiguo Wij} - \text{lr} \cdot \frac{\partial L}{\partial Wij} \quad (21)$$

Cuando se trata de variables complejas, es necesario utilizar ∂Wij en lugar de ∂Wij para actualizar. Aquí, lr juega un papel en el ajuste $\frac{\partial L}{\partial Wij}$ de la intensidad del cambio para evitar sobrepasarse, y se denomina tasa de aprendizaje. Además, la derivada de la función de activación P es una función compleja, y para encontrar la derivada de una función compleja se utiliza la derivada de Wirtinger [15].

Softmax de valores complejos: la función softmax, que se utiliza como función de activación en la capa de salida, toma valores de entrada y normaliza cada valor para que esté entre 0 y 1. Garantiza que la suma de los valores normalizados sea siempre 1. Esta función permite la interpretación de resultados como probabilidades. Se puede expresar como la Ecuación (22).

$$\text{Entonces f tmax(Z)i} = \text{e Zi} \cdot \frac{e^{zi}}{\sum i=1^{\infty}} \quad (22)$$

Sin embargo, la función softmax solo puede interpretar los resultados como probabilidades para entradas de números reales y, para entradas de números complejos, se necesita un método de interpretación diferente. En este artículo, proponemos un método de interpretación softmax de valores complejos para entradas de números complejos. El resultado de la función softmax para entradas de números complejos produce valores de salida complejos, y dado que la suma de todos los valores de salida es 1+0j, proponemos un algoritmo que calcula la distancia entre los valores de salida y 1 + 0j en el plano complejo y selecciona el índice del valor más cercano. Esto se puede expresar como la Ecuación (24).

$$\text{distanciai} = |\text{Entonces f tmax(Z)i} - \omega| \quad (23)$$

$$\text{índice_más cercano} = \text{argmin(distanciai)} \quad (24)$$

Aquí, se define $\omega = 1 + 0j$. En consecuencia, decidimos clasificar el número complejo. correspondiente a close_index como clase 1.

5. Análisis de rendimiento En

nuestros experimentos de reconocimiento de señales de voz, se realizó una comparación detallada entre los resultados de redes neuronales de valor real y redes neuronales de valor complejo.
El análisis de rendimiento se llevó a cabo junto con el preprocesamiento de coeficientes cepstrales de frecuencia de mel (MFCC) de valores complejos para la reducción de dimensionalidad. Además, se observó el impacto de los MFCC de valores complejos en los resultados del reconocimiento de voz. Específicamente, al reconocer señales de voz determinadas utilizando redes neuronales, se evaluó y comparó la influencia de los valores de MFCC y su efecto de complejización en el rendimiento del modelo para determinar si es posible mejorar el rendimiento y al mismo tiempo reducir el número de parámetros.

Método experimental: la Figura 6 muestra la arquitectura de una red neuronal multicapa de valores complejos utilizada para entrenamiento y pruebas con un conjunto de datos que consta de 8000 muestras de voz cortas, cada una de las cuales contiene ocho palabras diferentes y dura menos de un segundo.
Los datos de voz utilizados en este estudio son parte del conjunto de datos de comandos de voz recopilados por Google y distribuidos bajo la licencia CC BY.

Machine Translated by Google

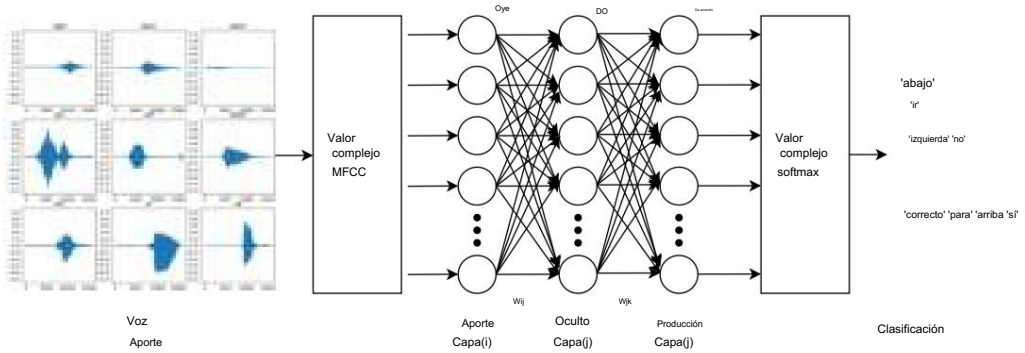


Figura 6. Configuración experimental de CVNN multicapa.

Las redes neuronales de valores complejos son estructuralmente similares a las redes neuronales de valores reales, pero la diferencia radica en el uso de números complejos, que introducen cambios de fase a medida que la suma de productos entre entradas y pesos gira en el plano complejo. Estos cambios de fase juegan un papel importante en las redes neuronales de valores comple La red neuronal de valores complejos consta de una capa de entrada con MFCC de valores complejos de dimensión reducida obtenidos de los datos de voz a través del proceso de complejización que se muestra en la Figura 3, una capa oculta con 500 nodos y una capa de salida con 8 nodos para clasificación. Todos los nodos y pesos utilizan números complejos. Los resultados finales se clasificaron en la capa de salida. El conjunto de datos constaba de 7000 muestras para entrenamiento y 1000 muestras para pruebas. Se utilizaron clips de audio de ocho palabras como datos y se realizaron experimentos dividiendo los datos de entrada en función de si se aplicó o no la transformación MFCC de valores complejos. En el caso de utilizar MFCC de valor real, se empleó una red neuronal de valor real, mientras que con MFCC de valor complejo se utilizó una red neuronal de valor complejo. Tanto las redes neuronales de valor real como las de valor complejo se entrenaron en las mismas condiciones: lr = 0,01, tamaño de lote = 50 y número de épocas = 50. Para los datos de entrada, los resultados de tres pasos de preprocesamiento de reducción de dimensionalidad diferentes se compararon con la red neuronal de valor real. Estos pasos de preprocesamiento incluyeron dimensiones de MFCC de 20, 10 y 5. La longitud de la señal de entrada para la red neuronal se puede determinar como se muestra en la Ecuación (25). Específicamente, la señal de voz de entrada se dividió en 32 cuadros y se generaron MFCC para cada cuadro.

$$\text{La longitud de los datos de la señal de entrada} = \text{MFCC} \times \text{cuadros} \tag{25}$$

Por ejemplo, en el caso de MFCC 20 de valor complejo, primero se calcula el MFCC 40 de valor real. Usando la ecuación (25), la longitud de la señal de entrada para MFCC 40 de valor real se convierte en 40 × 32 = 1280. Si luego convertimos estos 40 MFCC en números complejos, como se ilustra en la Figura 3, la reducción de dimensionalidad se logra a la mitad de la longitud. , lo que da como resultado 16 fotogramas. En consecuencia, la longitud de la señal de entrada se convierte en 40 × 16 = 640, lo que equivale a la longitud de la señal de entrada del MFCC 20 de valor real. Se puede realizar una reducción de dimensionalidad similar para el MFCC 10 de valor complejo y el MFCC 5 de valor complejo usando el mismo método. . El número total de parámetros para toda la red neuronal obtenidos a través de este proceso se presenta en la Tabla 1. En esta tabla, I (n) representa el número de neuronas en la capa de entrada, H (n) representa el número de neuronas en la capa oculta. capa, y O (n) representa el número de neuronas en la capa de salida.

Tabla 1. Número total de parámetros en la red neuronal.

MFCC	MFCC de valor real	MFCC de valor complejo
20	I(20 × 32 = 640) × H(500) + H(500) × O(8) = 324.000	I(40 × 16 = 640) × H(500) + H(500) × O(8) = 324.000
10	I(10 × 32 = 320) × H(500) + H(500) × O(8) = 164.000	I(20 × 16 = 320) × H(500) + H(500) × O(8) = 164.000
5	I(5 × 32 = 160) × H(500) + H(500) × O(8) = 84.000	I(10 × 16 = 160) × H(500) + H(500) × O(8) = 84.000

Machine Translated by Google

MFCC 20 de valor complejo versus MFCC 20 de valor real: como se muestra en la Figura 7, MFCC 20 de valor complejo logró una precisión de entrenamiento máxima del 99,40 % y una precisión de prueba del 84,90 % a pesar de tener la misma longitud de datos de entrada que el MFCC 20 de valor real. MFCC 20, que logró una precisión máxima de entrenamiento del 98,13 % y una precisión de prueba del 83,10 %. Los resultados obtenidos utilizando MFCC de valor complejo superaron a los obtenidos utilizando MFCC de valor real en términos de precisión tanto de entrenamiento como de prueba.

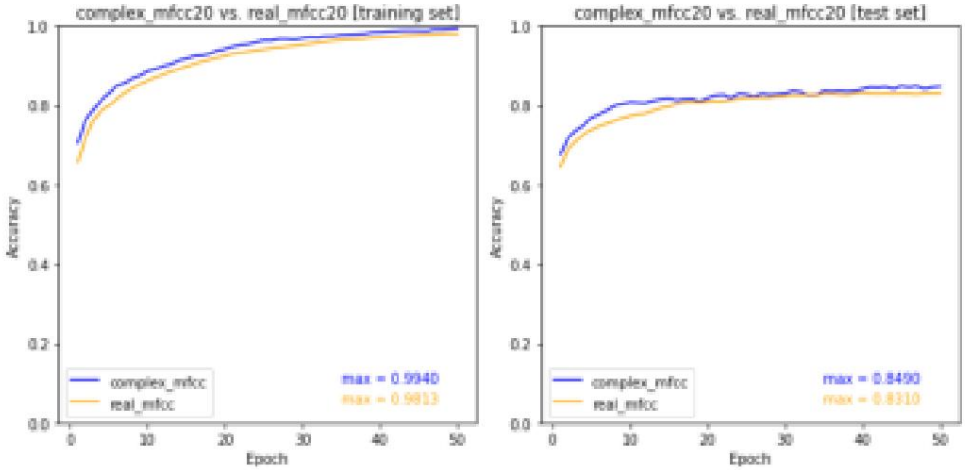


Figura 7. Comparación de los resultados de MFCC 20 de valor complejo y MFCC 20 de valor real.

MFCC 10 de valor complejo frente a MFCC 10 de valor real: como se muestra en la Figura 8, MFCC 10 de valor complejo logró una precisión de entrenamiento máxima del 96,90 % y una precisión de prueba del 83,80 % a pesar de tener la misma longitud de datos de entrada que el MFCC 10 de valor real. MFCC 10, que logró una precisión máxima de entrenamiento del 94,24 % y una precisión de prueba del 81,20 %. Los resultados obtenidos utilizando MFCC de valor complejo superaron a los obtenidos utilizando MFCC de valor real en términos de precisión tanto de entrenamiento como de prueba.

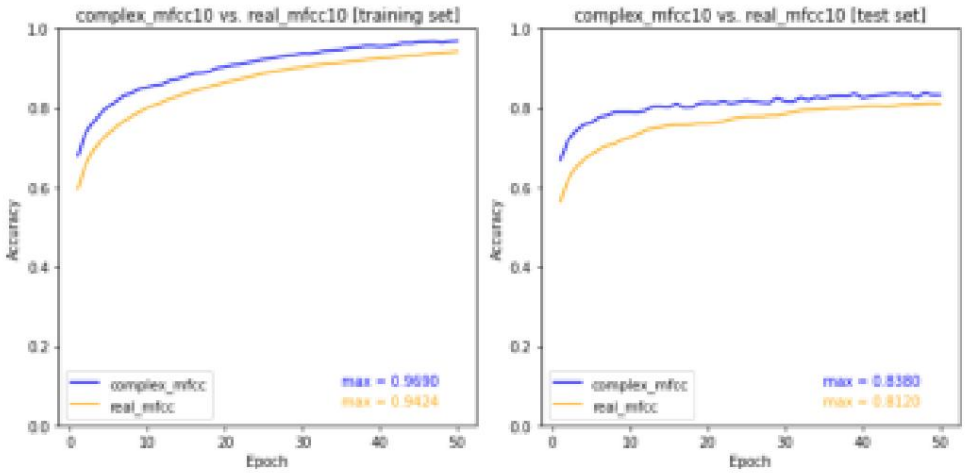


Figura 8. Comparación de los resultados de MFCC 10 de valor complejo y MFCC 10 de valor real.

MFCC5 de valor complejo frente a MFCC5 de valor real: como se muestra en la Figura 9, MFCC 5 de valor complejo logró una precisión de entrenamiento máxima del 92,33 % y una precisión de prueba del 81,40 % a pesar de tener la misma longitud de datos de entrada que el MFCC 5 de valor real. , que logró una precisión máxima de entrenamiento del 86,34 % y una precisión de prueba del 74,90 %. Los resultados obtenidos utilizando MFCC de valor complejo superaron a los obtenidos utilizando MFCC de valor real en términos de precisión tanto de entrenamiento como de prueba.

Machine Translated by Google

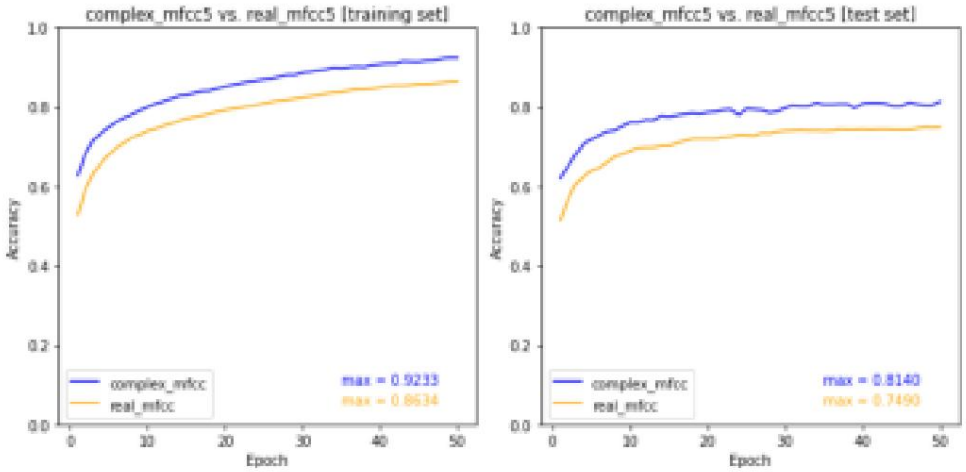


Figura 9. Comparación de los resultados de MFCC 5 de valor complejo y MFCC 5 de valor real.

Resultados generales del análisis: Al revisar los resultados experimentales, se observó que el uso de MFCC de valores complejos produce un mayor rendimiento en comparación con el uso de MFCC de valor real, incluso con la misma longitud de datos de entrada. Por lo tanto, se confirmó que el empleo de MFCC de valores complejos y redes neuronales de valores complejos conduce a mejores resultados. La variación en la precisión según la cantidad de características de MFCC se ilustra en la Figura 10. Aunque no se muestra aquí, se obtuvieron los mismos resultados utilizando la puntuació

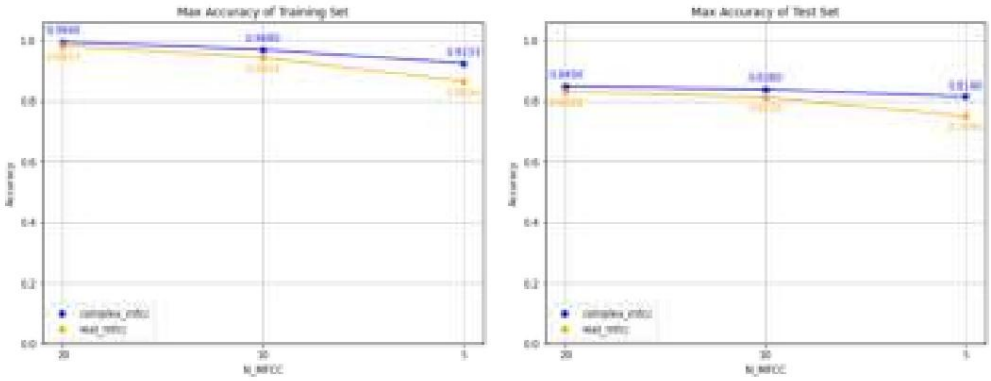


Figura 10. Variación de la precisión con el número de MFCC.

Si hay un número suficiente de MFCC, con épocas crecientes, parece que el rendimiento que utiliza números reales comienza a converger hacia el que utiliza números complejos Sin embargo, la Figura 9 muestra un resultado diferente. El MFCC 5 de valor complejo tiene MFCC complejos reducidos en 5 dimensiones obtenidos de 10 MFCC a través del proceso de complejización que se muestra en la Figura 3. Un MFCC 5 de valor real con solo 5 MFCC no puede alcanzar al MFCC 5 de valor complejo incluso a medida que aumentan las épocas. . En otras palabras, cuando el número de MFCC es bajo, incluso a medida que aumentan las épocas, los resultados de los MFCC de valor real no coinciden con el desempeño de los MFCC de valor complejo. Como se muestra en la Figura 10, a pesar de tener el mismo número de parámetros, los resultados del MFCC 5 de valor complejo son superiores a los del MFCC 5 de valor real. Por lo tanto, se observó que cuando se utilizan MFCC de valor complejo, el cambio en la precisión a medida que disminuye el número de funciones de MFCC, es más fluido en comparación con cuando se utilizan MFCC de valor real.

6. Conclusiones

En este artículo, introdujimos redes neuronales de valores complejos para abordar el problema del reconocimiento de voz. Nuestros experimentos utilizaron MFCC de valores complejos como insumos para un

Machine Translated by Google

Red neuronal de valores complejos. Los resultados demostraron un rendimiento superior al emplear MFCC de valores complejos, con un cambio más gradual en la precisión a medida que disminuía el número de características de MFCC, en comparación con el uso de MFCC de valor real. Esto sugiere que los MFCC de valor complejo pueden ayudar a mantener el rendimiento con menos funciones. Estos hallazgos proporcionan información valiosa sobre el potencial de las redes neuronales de valores complejos y demuestran la eficacia de combinar MFCC de valores complejos con redes neuronales de valores complejos en el reconocimiento de voz.

A pesar de estos resultados prometedores, reconocemos ciertas limitaciones de nuestro enfoque . Este estudio se realizó con un conjunto de datos limitado, que puede no representar completamente la diversidad de patrones de habla del mundo real. Además, la arquitectura de red neuronal de valor complejo descrita en este estudio es relativamente simple y puede no capturar todas las complejidades de las señales del habla.

De cara al futuro, nuestro objetivo es aprovechar este trabajo para mejorar aún más la precisión y el rendimiento de los modelos de reconocimiento y procesamiento de señales de voz. Nuestra investigación futura se centrará en diseñar modelos de redes neuronales de valores complejos más sofisticados y realizar experimentos en diversos conjuntos de datos para mejorar el rendimiento. Además, planeamos explorar la aplicación de redes neuronales de valor complejo a otros campos más allá del reconocimiento de voz, expandiendo potencialmente su uso en varios dominios de procesamiento de señ

Contribuciones de los autores: Conceptualización, SK; administración de proyectos, MP; supervisión, MP; redacción: borrador original, SK Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Este trabajo fue apoyado conjuntamente por la Fundación Nacional de Investigación de Corea (NRF) a través de una subvención otorgada por el gobierno de Corea (MSIT) (subvención n.° NRF-2023R1A2C1005461) y por el MSIT (Ministerio de Ciencia y TIC) de Corea. , en el marco del Programa de apoyo empresarial a la capacitación de talentos centrales de Convergence Security (IITP-2024-RS-2024-00426853) supervisado por el IITP (Instituto de Planificación y Evaluación de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones).

Declaración de disponibilidad de datos: Las contribuciones originales presentadas en el estudio están incluidas en el artículo. Mayores consultas pueden dirigirse a los autores correspondientes.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Tebelskis, J. Reconocimiento de voz mediante redes neuronales. Doctor. Tesis, Facultad de Ciencias de la Computación, Universidad Carnegie Mellon, Pittsburgh, PA, EE. UU., 1995.
2. Sarroff, AM Redes neuronales complejas para audio. Doctor. Tesis, Dartmouth College, Hanover, NH, EE. UU., 2018.
3. Abdul, ZK; Al-Talabani, AK Coeficiente cepstral de frecuencia Mel y sus aplicaciones: una revisión. Acceso IEEE 2022, 10, 122136–122158. [Referencia cruzada]
4. Barrachina, JA; Ren, C.; Vieillard, G.; Morisseau, C.; Ovarlez, JP Teoría e implementación de neuronas de valores complejos Redes. arXiv 2023, arXiv:2302.08286.
5. Aizenberg, I. Redes neuronales de valores complejos con neuronas de valores múltiples; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2016.
6. Tumbas, A.; Jaitly, N.; Mohamed, reconocimiento de voz AR híbrido con LSTM bidireccional profundo. En Actas del Taller IEEE de 2013 sobre comprensión y reconocimiento automático del habla, Olomouc, República Checa, 8 a 12 de diciembre de 2013; págs. 273–278. [Referencia cruzada]
7. Paz, P.; Garrido, M. Implementación eficiente de multiplicadores complejos en FPGA utilizando cortes DSP. J. Proceso de Señal. Sistema. 2023, 95, 543–550. [Referencia cruzada]
8. Ahmad, M.; Zhang, L.; Chowdhury, MEH FPGA Implementación de una red neuronal de valor complejo para representación polar Clasificación de imágenes. Sensores 2024, 23, 2627. [CrossRef] [PubMed]
9. Anggraeni, D.; Sanjaya, WS; Nurasyidiek, MI; Munawwaroh, M. La implementación del reconocimiento de voz utilizando coeficientes de cepstrum de frecuencia Mel (MFCC) y el método de máquina de vectores de soporte (SVM) basado en Python para controlar el brazo robótico. Conferencia de la PIO. Ser. Madre. Ciencia. Ing. 2018, 288, 012042. [Referencia cruzada]
10. Dhanjal, AS; Singh, W. Una encuesta completa sobre el reconocimiento automático de voz mediante redes neuronales; Springer Nature: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2023.
11. Smith, SW La guía para científicos e ingenieros sobre procesamiento de señales digitales, 2ª ed.; Publicaciones técnicas de California: San Diego, CA, Estados Unidos, 1999; págs. 557–558.
12. Bassey, J.; Li, X.; Qian, L. Un estudio de redes neuronales de valores complejos. arXiv 2021, arXiv:2101.12249v1.
13. MYONeuralNet. Redes neuronales de valores complejos: experimentos. 2016. Disponible en línea: http://makeyourownneuralnetwork. blogspot.com/2016/05/complex-valued-neural-networks.html (consultado el 19 de febrero de 2021).

Machine Translated by Google

14. Fischer, R. Wirtinger Cálculo. En Precodificación y Conformación de Señales para Transmisión Digital; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, Nueva Jersey, EE. UU., 2002; págs. 405–413.
15. PyTorch. Paquete de diferenciación automática: torch.autograd, nd Disponible en línea: https://pytorch.org/docs/stable/notes/autograd.html (consultado el 3 de noviembre de 2023).
16. Lee, C.; Hasegawa, H.; Gao, S. Redes neuronales de valor complejo: un estudio completo. IEEE/CAA J. Autom. Pecado. 2022, 9, 1433-1454. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Recomendaciones laborales: evaluación comparativa del filtrado colaborativo Métodos para anuncios clasificados

Robert Kwieci'nski 1,2, Tomasz Górecki 2,*, Ágata Filipowska 3 y Viacheslav Dubrov 1

1 Grupo OLX, Królowej Jadwigi 43, 61-872 Pozna ´n, Polonia; r.kwiecinskipl@gmail.com (RK); slavadubrov@gmail.com (VD)
2 Facultad de Matemáticas e Informática, Universidad Adam Mickiewicz, Uniwersytetu Pozna ´nskiego 4, 61-614 Pozna ´n, Polonia
3 Departamento de Sistemas de Información, Universidad de Economía y Negocios de Pozna ´n, Al. Niepodległo´sci 10, 61-875 Pozna ´n, Polonia; agata.filipowska@ue.poznan.pl
* Correspondencia: tomasz.gorecki@amu.edu.pl

Resumen: Los anuncios clasificados plantean numerosos desafíos para los métodos de recomendación, incluida la visibilidad temporal de los anuncios, el anonimato de la mayoría de los usuarios y el hecho de que normalmente solo un usuario puede consumir un artículo anunciado. En este trabajo, abordamos estos desafíos eligiendo modelos y procedimientos de evaluación que se consideren precisos, diversos y eficientes (en términos de memoria y consumo de tiempo durante el entrenamiento y la predicción). Este documento tiene como objetivo comparar varios métodos de recomendación para anuncios clasificados de empleo, utilizando OLX Jobs como ejemplo, para mejorar la tasa de conversión de anuncios y la satisfacción del usuario. En nuestra investigación, implementamos métodos escalables y representamos diferentes enfoques para las recomendaciones: mínimos cuadrados alternos (ALS), LightFM, Prod2Vec, RP3Beta y métodos lineales dispersos (SLIM). Realizamos pruebas A/B enviando millones de mensajes con recomendaciones para realizar evaluaciones en línea de métodos seleccionados. Además, hemos publicado el conjunto de datos creado para nuestra investigación. Hasta donde sabemos, este es el primer conjunto de datos de este tipo. Contiene 65.502.201 eventos realizados en OLX Jobs por 3.295.942 usuarios que interactuaron (mostraron, respondieron o marcaron) 185.395 anuncios de trabajo durante dos semanas en 2020. Demostramos que RP3Beta, SLIM y ALS funcionan significativamente mejor que Prod2Vec y LightFM cuando se prueban. en un entorno de laboratorio. Las pruebas A/B online también muestran que el envío de mensajes con recomendaciones generadas por los modelos ALS y RP3Beta aumenta el número de usuarios que contactan con los anunciantes. Además, RP3Beta tuvo un impacto un 20% más significativo en e

Palabras clave: recomendaciones laborales; clasificados; filtración colaborativa; pruebas de escalabilidad; pruebas A/B; sistemas de recomendación; factorización matricial; sistemas de recomendación basados en gráficos; Conjunto de datos de interacciones laborales de OLX ; métricas de diversidad

check for updates

Cita: Kwieci 'nski, R.; Górecki, T.; Filipowska, A.; Dubrov, V. Recomendaciones laborales: evaluación comparativa de métodos de filtrado colaborativo para Clasificados. Electrónica 2024, 13, 3049. https://doi.org/10.3390/electrónica13153049

Editores académicos: Marco Lombardi, Domenico Santaniello, Zilu Liang y Mahoma Khan

Recibido: 30 de mayo de 2024
Revisado: 24 de julio de 2024
Aceptado: 27 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Los clasificados online son sitios web donde los anunciantes publican anuncios relacionados con la venta o alquiler de servicios o productos [1]. Este artículo aborda la publicidad online utilizando el ejemplo de OLX Jobs.

Los anuncios clasificados se esfuerzan por satisfacer las necesidades tanto de los anunciantes como de los que responden a los anuncios en línea. Para unir a estos grupos, es cada vez más importante contar con mejores métodos de recomendación. En comparación con el comercio electrónico tradicional (por ejemplo, Amazon (https://www.amazon.com/, consultado el 26 de junio de 2024) o eBay (https://www.ebay.com/, consultado el 26 de junio de 2024)), los clasificados deben enfrentar diferentes desafíos, que abordamos en nuestro procedimiento de evaluación. Una es la visibilidad temporal de los anuncios, que decidimos abordar reentrenando frecuentemente el modelo. Por lo tanto, la eficiencia del modelo, que reportamos, es esencial para la evaluación. Otro desafío es que un anunciante normalmente necesita un solo usuario para completar la transacción. Este aspecto se abordó incluyendo el análisis de la diversidad en nuestra evaluación.

Machine Translated by Google

En nuestra investigación, nos centramos en enfoques que surgen del filtrado colaborativo. Los modelos de filtrado colaborativo han demostrado su precisión, aunque no utilizan información adicional sobre usuarios o elementos, que a veces es difícil de obtener o procesar en la práctica. Este artículo tiene como objetivo evaluar diferentes métodos de recomendación para su uso en el sector de anuncios clasificados. La gran escasez de nuestro conjunto de datos, junto con la importante cantidad de anuncios y usuarios, contribuye a la complejidad del problema de investigación.

A continuación, enumeramos nuestras principales aportaciones.

- Evaluamos exhaustivamente enfoques de filtrado diversos, escalables y colaborativos en un entorno de laboratorio en cuanto a precisión, diversidad y eficiencia. Evaluamos la precisión para diferentes grupos de usuarios, dependiendo del número de elementos con los que interactuaron, junto con un análisis estadístico de las diferencias. La metodología de evaluación propuesta aborda los principales desafíos de los anuncios clasificados.
- Presentamos los resultados de dos pruebas A/B en línea que demuestran el impacto de los modelos ALS y RP3Beta en los usuarios de OLX. Más de 1 millón de usuarios participaron en cada prueba. El impacto informado puede usarse para estimar la importancia de los sistemas de recomendación en el dominio de anuncios clasificados y permitir que otras empresas tomen decisiones más informadas sobre el desarrollo de dichos modelos. •
- Publicamos y presentamos un conjunto de datos sobre interacciones laborales. Hasta donde sabemos, este es el ma conjunto de datos disponible públicamente sobre interacciones laborales.

Este artículo consta de siete secciones. La sección 2 es una revisión de la literatura sobre los desarrollos subyacentes. La Sección 3 describe el conjunto de datos desarrollado y puesto a disposición del público en Kaggle. El diseño del experimento de laboratorio, así como la implementación de los métodos, se describen en la Sección 4. La Sección 5 se centra en los resultados de la evaluación de laboratorio de nuestras implementaciones, así como en la importancia estadística de los resultados. La Sección 6 presenta los resultados de las implementaciones en línea realizadas durante las pruebas A/B con usuarios, así como una discusión de los resultados. Las conclusiones se presentan en la Sección 7.

2. Trabajo relacionado

En esta sección, comenzamos describiendo las características únicas de los anuncios clasificados y los dominios laborales. Luego proporcionamos una descripción general de los sistemas de recomendación. A continuación, analizamos los factores que influyen en nuestra selección de modelos y proporcionamos una descripción detallada de cada modelo. Finalmente, especificamos las lagunas de la investigación.

2.1. Sitios de anuncios

clasificados Los sitios de anuncios clasificados (clasificados) son versiones en línea de secciones de anuncios de periódicos, con anuncios relacionados con vehículos, bienes raíces, empleo, mascotas, etc. Los anuncios clasificados son un tipo particular de sitio de comercio electrónico, ya que no admiten el finalización de transacciones entre partes; en cambio, se utilizan para comunicar sobre el producto o servicio y programar reuniones mientras la transacción se lleva a cabo fuera de línea; esto los distingue de los sitios tradicionales de comercio electrónico como eBay o Amazon [2].

Nuestra investigación se centra en OLX, que tiene presencia en más de 30 países en todo el mundo. Uno de los tipos de anuncios que se publican en los clasificados son las ofertas de trabajo. En nuestra investigación, identificamos varias características que distinguen los anuncios de empleo en anuncios clasificados de, por ejemplo, los anuncios de automóviles o bienes raíces:

- Los requisitos de un anuncio indican el tipo de usuario que puede responder al anuncio, no todos los usuarios poseen las competencias requeridas.
- Mayor implicación del usuario durante el proceso de búsqueda, ya que encontrar trabajo es una necesidad primaria frente a, por ejemplo, comprar un coche. • La ubicación del
- trabajo impacta dramáticamente al usuario: para comprar un teléfono móvil o un automóvil, un usuario puede viajar o utilizar un servicio de paquetería para entregar el artículo. Aún así, un trabajo requiere reubicación si está alejado del domicilio del usuario.
- Desde un punto de vista técnico, la descripción de un puesto de trabajo tiene muchos aspectos cualitativos y, dependiendo del puesto, las diferencias pueden ser significativas incluso entre anuncios de una misma empresa.

Machine Translated by Google

Además de estas características, durante nuestra investigación, también identificamos los siguientes desafíos para los métodos de recomendación en anuncios clasificados que influyeron en nuestra implementación de los métodos:

- El número de usuarios y ofertas: con OLX Jobs tratamos con millones de usuarios y decenas de miles de ofertas, ambas en constante cambio.
- Un usuario no tiene que crear un perfil para interactuar con los anuncios, lo que significa que la información de un perfil no se puede utilizar para realizar recomendaciones y las recomendaciones están determinadas por el comportamiento del usuario durante la visualización.
- Un anuncio suele tener un número limitado de visitantes (que interactúan con el anuncio), ya que un anuncio suele referirse a una oferta única. Una vez que se aborda la necesidad, el anuncio se desactiva.
- No hay información sobre si ocurrió una transacción; En los anuncios clasificados, la conversión se relaciona con recibir una respuesta a un anuncio publicado, ya que cualquier transacción se realiza fuera de línea.

Estos desafíos crean dificultades no sólo para la implementación sino también para probar la precisión de los métodos propuestos. Consideramos estos desafíos mientras preparábamos el conjunto de datos e implementábamos y evaluamos los métodos descritos en este documento.

2.2. Sistemas de recomendación

Se ha demostrado que el problema del exceso de elección [3] puede disminuir el consumo de productos [4] y reducir los ingresos del sitio [5]. Los proveedores pueden solicitar a sus usuarios información adicional sobre sus expectativas con respecto a los artículos para reducir la cantidad de opciones presentadas. Incluso si el usuario está dispuesto a dedicar tiempo a proporcionar esta información, el número de posibilidades suele ser demasiado grande para presentárselas. Para abordar este problema, muchas empresas, como Netflix [6] y Amazon [7], han creado sistemas de recomendación personalizados cuya función es sugerir elementos relevantes a los usuarios [8].

Las recomendaciones se utilizan en múltiples dominios, incluidos la música, el turismo, la moda y la comida. Se han realizado numerosos estudios en el ámbito del comercio electrónico [9], anuncios clasificados [10] y recomendaciones laborales [11-13]. Li y col. [14] mejoraron significativamente sus recomendaciones en LinkedIn utilizando el aprendizaje de transferencia profunda para crear modelos de comprensión del trabajo específicos de un dominio. Zhu et al. [15] propusieron un modelo de recomendación entre dominios utilizando un gráfico heterogéneo y un algoritmo de detección de comunidad para recomendar cursos y trabajos. Lacic et al. [16] evaluaron diferentes arquitecturas de codificador automático para recomendaciones de trabajo basadas en sesiones y presentaron los resultados en conjuntos de datos de recomendación de trabajo populares.

Normalmente, distinguimos dos enfoques para proporcionar recomendaciones: recomendaciones basadas en contenido y filtrado colaborativo [8].

En las recomendaciones basadas en contenido [17], utilizamos información sobre los usuarios (p. ej., pasatiempos, educación, habilidades) y artículos (p. ej., precio, ubicación, categoría). Estos sistemas suelen utilizar el historial de interacciones (calificaciones, visitas, compras y respuestas) de un solo usuario pero no consideran las calificaciones de todos los usuarios simultáneamente.

Recopilar/procesar información sobre usuarios y elementos no siempre es factible. En el enfoque de filtrado colaborativo [18,19], solo utilizamos información sobre las interacciones del usuario entre elementos. Incluso sin información sobre las funciones del usuario y de los elementos, estos sistemas pueden proporcionar recomendaciones muy precisas. Elegimos este enfoque debido a la falta de funciones de usuario y la dificultad de superar el filtrado colaborativo mediante la utilización de funciones de elementos en un entorno de producción (exploramos esto en la Sección 6.3).

Una de las deficiencias más importantes del filtrado colaborativo es la imposibilidad de proporcionar recomendaciones sobre usuarios y elementos sin interacciones, conocido como problema de arranque en frío [20]. Una posible solución para reducir este problema es el reentrenamiento frecuente del modelo. Con muchas interacciones del usuario, esta estrategia requiere centrarse en la escalabilidad del modelo [21].

Otro factor importante que determina la elección del modelo es el tipo de interacción entre un usuario y un elemento [20]. Llamamos a la retroalimentación explícita cuando el usuario indica explícitamente su preferencia hacia el ítem (por ejemplo, lo califica en una escala de 1 a 5). Otro tipo es la retroalimentación implícita, cuando solo podemos asumir la preferencia del usuario hacia el elemento en función

Machine Translated by Google

sobre el comportamiento del usuario (por ejemplo, comprar un artículo o ver una película). La retroalimentación implícita es menos precisa, más abundante y normalmente sólo expresa preferencias favorables [22].

Las evaluaciones de laboratorio de los sistemas de recomendación generalmente se basan en métricas de precisión [23]. Recientemente, se ha prestado mucha atención a otros aspectos, como la diversidad, la incertidumbre, la novedad y la cobertura [24,25]. Con los clasificados, un artículo normalmente puede ser consumido por un solo usuario, por lo que debemos evitar recomendar el mismo artículo a un número significativo de usuarios. Por lo tanto, centrarse en la cobertura del catálogo [26] es esencial. Una de las tareas más desafiantes en la evaluación de sistemas de recomendación es encontrar la métrica fuera de línea más correlacionada con el objetivo en línea [27].

En este artículo, comparamos modelos de filtrado colaborativo para un conjunto de datos de retroalimentación implícita considerable. Comparamos la precisión, diversidad y eficiencia de métodos de recomendación seleccionados en un entorno de laboratorio y luego demostramos la calidad de los métodos en pruebas en línea con los usuarios.

2.3. Métodos de recomendación

A continuación, enumeramos los aspectos más importantes que afectan la selección del método para nuestra investigación.

- Popularidad en la literatura. Seleccionamos métodos cuyo desempeño fue evaluado minuciosamente. Todos los métodos seleccionados menos uno han sido citados al menos cientos de veces.
- Popularidad en la industria. Evaluar este aspecto fue un desafío porque las empresas rara vez comparten los resultados de los experimentos realizados. Algunos indicadores de popularidad incluyen la disponibilidad de la implementación y la cantidad de personas que la usan (por ejemplo, reflejado en la cantidad de estrellas y bifurcaciones en GitHub). También consideramos la experiencia de los científicos de datos que trabajan dentro de nuestra empresa, quienes implementaron la mayoría de los métodos seleccionados para otros casos de uso en el pasado.
- Escalabilidad. Solo consideramos soluciones capaces de manejar millones de usuarios y elementos. Además, reducimos el problema del arranque en frío al volver a entrenar el modelo con frecuencia. Por lo tanto, tuvimos que elegir técnicas para entrenarnos en nuestro conjunto de datos en unas pocas horas.
- Diversidad de enfoques. Queríamos probar métodos que representaran a diferentes "familias" para evaluar su aplicabilidad a los anuncios clasificados. Planeamos identificar la familia de enfoques más prometedora para continuar la investigación en esta dirección.

Finalmente, se seleccionaron ALS, LightFM, Prod2Vec, RP3Beta y SLIM para pruebas y evaluación . Las siguientes subsecciones describen las razones para elegir cada método específico y la definición del método. Una limitación común de estos métodos es su incapacidad para recomendar elementos que no hayan sido visitados por ningún usuario y generar recomendaciones para usuarios que no hayan visitado ningún elemento (problema de inicio en frío, [21]). Con nuestro conjunto de datos, sin características de usuario y elemento, es imposible superar este problema mediante ningún método personalizado.

Los métodos seleccionados ya se han comparado en diferentes dominios. Anelli et al. [28] compararon RP3Beta, SLIM, ALS y BPRMF (que es equivalente a LightFM cuando se usa la función de pérdida BPR) en tres conjuntos de datos: Amazon Digital Music, Epinions y MovieLens 1M, en términos de precisión, diversidad y eficiencia. El número de interacciones en estos conjuntos de datos es, respectivamente, 145.523, 300.475 y 571.531. Nuestro estudio utilizó un conjunto de datos que contiene decenas de millones de interacciones, similares a las de los sistemas de producción OLX.

Además, proporcionamos los resultados de una evaluación en línea.

Dacrema et al. [29] compararon la precisión de SLIM, RP3Beta y ALS en varios conjuntos de datos (CiteULike-a, MovieLens 1M, Pinterest, Amazon Music, Amazon Movies, MovieLens 20M, Netflix, Yelp y Gowalla). Demostraron que cada uno de estos algoritmos superó a los otros dos en al menos un conjunto de datos. Algunos de sus hallazgos fueron confirmados en los conjuntos de datos MovieLens 1M y Pinterest por Anelli et al. [30]. Zhu et al. [31] compararon BPRMF, SLIM y Prod2Vec en tres conjuntos de datos (Amazon Books, Yelp y Gowalla), mostrando la superioridad de SLIM. Dong et al. [32] analizaron la precisión de RP3Beta, SLIM y ALS en nueve conjuntos de datos, y SLIM proporcionó los mejores resultados en ocho conjuntos de datos y ALS.

Machine Translated by Google

en uno. A diferencia de nuestro estudio, estos artículos no compararon los métodos seleccionados en términos de diversidad o eficiencia ni realizó una evaluación en línea.

Recientemente, se han desarrollado varios métodos de recomendación basados en redes neuronales. propuesto. Se ha demostrado que los modelos simples adecuadamente determinados y ajustados a menudo superarlos [28,31-33]. Además, debido a la complejidad computacional, los modelos basados en redes neuronales se prueban con menos frecuencia en conjuntos de datos que contienen decenas de millones de interacciones [28]. Por lo tanto, lo dejamos para futuras investigaciones para proponer soluciones más avanzadas y métodos escalables que proporcionan resultados superiores en nuestro conjunto de datos.

2.3.1. Modelos de factorización matricial

Las técnicas de factorización matricial se han utilizado con éxito en sistemas de recomendación desde el concurso del Premio Netflix [34]. La idea principal es aproximar la escasa Matriz de interacción usuario-elemento como producto de dos matrices densas y más pequeñas. Evaluamos dos Enfoques de factorización matricial: LightFM y ALS.

El modelo LightFM [35] fue propuesto para superar el problema del arranque en frío de los métodos de factorización matricial. En nuestro caso, se reduce a la factorización matricial clásica sin información sobre usuarios y artículos. A pesar de esto, decidimos utilizar este enfoque debido a su implementación oficial eficiente en el soporte de múltiples funciones de pérdidas: logística, BPR [36], DEFORMACIÓN [37] y -OS DEFORMACIÓN [38].

Sea U un conjunto de usuarios y yo un conjunto de elementos. Para un usuario dado U y un elemento I, tenemos define = 1 si el usuario interactúa con el elemento , y = 0, en caso contrario. El modelo LightFM predice la puntuación de la siguiente manera:

$$\hat{} = \cdot + + \quad ,$$

donde y denotan las representaciones latentes dimensionales del usuario y del elemento, y y son los sesgos del usuario y del elemento. Todos estos parámetros se aprenden durante el entrenamiento.

La función de pérdida logística debe usarse cuando hay retroalimentación tanto positiva como negativa. Hay tipos disponibles, por lo que no es apropiado para nuestro conjunto de datos, lo cual confirmamos experimentalmente durante el ajuste de hiperparámetros.

Las funciones de pérdida BPR, WARP y -OS WARP son enfoques de aprendizaje de clasificación por pares que son más relevantes para nuestra tarea de recomendaciones principales. Intentan modificar parámetros del modelo para maximizar la diferencia entre las puntuaciones de los ítems D con con qué usuario interactúa y de los elementos D con los que el usuario no interactúa.

Específicamente, en la función de pérdida BPR [36], intentamos maximizar la expresión, como sigue:

$$\sum_{(,,)\ S} \ln(\hat{} \quad ^{-} \hat{}) - \Theta\,||\Theta||2 \ ,$$

dónde

$$S = \{(,,) | \quad U, \quad D \text{ y } \quad D\},$$

$$() = \frac{1}{1 + -} \ ,$$

Θ es un parámetro de regularización específico del modelo, Θ es un vector de parámetros y || · || es el Norma euclidiana.

Presentamos WARP [37] como un caso de -OS WARP [38]. La función de pérdida -OS WARP es una suma de pérdidas para cada usuario:

$$\sum_{U} (\hat{} \ , D),$$

donde ˆ es un vector de puntuaciones estimadas ˆ para cada ítem I.

Machine Translated by Google

Para un usuario , Ordenamos los elementos D que interactúan en orden decreciente del determinado puntuaciones estimadas. Es decir, ordenamos los elementos como 1, 2 ,. . . , | D | , donde están los índices elegido de tal manera que tengamos lo siguiente:

$$\hat{}_{1} \geq \hat{}_{2} \geq \ldots \geq \hat{}_{|D|}.$$

Luego tenemos lo siguiente:

$$(\hat{}, D) = \frac{1}{} \sum_{=1}^{|D|} ( )\Phi(\text{rango}(\hat{})),$$

donde rango (ˆ) = I\D (1 + ≥ ˆ), es una función indicadora, Φ( ) = $\sum_{=1} \frac{1}{}$, y = $\sum_{=1}^{|D|}$ ( ) normaliza los pesos inducidos por .

En la práctica, tomamos una muestra de un elemento positivo relacionado con la función de ponderación y Elija al azar elementos invisibles hasta que, después de las muestras, 1 + ≥ . Luego, realizamos un paso de gradiente para minimizar Φ($\frac{\text{I\D}|}{}$) (1 − + ˆ).

Finalmente, la pérdida -OS WARP se logra para ( ) = 1 y ( ) = 0 si ≠ . La deformación La pérdida se logra cuando establecemos ( ) = 1 para N. Podemos omitir el pedido de elementos positivos de D para simplificar los cálculos.

En nuestra investigación, todas las funciones de pérdida (logística, BPR, WARP y -OS WARP) fueron tratadas como hiperparámetros del modelo LightFM y optimizados durante el entrenamiento.

El modelo ALS (mínimos cuadrados alternos), también conocido como WRMF (factorización matricial regularizada ponderada) [39], es un ejemplo de un método de factorización matricial diseñado para conjuntos de datos de retroalimentación implícita. Elegimos este método por su rendimiento comprobado, escalabilidad y popularidad en la investigación y la industria. Además, el modelo ALS tiene ya ha sido implementado y utilizado en OLX.

Definimos la confianza de una observación como = 1 + , donde es un hiperparámetro . También definimos la preferencia como = (> 0). Luego, en ALS, optimizamos la siguiente expresión:

$$\text{mín.}_{,} \sum_{,} (-)^{2} + (\sum || ||2 + \sum || ||2),$$

donde está la incrustación -dimensional del usuario, es la incrustación -dimensional del elemento, y es un parámetro de regularización. El nombre del modelo hace referencia al método optimizado. para esta función. El procedimiento de mínimos cuadrados alternos supone que el usuario o elemento latente Los factores son fijos y determinan analíticamente a los demás. El procedimiento se repite eficientemente. algunas veces [39,40].

En los enfoques de factorización matricial, la incorporación para cada usuario se aprende por separado, lo que podría resultar en una gran utilización de tiempo y memoria si la cantidad de usuarios es grande. Además, las recomendaciones pueden carecer de explicabilidad porque dos usuarios con la Las mismas interacciones pueden recibir recomendaciones diferentes. Otros modelos considerados (SLIM, RP3Beta, Prod2Vec) proporcionan el mismo conjunto de recomendaciones para usuarios con el mismas interacciones.

2.3.2. Modelos basados en el vecindario

El modelo SLIM (métodos lineales dispersos para sistemas de recomendación Top-N [41]) es basado en regresión de vecinos más cercanos basada en elementos [8]. Elegimos este método por su ventajas sobre los modelos de factorización matricial y de vecinos más cercanos basados en ítems [41] y buen rendimiento frente a enfoques neuronales y no neuronales [29].

En este modelo, nos aproximamos a la matriz usuario-artículo aprendiendo la relación artículo-artículo matriz de similitud escasa. Explícitamente, se aprende minimizando la siguiente expresión:

$$\frac{1}{} || - 2 \quad ||2 + \frac{}{|| 2} \quad ||2 + || ||1,$$

Machine Translated by Google

donde ≥ 0 y = 0 para todos , , 1 ≤ , ≤ ‖|, || · || es la norma matricial de Frobenius:

$$\| \| = \sum \sum_{=1}^{|yo|} \sum_{=1}^{|yo|} {}^{2},$$

|| · ||1 es la norma ℓ1 de entrada :

$$\| \|1 = \sum_{=1}^{|yo|} \sum_{=1}^{|yo|} | \quad |$$

y y son parámetros de regularización.

Podemos ver que cada columna de se puede aprender de forma independiente, lo que mejora la escalabilidad de este modelo [41].

Una limitación de este método es que no genera incrustaciones de usuarios y elementos, lo que podría resultar útil para otras tareas (por ejemplo, agrupación de usuarios o elementos). Podemos tratar las columnas de la matriz como incrustaciones de elementos, pero son vectores ‖|-dimensionales escasos, por lo que probablemente no se puedan utilizar directamente en otras tareas.

2.3.3. Enfoques basados en gráficos

RP3Beta [42] es un enfoque de filtrado colaborativo basado en gráficos. De manera similar a Dacrema et al. [29], presentamos este modelo como una extensión del modelo P3alpha [43]. Consideramos un gráfico bipartito y no dirigido = (V, E), donde cada vértice V representa un usuario o un elemento y cada borde { , } E representa la interacción entre un usuario determinado y un elemento determinado. Sean la matriz de adyacencia y la matriz de grados del gráfico. Luego, las puntuaciones de P3alpha se almacenan en la matriz.

$$((\quad ^{-1} \quad)^{\circ} \quad)^{3},$$

donde ◦ denota el poder de elementos de una matriz (poder de Hadamard). Más precisamente, la puntuación ˆ se almacena en la intersección de la fila que representa al usuario y la columna que representa el elemento. Podemos ver que esta puntuación es una suma de puntuaciones asignadas a rutas de longitud 3 que conectan al usuario y al elemento en el gráfico.

En RP3Beta, la puntuación se calcula con P3alpha y se divide por la popularidad de los elementos elevados a la potencia de para mitigar el sesgo de popularidad.

Elegimos este modelo por su simplicidad, escalabilidad y rendimiento probado [29,30], especialmente dada la gran escasez de nuestro conjunto de datos, lo que reduce significativamente la utilización de la memoria al entrenar el modelo. Esto nos permite calcular y almacenar directamente la matriz de similitud elemento-elemento en la memoria en lugar de la aproximación de paseos aleatorios propuesta en el artículo original.

RP3Beta, similar a SLIM, no genera incrustaciones de usuarios ni elementos. Otra limitación relacionada es su incapacidad para recomendar elementos cuya distancia en el gráfico bipartito usuario-elemento sea mayor que tres de un usuario determinado. Específicamente, un artículo se puede recomendar al usuario solo si al menos un usuario ha visitado el artículo y al menos uno de los artículos ha sido visitado por el usuario. Además, el modelo RP3Beta no cuenta con parámetros optimizados durante el entrenamiento; por lo tanto, es posible que no pueda explotar las relaciones complejas de los datos.

2.3.4. Prod2Vec

El modelo Prod2Vec [44] (o Item2vec [45]) está basado en el modelo Word2Vec [46], ampliamente utilizado en el procesamiento del lenguaje natural. El modelo se centra en aprender representaciones vectoriales de elementos utilizando una secuencia de elementos como una “oración” y elementos dentro de esa secuencia como “palabras”. Se eligió este método porque es escalable y muy diferente de los métodos comparados. Además, este enfoque se basa en el actual sistema de recomendación de redes neuronales profundas híbridas de última generación utilizado en otras categorías en OLX.

Machine Translated by Google

Prod2Vec utiliza el modelo de salto de gramo maximizando la función objetivo sobre el conjunto S de secuencias de elementos, definidas de la siguiente manera:

$$= \sum_{S} \sum \sum_{- \le \le \neq 0} \text{Iniciar sesión } P(+ |),$$

¿Dónde está la longitud del contexto para las secuencias de elementos y los elementos de la misma secuencia son ordenado arbitrariamente. La probabilidad P(+ |) de observar un elemento vecino + dada la El elemento actual se define utilizando la función soft-max:

$$PAG(+ | \quad) = \frac{\text{Exp}(\quad ' \quad)}{\sum_{=1}^{|yo|} \text{Exp}(\quad ' \quad)},$$

donde y son las representaciones vectoriales de entrada y salida de item y ||| es el , número de elementos únicos en el vocabulario. Prod2Vec modela el contexto de una secuencia de elementos, donde elementos con contextos similares (es decir, con interacciones vecinas similares) tienen representaciones vectoriales.

Antes de generar recomendaciones, normalizamos todas las representaciones de vectores de entrada, lo que mejora la eficiencia. Para generar recomendaciones, representamos al usuario como un promedio de representaciones de vectores de entrada de elementos interactuados. Luego buscamos elementos cuyas representaciones de entrada tienen la mayor similitud de coseno con la representación del usuario (-vecinos más cercanos en el espacio latente).

Una posible limitación de este método es una dependencia estricta entre el usuario y el elemento. representaciones. Algunas interacciones deberían tener potencialmente un mayor impacto en las representaciones de los usuarios que otras (lo cual es posible en los modelos de factorización matricial).

2.4. Brecha de investigación

Este artículo tiene como objetivo comparar diferentes métodos de recomendación en el ámbito de los clasificados de empleo, abordando una brecha de investigación específica. Hasta donde sabemos, el Los métodos de recomendación abordados nunca han sido probados o comparados en gran medida. escale mientras trabaja en línea en el ámbito laboral. En este trabajo comparamos estos métodos en un entorno de laboratorio utilizando el conjunto de datos que publicamos y en pruebas A/B en línea realizadas en un entorno de producción.

3. Conjunto de datos de interacciones laborales de OLX

Esta investigación proporciona un conjunto de datos comerciales que contiene 65.502.201 eventos realizados en OLX Jobs por 3.295.942 usuarios que interactuaron con 185.395 anuncios de empleo en dos semanas en 2020. Publicamos el conjunto de datos en Kaggle (https://www.kaggle.com/olxdatascience/olx-jobs-interactions , consultado el 26 de junio de 2024).

Cada fila del conjunto de datos representa el evento que realiza un usuario determinado con respecto a un determinado anuncio en un momento dado (Tabla 1). Se incluyeron los siguientes eventos que involucran comportamientos de los usuarios:

- clic: el usuario visitó la página de detalles del artículo;
- marcador: el usuario agregó el elemento a los marcadores;
- chat_click: el usuario abrió el chat para contactar al dueño del artículo;
- contact_phone_click_1: el usuario reveló el número de teléfono adjunto al artículo;
- contact_phone_click_2: el usuario hizo clic para realizar una llamada telefónica al propietario del artículo;
- contact_phone_click_3: el usuario hizo clic para enviar un mensaje SMS al propietario del artículo;
- contact_partner_click: el usuario hizo clic para acceder a la página externa del propietario del elemento;
- contact_chat: el usuario envió un mensaje al propietario del artículo.

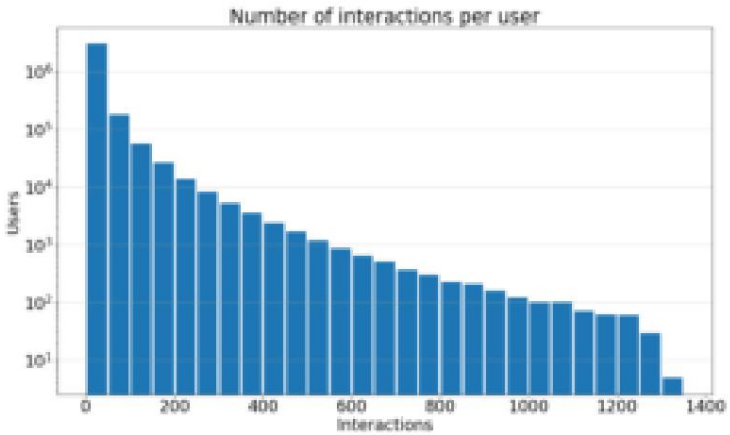
Machine Translated by Google

Tabla 1. Filas de ejemplo del conjunto de datos.

Usuario	Artículo	Evento	Marca de tiempo
1745587	168661	hacer	1582216025
843008	62838	clic	1582485868
14285	30469	hacer clic en	1582247367
1142944	80122	favorito	1581805847
2835659	23728	hacer clic en chat_hacer clic	1582397836

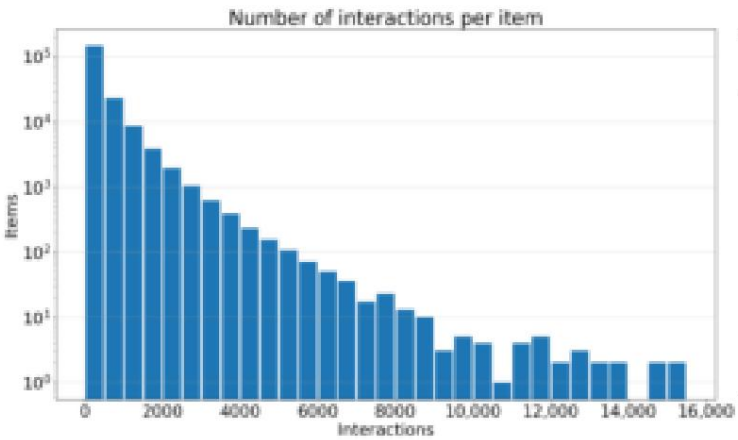
Fuente: estudio propio.

La escasez de datos (% de entradas faltantes en la matriz usuario-elemento) equivale al 99,9923%, que es muy bajo pero típico de los anuncios clasificados (a modo de comparación, la escasez de datos en el El conjunto de datos MovieLens 20M es del 99,47%, lo que lo hace casi 70 veces más denso). Distribuciones de Las interacciones por usuario, las interacciones por elemento y los eventos se proporcionan en las Figuras 1 y 2. y Tabla 2, respectivamente. Usamos una escala logarítmica porque las distribuciones son fuertemente sesgado a la derecha.



Quantile	Value
0.01	1
0.10	1
0.25	2
0.50	6
0.75	18
0.90	46
0.99	221

Figura 1. Número de interacciones por usuario. Fuente: estudio propio.



Quantile	Value
0.01	1
0.10	1
0.25	3
0.50	137
0.75	428
0.90	950
0.99	2944

Figura 2. Número de interacciones por ítem. Fuente: estudio propio.

Según De Ruijt y Bhulai [47], los conjuntos de datos más populares utilizados para la evaluación de sistemas de recomendación laboral son CareerBuilder12 (https://www.kaggle.com/ concursos/recomendación de trabajo, consultado el 16 de junio de 2024), RecSys16 [12] y Rec-Sys17 [13]. La Tabla 3 muestra las estadísticas de los conjuntos de datos considerados. El número de únicos interacciones es el número de pares únicos de usuario-elemento donde el usuario interactuó con el artículo. Aunque los investigadores utilizan los conjuntos de datos RecSys16 y RecSys17, fueron publicados durante concursos de ciencia de datos bajo condiciones estrictamente limitadas y no son Ya no está disponible. Por lo tanto, no pudimos calcular el número de interacciones únicas para estos

Machine Translated by Google

conjuntos de datos. Observamos que el conjunto de datos de interacciones laborales de OLX tiene el mayor número de interacciones y tipos entre los conjuntos de datos considerados.

Tabla 2. Distribución de eventos.

Acción	Frecuencia (%)
haga	89.794
clic en contact_phone_click_1	2.628
favorito	2.511
chat_click	2.136
contact_chat	1.448
contact_partner_click	0.701
contact_phone_click_2	0,679
contact_phone_click_3 Fuente:	0.103

estudio propio.

Tabla 3. Comparación entre conjuntos de datos de recomendaciones laborales. La letra denota la desviación estándar.

	Empleos de OLX Interacciones	CareerBuilder12	RecSys16	RecSys17
Interacciones	65,50 millones	1,60M	8,83M	8,27M
Interacciones únicas	47,17 millones	1,60M	-	-
Usuarios	3,30M	0,3 2M	1,37M	1,50M
Número promedio de únicos interacciones por usuario	14.31 (= 29,23)	4,99 (= 11,42)	<6.46	<5.51
Elementos	0,19 millones	0,37M	1,36M	1,31M
Número promedio de únicos interacciones por elemento	254,42 (= 426,02)	4.38 (= 8,19)	<6,50	<6.31
Densidad de la matriz de interacción (%)	0,0077%	0,0014%	<0,0005%	<0,0004%
Tipos de interacciones	8	1	4	5
Marcas de tiempo				
Funciones de usuario				
Características del artículo				

Fuente: estudio propio.

Cabe señalar que mantener la confidencialidad de los anuncios y de los usuarios era una prioridad al preparar este conjunto de datos. Las medidas tomadas para proteger la privacidad incluyeron las siguientes:

- Los identificadores originales de usuarios y elementos fueron reemplazados por números enteros aleatorios únicos;
- Se agregó algún número entero constante no revelado a cada marca de tiempo;
- Se filtraron algunas fracciones de interacciones;
- Se agregaron algunas interacciones artificiales adicionales.

4. Configuración experimental

4.1. Implementación

Implementamos los métodos mencionados anteriormente en base a desarrollos anteriores. Los detalles sobre cómo nuestras implementaciones difieren de los enfoques probados anteriormente son proporcionado en la Tabla 4. La implementación de los métodos para la reproducibilidad de los resultados es disponible en GitHub (https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recommendations, accedido el 29 de mayo de 2024).

Machine Translated by Google

Tabla 4. Métodos reimplementados para la investigación.

Método	Familia de métodos	Fuente	diferencia con el Método original
Factorización de matriz LightFM		Implementación basada en: [48]. Documento de apoyo: [35].	Ninguno
ELA	Factorización matricial	Implementación basada en: [49]. Artículos de respaldo: [39,40].	Ninguno
DELGADO	Basado en el vecindario	Fuentes que inspiraron nuestra implementación: [50,51]. Documento de apoyo: [41].	Ninguno
RP3Beta	basado en gráficos	Fuente que inspiró nuestra implementación: [52]. Artículos de respaldo: [29,53].	Realizado directo cálculos en matrices dispersas en lugar de aleatorias camina aproximación.
Prod2Vec Palabra2Vec		Implementación basada en: [54]. Artículos de respaldo: [44,45].	Secuencias de interacciones, ordenadas por marca de tiempo. Representar al usuario como un promedio de las representaciones de los elementos interactuados . También experimentamos con CBOW (bolsa continua de palabras).

Fuente: estudio propio.

4.2. Objetivos de investigación de laboratorio y pruebas en línea Nuestro

objetivo comercial final era aumentar la cantidad de usuarios que solicitaban empleo a través de OLX Jobs. Para lograrlo, intentamos resolver un problema de clasificación; más precisamente, recomendamos diez elementos con mayor probabilidad de recibir la interacción de un usuario determinado. Mogenet et al. consideraron la cuestión de encontrar una métrica fuera de línea más correlacionada con la tasa de solicitud en el ámbito laboral. [27]. Dado que nuestro objetivo es similar, seguimos sus resultados optimizando para precisión@10 (precisión para los primeros diez elementos recomendados [23]). Sin embargo, también informamos y analizamos otras métricas de precisión, diversidad y eficiencia.

Estamos enfocados en usuarios que buscan activamente empleo interactuando con anuncios de empleo. Por lo tanto, no consideramos usuarios sin interacciones (usuarios de arranque en frío).

4.3. División de datos

El conjunto de datos descrito en la Sección 3 se dividió en conjuntos de datos de entrenamiento-validación y de prueba según lo requiere la metodología de investigación. El conjunto de prueba incluye el 20% de las interacciones más recientes. Esto significa que de 14 días, se incluyeron aproximadamente 3 días en el conjunto de prueba (consulte la Figura 3). Esta forma de dividir el conjunto de datos en conjuntos de entrenamiento y prueba es la configuración más realista según Meng et al. [55], quienes estudiaron varias estrategias de división para evaluar sistemas de recomendación.

En ambos conjuntos de datos, también limitamos la cantidad de interacciones a interacciones únicas entre un usuario y un elemento. Si un usuario interactuaba más de una vez con un elemento, solo se contaba la primera interacción y la marca de tiempo de esa interacción se asociaba con el elemento. Tampoco distinguimos entre tipos de interacciones. Además, se aplicaron dos modificaciones más: solo los usuarios que aparecían en el conjunto de datos de capacitación y validación se incluyeron en el conjunto de prueba (porque no podíamos brindar recomendaciones personalizadas a otros usuarios sin conocimientos adicionales sobre ellos) y filtramos a todos los usuarios. pares de elementos que estaban presentes en el conjunto de entrenamiento (para evitar recomendar elementos que ya se habían visto). Como resultado, terminamos con aproximadamente 38 M de filas en el conjunto de entrenamiento y validación y aproximadamente 6 M de filas en el conjunto de prueba. En la Tabla 5 se presentan más estadísticas de estos dos conjuntos de datos .

Machine Translated by Google

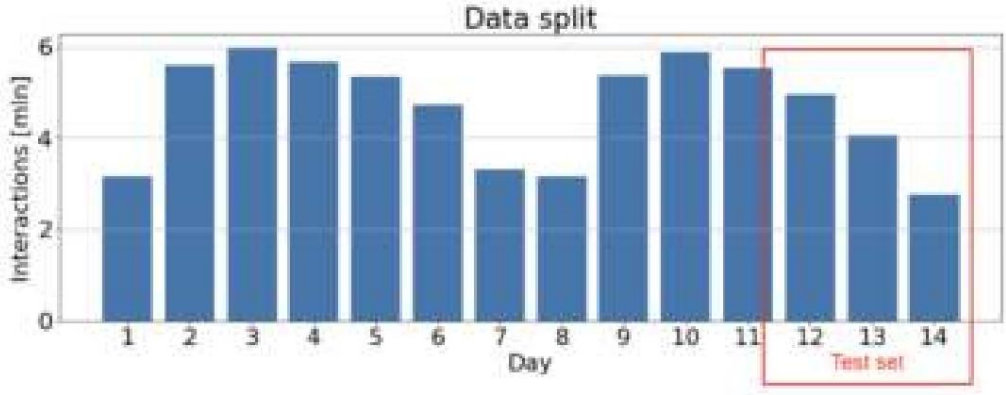


Figura 3. Preparación del conjunto de datos (dividida en capacitación-validación y prueba, según la cantidad de días). Fuente: estudio propio.

Tabla 5. Comparación entre conjuntos de entrenamiento/validación y prueba. La letra denota estándar. desviación.

	Interacciones laborales de OLX Interacciones	Conjunto de formación y validación	Equipo de prueba
Interacciones	65,50 millones	52,40 millones	6,11 millones
Interacciones únicas	47,17 millones	38,25 millones	6,11 millones
Usuarios	3,30M	2,83 millones	0,62 millones
Número promedio de únicos interacciones por usuario	14.31 (= 29,23)	13.50 (= 26,11)	9,87 (= 14,38)
Elementos	0,19 millones	0,18M	0,13M
Número promedio de únicos interacciones por elemento	254,42 (= 426,02)	214.05 (= 365,93)	47,51 (= 83,84)
Densidad de la matriz de interacción (%)	0,0077%	0,0076%	0,0077%

Fuente: estudio propio.

4.4. Ajuste del modelo

Por razones de costo y tiempo, al realizar la optimización de parámetros, Hicimos una restricción al 20% de los usuarios y al 20% de los ítems de la capacitación y validación. colocar. Luego, dividimos el conjunto de datos restringido en el conjunto de datos de entrenamiento-validación con el reglas descritas en la sección anterior. Para cada modelo, se eligieron 100 iteraciones. mediante optimización bayesiana utilizando procesos gaussianos implementados en scikit-learn (https://scikit-optimize.github.io/stable/modules/generated/skopt.gp_minimize.html, accedido el 29 de mayo de 2024). El archivo de configuración define espacios para hiperparámetros y está disponible en nuestro repositorio de código (https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recommendations/blob/principal/src/tuning/config.py, consultado el 29 de mayo de 2024). Por ejemplo, para RP3Beta, nosotros Nos limitamos a buscar y en el intervalo [0, 2].

Se prepararon recomendaciones en el proceso de optimización para 30.000 usuarios y Como se mencionó anteriormente, el puntaje de optimización utilizado fue precisión@10. La figura 4 muestra la puntuación de precisión dependiendo de los parámetros. Es visible que la ELA no era altamente optimizado dentro del proceso, pero para otros métodos, esta optimización fue crucial para mejorando la precisión. Los hiperparámetros para todos los modelos se presentan en la Tabla 6.

Machine Translated by Google

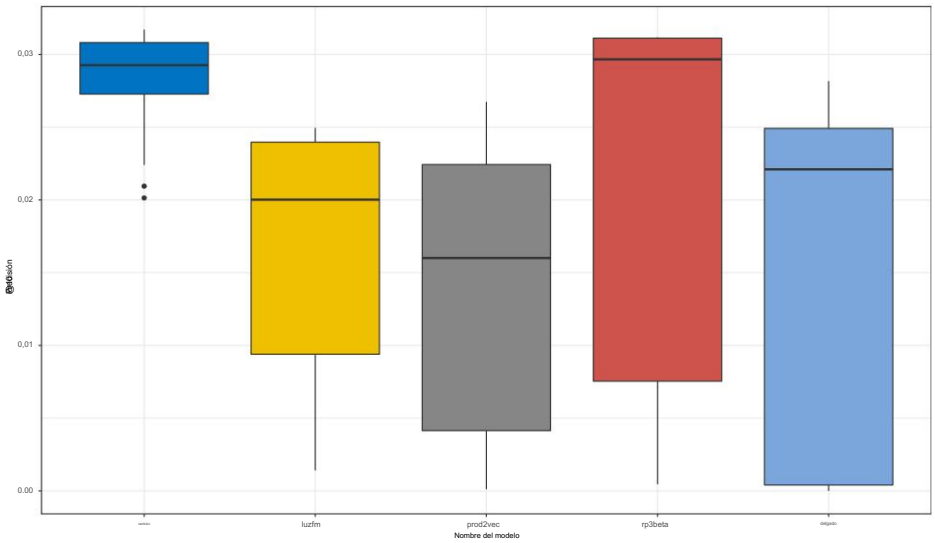


Figura 4. Precisión para cada modelo, en función de los parámetros. Fuente: estudio propio.

Tabla 6. Hiperparámetros del modelo.

Modelo	Hiperparámetros del modelo
también	{'factores': 357, 'regularización': 0.001, 'iteraciones': 20, 'event_weights_multiplier': 63}
luzfm	{'no_components': 512, 'k': 3, 'n': 20, 'learning_schedule': 'adadelta', 'pérdida': 'warp', 'max_sampled': 61, 'épocas': 11}
prod2vec	{'vector_size': 168, 'alfa': 0.028728, 'ventana': 20, 'min_count': 16, 'muestra': 0,002690026, 'min_alpha': 0,0, 'sg': 1, 'hs': 1, 'negativo ': 200, 'ns_exponent': −0,16447846705441527, 'cbow_mean': 0, 'épocas': 22}
RP3Beta	{'alfa': 0,61447198, 'beta': 0,1443548}
delgado	{'alfa': 0.00181289, 'l1_ratio': 0.0, 'iteraciones': 3}

Fuente: estudio propio.

4.5. Evaluación del modelo

Evaluamos nuestros modelos en términos de precisión, diversidad y eficiencia.

La precisión del método de recomendación en conjuntos de datos de retroalimentación implícita suele ser evaluado examinando qué elementos de la lista de las principales recomendaciones el usuario interactuó en el conjunto de prueba [8]. Muchas métricas de evaluación determinan las métricas para cada usuario por separado y presentar la media como puntuación de evaluación final del método [23]. El El sistema de recomendación puede considerarse un clasificador, donde las interacciones del usuario en el conjunto de pruebas son ejemplos positivos y las principales recomendaciones son elementos clasificados como positivo por el modelo. Por lo tanto, los métodos utilizados para evaluar clasificadores pueden ser directamente aplicado a sistemas de recomendación. Por ejemplo, el valor de precision@ para un usuario determinado es el número de elementos recomendados con los que interactuó el usuario en el conjunto de prueba dividido por el número de artículos recomendados a ese usuario. Otras métricas discutidas en este trabajo fueron descrito por Tamm et al. [23].

En el dominio de anuncios clasificados, principalmente en el dominio de empleos, generalmente solo se necesita un usuario para completar una transacción relacionada con un anuncio determinado. En este caso, la diversidad de recomendaciones es incluso más crítico que en otros dominios (como música, películas u otros comercios electrónicos, excluyendo clasificados). Para evaluar este aspecto utilizamos tres medidas: cobertura de prueba, Shannon entropía [56] y el índice de Gini [56]. La cobertura de la prueba se refiere a la fracción de elementos de la prueba. recomendado a al menos un usuario. Con la entropía de Shannon y el índice de Gini, ignoramos elementos fuera del conjunto de prueba. Una mayor cobertura de prueba y los valores de entropía de Shannon indican mayores diversidad, mientras que valores mayores del índice de Gini indican menor diversidad.

Machine Translated by Google

El paso final de evaluación del laboratorio se centra en la eficiencia. Para ello utilizamos una instancia de AWS SageMaker ml.m5.4xlarge equipada con 64 GB de RAM y 16 vCPU, con una CPU Intel(R) Xeon(R) Platinum 8259CL a 2,50 GHz, ejecutándose en Amazon Linux AMI 2018.03. Todos los métodos fueron evaluados en relación con tres funciones: preprocesamiento de datos, ajuste del modelo y recomendación de artículos. El tiempo de ejecución se calculó para el tiempo total necesario para calcular el modelo (en horas). Se calculó el pico de memoria. en GB, y se consideró el uso máximo de memoria al ejecutar una función determinada.

Esta evaluación se realizó utilizando la biblioteca tracemalloc (https://docs.python.org/3/biblioteca/tracemalloc.html, consultado el 29 de mayo de 2024).

5. Evaluación de laboratorio

Esta sección describe la evaluación de laboratorio de los métodos discutidos en el conjunto de datos desarrollado. Utilizamos los hiperparámetros de mejor rendimiento que se encuentran en la sección anterior. Cada modelo se entrenó con todo el conjunto de datos de entrenamiento y validación, y se produjeron recomendaciones para los 619.389 usuarios del conjunto de prueba. Para presentar mejor los valores de Para cada métrica fuera de línea, comparamos los métodos descritos con métodos simples y no personalizados. líneas de base: el enfoque de producto más popular y recomendaciones aleatorias.

5.1. Exactitud

Todas las métricas de esta sección consideran las primeras diez recomendaciones, por ejemplo, precisión@10, recordar@10. Los valores de métricas más altos indican una mayor calidad de las recomendaciones. Los valores no debe compararse directamente con los resultados obtenidos en otros conjuntos de datos porque Las métricas dependen en gran medida de la distribución del conjunto de datos (por ejemplo, alta escasez) y la estrategia de división tren/prueba [55].

5.1.1. Evaluación de precisión

La Tabla 7 presenta los resultados de la evaluación. La mayoría de las diferencias observadas son estadísticamente significativo debido al gran número de usuarios evaluados. Desarrollamos más sobre la significancia estadística de los resultados en la Sección 5.1.2.

Tabla 7. Precisión: resultados de la evaluación. Todas las métricas presentadas fueron descritas por Tamm et al. [23]. Para Para la métrica mAP, utilizamos la variante con = min(,).

Métrico	RP3Beta	SLIM	ALS	Prod2Vec	LightFM	Más popular	Aleatorio
precisión 0,0484	0,0472	0,0434	0,0368	0,0359	0,0012	0.00006	
recuperación 0,0783	0,0736	0,0657	0,0580	0,0564	0,0012	0.00005	
ndcg 0,0759 mAP	0,0721	0,0657	0,0567	0,0545	0,0016	0.00007	
0,0393 MRR 0,1365	0,0365	0,0329	0,0282	0,0264	0,0006	0.00002	
LAUC 0,5391 HR 0,3131	0,1314	0,1230	0,1065	0,1034	0,0038	0.00019	
	0,5368	0,5328	289 0,3066	0,5281	0,5006	0,49999	
	0,2878	0,2537		0,2547	0,0112	0.00059	

Fuente: estudio propio.

Nuestros enfoques superan significativamente las recomendaciones de artículos aleatorios y más populares . El bajo rendimiento del enfoque más popular se debe a la naturaleza de clasificados, principalmente el dominio del trabajo, donde los usuarios están más interesados en un área específica ubicación y categoría. Creación de sistemas de recomendación más sofisticados y personalizados es razonable en tal escenario.

Está demostrado que RP3Beta supera a otros enfoques en términos de precisión métrica. Creemos que esto está relacionado con la gran escasez de nuestro conjunto de datos. RP3Beta calcula las recomendaciones de manera determinista (aprovechando rutas de longitud tres en un usuario-elemento gráfica bipartita). Todos los demás enfoques utilizan técnicas de aprendizaje automático para encontrar usuarios. representaciones (ALS, LightFM), representaciones de elementos (ALS, LightFM, Prod2Vec) o directas. similitudes entre elementos (SLIM), que pueden ocurrir en los casos en que los usuarios o elementos tienen un bajo número de interacciones.

Machine Translated by Google

5.1.2. Comparación estadística de Precision@10

Presentamos una comparación estadística detallada para nuestra métrica principal, precision@10, para identificar diferencias entre los métodos. Para empezar, probamos la hipótesis nula de que todos los métodos funcionan igual y las diferencias observadas son meramente aleatorias (prueba ómnibus). La prueba de Friedman [57,58] con la extensión de Iman y Davenport [59] es probablemente la prueba general más popular y suele ser una buena opción cuando se comparan más de cinco algoritmos diferentes [60,61]. Sea el rango del ésimo de métodos sobre el ésimo de muestras y

$$= \frac{1}{} \sum_{=1} .$$

En nuestro caso, el número de muestras, es el número de usuarios en el conjunto de prueba, = 619,389. La prueba compara los rangos medios de los métodos y se basa en las siguientes estadísticas:

$$= \frac{(-1)\ ^{2}}{(-1) -\ ^{2}},$$

dónde

$$^{2} = \frac{12}{(+1)} \sum_{=1} \ ^{2} - 3\,(+1)$$

es el estadístico de Friedman, que tiene la distribución con − 1 y (− 1) (− 1) grados de libertad. El valor de esta prueba es igual a 0. El valor obtenido indica que podemos rechazar con seguridad la hipótesis nula de que todos los algoritmos funcionan igual. Por lo tanto, podemos proceder con las pruebas post hoc para detectar diferencias significativas por pares entre todos los métodos. Demšar [62] propone el uso de la prueba de Nemenyi [63], que compara todos los algoritmos por pares. Para un nivel de significancia, la prueba determina la diferencia crítica (CD). Si la diferencia entre las clasificaciones promedio de dos algoritmos es mayor que

$$CD = \sqrt{\quad} \quad \frac{\quad}{(+ 1)},$$

Se rechaza la hipótesis nula de que los algoritmos tienen el mismo rendimiento (sobre el Es basado estadístico de rango estudentizado dividido por √ 2). Demšar [62] propuso un gráfico para comprobar las diferencias (el gráfico CD visualmente). Los algoritmos que no están unidos por una línea pueden considerarse diferentes en el gráfico.

En nuestro caso, con una significación de = 0,05, dos algoritmos cualesquiera con una diferencia en el el rango medio superior a 0,0114 se considerará no igual (Figura 5).

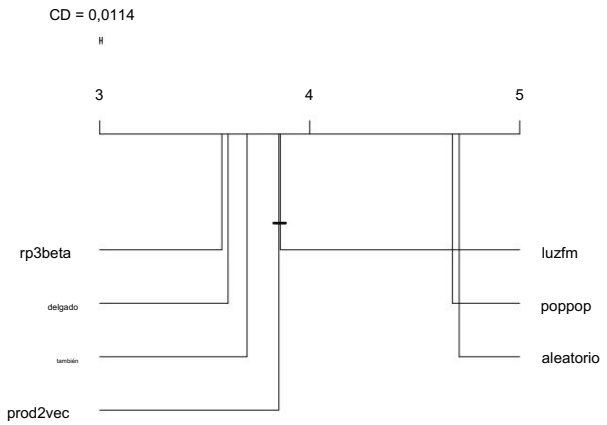


Figura 5. Gráfico de diferencia crítica (para mayor precisión). Fuente: estudio propio.

Machine Translated by Google

5.1.3. Precisión para usuarios con diferentes números de interacciones

La única información que tenemos sobre nuestros usuarios son sus interacciones. En la Figura 6, examinamos cómo la cantidad de elementos con los que ha interactuado un usuario influye en nuestra métrica principal, precision@10. Dividimos a nuestros usuarios en diez grupos de tamaño similar según la cantidad de interacciones.

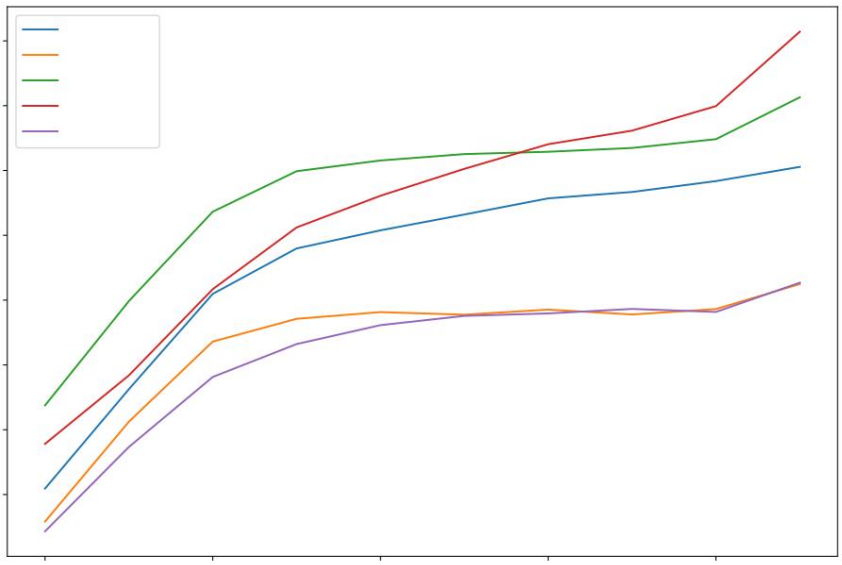


Figura 6. Precisión@10 para cada modelo, dependiendo del número de elementos con los que interactuó el usuario. Se ve mejor en color. Fuente: estudio propio.

Podemos ver que el orden de los modelos ordenados por precisión@10 no depende del grupo, excepto que SLIM tuvo un mejor desempeño que RP3Beta para usuarios con al menos 22 interacciones. La diferencia es estadísticamente significativa para cada grupo de usuarios (que se analiza en la Sección 5.1.4). El modelo RP3Beta puede verse como un caso particular del enfoque de filtrado colaborativo basado en elementos, que utiliza una medida de similitud determinista entre elementos [64]. Por otro lado, SLIM utiliza métodos de aprendizaje automático para conocer similitudes.
Suponemos que dichas puntuaciones de similitud aprendidas están menos sesgadas pero tienen una mayor varianza, lo que conduce a un mejor rendimiento para los usuarios con muchas interacciones porque el promedio se realiza sobre un número más significativo de puntuaciones.

5.1.4. Evaluación estadística de la precisión para usuarios con diferentes números de interacciones En esta subsección, analizamos la diferencia entre los modelos RP3Beta y SLIM.
dependiendo del número de interacciones del usuario, como se observa en la Figura 6.

Para comparar estadísticamente dos métodos en múltiples conjuntos de datos, Demšar [62] recomienda la prueba de rangos con signo de Wilcoxon [65]. La prueba de rangos con signos de Wilcoxon es una alternativa no paramétrica a la prueba pareada, que clasifica las diferencias en el rendimiento de dos algoritmos para cada conjunto de datos, ignorando los signos. Compara los rangos de las diferencias positivas y negativas.

La Tabla 8 muestra que la diferencia entre los modelos RP3Beta y SLIM es estadísticamente significativo para cada grupo de usuarios.

Machine Translated by Google

Tabla 8. Resultados de la prueba de rangos con signo de Wilcoxon entre los modelos RP3Beta y SLIM dependiendo del Número de elementos con los que interactuó el usuario.

Papelera	Valor p
[1,0, 3,0)	0
[3,0, 5,0)	0
[5,0, 8,0)	0
[8,0, 11,0)	0
[11,0, 16,0)	0
[16,0, 22,0)	1,25 × 10−6
[22,0, 31,0)	9,27 × 10−7
[31,0, 45,0)	0
[45,0, 74,0)	0
[74,0, 852,0]	0

Fuente: estudio propio.

5.2. Diversidad

En la Tabla 9 podemos observar que Prod2Vec y LightFM proporcionan la mayor diversidad después de excluir las recomendaciones aleatorias (que deberían tener la mayor diversidad). El Las diversidades de los modelos más precisos, RP3Beta, SLIM y ALS, son similares, excepto por el caso de la menor cobertura de pruebas de ALS. La relación entre cobertura de prueba y precisión@10 se muestra en la Figura 7.

Tabla 9. Diversidad: resultados de la evaluación.

Métrico	RP3Beta	SLIM	ALS	Prod2Vec	LightFM	Más Popular	Aleatorio
cobertura de prueba	0,5725	0,5171	0,3038	0,7400	0,7031	0,0002	0.9778
Shannon	9,5271	9,6728	9,6270	10,4031	10,1385	2,3296	11.7267
Gini	0,9083	0,9029	0,9120	0,7956	0,8397	0,9999	0.1159

Fuente: estudio propio.

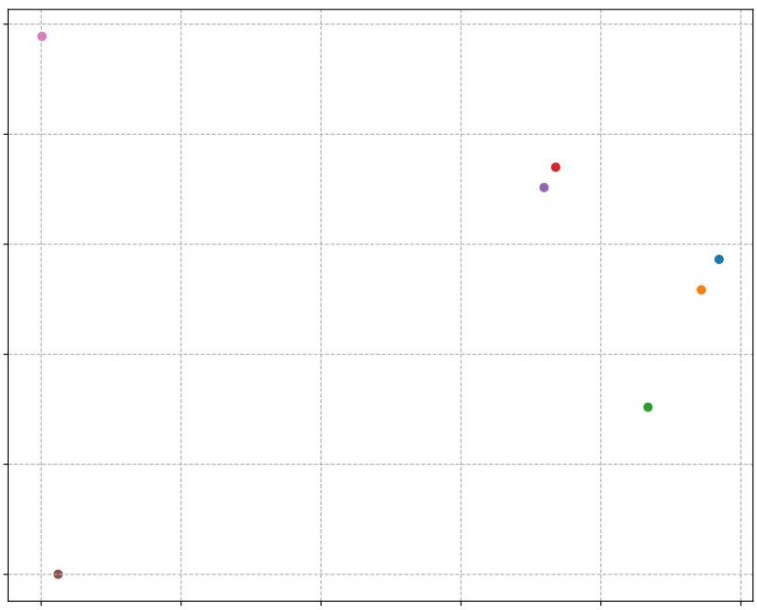


Figura 7. Cobertura de prueba versus precisión@10 para los modelos considerados. Fuente: estudio propio.

Machine Translated by Google

5.3. Superposición de métodos

En nuestra investigación, nos centramos en métodos que vale la pena probar con usuarios reales. Por lo tanto, estudiamos la superposición entre las recomendaciones ofrecidas por los métodos implementados con respecto a los pares usuario-elemento (coeficiente de superposición [66]). Esperamos más significativos diferencias en las recomendaciones al comparar métodos con un bajo solapamiento.

Los resultados de este experimento se presentan en la Tabla 10. RP3Beta y SLIM ofrecen recomendaciones similares. Aunque se calculan de forma diferente, utilizan un elemento escaso matriz de similitud. El grupo de comparación con ELA tiene similitudes medias con otros métodos. Los más diferentes desde la perspectiva de la superposición son también los modelos más diversos, a saber, Prod2Vec y LightFM. La baja superposición de ALS y LightFM enfatiza la Importancia de elegir la función de pérdida en los enfoques de factorización matricial.

Tabla 10. Superposición de modelos.

Modelo	RP3Beta	DELGADO	ELA	Prod2Vec	LuzFM
RP3Beta	100%	73%	53%	37%	38%
SLIM	73%	100%	50%	35%	35%
ALS	53%	50%	100%	38%	37%
Prod2Vec	37%	35%	38%	100%	28%
LightFM	38%	35%	37%	28%	100%

Fuente: estudio propio.

5.4. Evaluación de Eficiencia

Los resultados de la evaluación de eficiencia se presentan en la Figura 8. RP3Beta, ALS y LightFM supera a SLIM y Prod2Vec en cuanto a tiempo de ejecución, mientras que Prod2Vec es el que requiere menos memoria. Para volver a entrenar el modelo con frecuencia, configuramos el máximo aceptable El tiempo de ejecución fue de 3 h, que fue satisfecho por ALS, LightFM y RP3Beta. de un costo perspectiva, la utilización de memoria aceptable se configuró en 110 GB, que todos los modelos cumplido. Podemos observar que nuestros modelos podrían entrenarse incluso en una sola computadora portátil.

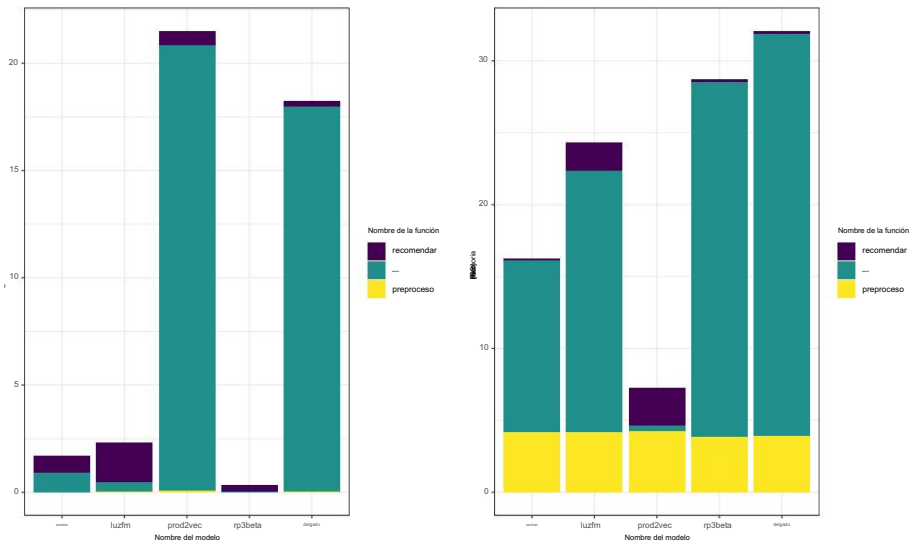


Figura 8. Tiempo de ejecución y utilización de memoria. Se ve mejor en color. Fuente: estudio propio.

5.5. Resumen

La investigación de laboratorio nos permitió seleccionar modelos para probarlos en línea con OLX. usuarios. En primer lugar, elegimos el modelo RP3Beta para las pruebas online porque es el mejor enfoque. en cuanto a precisión y tiempo de ejecución. El consumo de memoria relativamente alto sigue siendo lo suficientemente bajo como para que el modelo sea probado en producción. Investigando el impacto de este La diversidad relativamente baja del método puede ser una línea interesante de investigación futura.

Machine Translated by Google

SLIM es el segundo mejor modelo en términos de precisión@10. Sin embargo, no seleccionamos este método para la evaluación en línea debido a su baja eficiencia y alta superposición con el modelo RP3Beta ya seleccionado. Mejorar la eficiencia de la implementación de SLIM podría cambiar esta decisión.

Entre otros modelos, la máxima precisión @10 la consigue ALS. Además, ALS ya estaba implementado y utilizado para recomendaciones laborales en OLX; por lo tanto, decidimos incluirlo en la comparación en línea.

Aunque Prod2Vec y LightFM producen las recomendaciones más diversas, decidimos no probarlas online debido a la precisión@10 y la eficiencia significativamente peores de Prod2Vec.

6. Evaluación en línea

Para evaluar la efectividad de los métodos seleccionados, realizamos dos pruebas A/B en línea con usuarios de OLX Jobs. Nos centramos en los usuarios que habían visitado recientemente anuncios de empleo en nuestra plataforma. Les enviamos correos electrónicos con diez anuncios de trabajo recomendados y, cuando un usuario había instalado una aplicación OLX, también se enviaba una notificación automática con un anuncio de trabajo recomendado . Luego, observamos si el usuario solicitó algún trabajo dentro de las siguientes 48 h (usuario convertido).

6.1. Impacto del modelo ALS

El primer experimento tenía como objetivo responder a la pregunta: ¿la introducción del método de recomendación aumenta el número de usuarios que solicitan empleo? En esta prueba, dividimos a los usuarios en dos grupos: un grupo de control sin recomendaciones y un grupo con recomendaciones generadas mediante el modelo ALS. Solo ≈ 10 % de los usuarios fueron asignados al grupo de control porque el modelo ALS ya estaba implementado y utilizado para recomendaciones laborales en OLX antes de la prueba. Preferimos recopilar una muestra mínima realizando una prueba más extensa para observar un impacto a largo plazo en nuestros usuarios. La prueba se llevó a cabo durante 25 días en marzo de 2021. Los resultados se presentan en la Tabla 11. La significación estadística de la ventaja de la ELA sobre el grupo de control se examinó mediante la prueba de chi-cuadrado y se encontró que el valor era igual a 0. Este experimento confirmó nuestra hipótesis de que las recomendaciones afectan la actividad, ya que el porcentaje de usuarios convertidos después de recibir una comunicación aumentó significativamente en (16,83% − 15,98%)/15,98% ≈ 5,3%.

El aumento observado se traduce en cientos de usuarios adicionales que solicitan empleo a través de OLX Jobs diariamente.

Tabla 11. Comparación de actividad con o sin recomendaciones.

Variante	Usuarios	% de usuarios convertidos
control	129.308	15,98%
ELA	1.170.262	16,83%

Fuente: estudio propio.

6.2. Comparación de los modelos ALS y RP3Beta

En el segundo experimento, probamos si el mejor modelo de las pruebas de laboratorio superaba al ALS. Dividimos a nuestros usuarios en tres grupos y recibimos recomendaciones de diferentes sistemas de recomendación: ALS, RP3Beta y una variante mixta. Generamos la mitad de las recomendaciones con ALS y la otra mitad con RP3Beta. El segundo experimento se realizó durante 28 días en marzo y abril de 2021. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

El porcentaje de usuarios convertidos se calcula aquí en relación con todos los usuarios; sin embargo, cambiar el sistema de recomendaciones no afectó a los usuarios que no abrieron el mensaje. Decidimos filtrarlos porque su comportamiento añadía ruido innecesario a nuestros datos. La Tabla 13 presenta el impacto en los usuarios que abrieron el mensaje. La ventaja de RP3Beta sobre ALS es estadísticamente significativa (valor p ≈ 10-6). La diferencia entre las variantes RP3Beta y ALS+RP3Beta no es estadísticamente significativa (el valor de p es 0,19).

Machine Translated by Google

Tabla 12. Comparación de diferentes métodos de recomendación.

Variante	Usuarios	% de usuarios convertidos
ELA	343.892	15,25%
RP3Beta	345.273	15,40%
ELA+RP3Beta	343.896	15,30%

Fuente: estudio propio.

Tabla 13. Comparación de diferentes métodos de recomendación para los usuarios que abrieron el mensaje.

Variante	Usuarios	% de usuarios convertidos
ELA	44.775	19,66%
RP3Beta	46.097	20,94%
ELA+RP3Beta	45.469	20,59%

Fuente: estudio propio.

De los usuarios que abrieron el mensaje observamos 1,28 pp (puntos porcentuales) más usuarios convertidos de RP3Beta que de ALS. Dado que la tasa de apertura de mensajes fue del 13,2%, esto equivale a un aumento de 1,28 × 0,132 ≈ 0,17 pp de todos los usuarios objetivo. Basado en el Según los resultados del primer experimento, la ELA supone un aumento de 0,85 pp con respecto al grupo de control. Esto significa que reemplazar ALS con RP3Beta aumenta nuestro impacto en todos los usuarios objetivo en aproximadamente 0,17/0,85 = 20%.

6.3. Discusión

Hemos demostrado que enviar recomendaciones laborales desde el modelo ALS aumenta la número de usuarios que respondieron a anuncios de empleo en más del 5%. Además, RP3Beta significativamente supera a la ELA.

Además, realizamos otra prueba A/B online comparando el modelo RP3Beta con una variante en la que reemplazamos la mitad de las recomendaciones de RP3Beta con recomendaciones generado a partir del sistema de recomendación híbrido de aprendizaje profundo utilizado en OLX (https://tech.olx.com/item2vec-neural-item-embeddings-to-enhance-recommendations-1fd948a6f293, consultado el 29 de mayo de 2024). Decidimos no describir esa prueba en este artículo, ya que este trabajo se centra en enfoques de filtrado colaborativo. También queríamos mantener nuestros resultados reproducibles en el conjunto de datos publicado. Desafortunadamente, no pudimos publicar todas las funciones. utilizado por nuestro modelo interno. No observamos ninguna mejora con respecto a RP3Beta, aunque el segundo modelo utiliza conocimientos adicionales sobre anuncios de empleo. Por lo tanto, nosotros confirmó que un modelo simple adecuadamente determinado y ajustado podría superar a más Soluciones profundas avanzadas. Esto es consistente con los resultados de Dacrema et al. [64] y Anelli et al. [30], que comparó varios enfoques no neuronales, incluido RP3Beta, con Modelos neuronales más avanzados.

La eficiencia del modelo RP3Beta permite a OLX Jobs entrenarlo desde cero múltiples veces al día con costos muy bajos (en una CPU). El filtrado colaborativo de última generación El modelo en OLX Jobs se utiliza actualmente para generar correos electrónicos y enviar recomendaciones para nuestros usuarios. Recientemente adaptamos este modelo para ofrecer recomendaciones in situ en tiempo real, considerando las interacciones recientes del usuario con elementos [67]. También propusimos que el P3 aprendiera a modelo de rango (P3LTR) [68], una generalización del RP3Beta, donde aprendemos la importancia de relaciones usuario-elemento basadas en tipos de interacciones pasadas usuario-elemento y marcas de tiempo.

En este trabajo, hemos abordado la brecha de investigación de la falta de comparaciones de enfoques clásicos de filtrado colaborativo en el ámbito laboral al proporcionar investigación de laboratorio sobre un conjunto de datos del mundo real y una evaluación en línea con millones de usuarios. Además, hemos hecho públicos el código fuente para la evaluación fuera de línea y el conjunto de datos. disponible. Alentamos a otros investigadores a desarrollar nuevos métodos de recomendación para ayudar a los usuarios a encontrar su trabajo ideal más rápidamente.

Los métodos considerados en este trabajo solo requieren tripletes (usuario, elemento y marca de tiempo) como datos de entrada para capacitación y evaluación; por lo tanto, se pueden aplicar en varios dominios,

Machine Translated by Google

incluso para conjuntos de datos que constan de decenas de millones de interacciones. Esperamos buenos resultados en el dominio de clasificados en base a nuestros resultados iniciales obtenidos en otras categorías de OLX.

7. Resumen

Este artículo ha abordado el tema de las recomendaciones de empleo en anuncios clasificados online, utilizando el ejemplo de OLX Jobs. Realizamos una evaluación exhaustiva de enfoques que representan diferentes familias de métodos de recomendación.

Durante la investigación de laboratorio, demostramos que RP3Beta, SLIM y ALS funcionan significativamente mejor que LightFM y Prod2Vec. También descubrimos que Prod2Vec ofrece la diversidad más extraordinaria, que puede ser necesaria cuando se trabaja en la novedad de las recomendaciones. Además, examinamos cuán similares son las recomendaciones generadas por diferentes modelos.

También realizamos una evaluación enviando millones de mensajes a usuarios en línea. Las pruebas A/B se realizaron utilizando ALS y RP3Beta. Los resultados de estas pruebas demostraron que el envío de recomendaciones laborales generadas por estos modelos aumenta el número de usuarios que contactan con anunciantes de OLX Jobs. Con RP3Beta disponible en el entorno de producción, mejoramos nuestra efectividad en un 20% (teniendo en cuenta las reacciones de los usuarios).

Al evaluar los métodos desde la perspectiva de los anuncios clasificados, un modelo que recomendaba los artículos más populares (aún no vistos) no era adecuado para las recomendaciones de empleo. También se agregó un modelo de recomendación basado en recomendaciones aleatorias para comparar y demostrar la ventaja de los métodos investigados.

Otro resultado importante de esta investigación es el conjunto de datos, que permitirá realizar más investigaciones sobre recomendaciones para necesidades clasificadas.

Una de las debilidades de nuestro trabajo es la falta de comparación con redes neuronales profundas (DNN) o redes neuronales de gráficos (GNN). Para tales métodos, satisfacer nuestras limitaciones de tiempo sin una infraestructura más costosa (por ejemplo, con GPU) es un desafío. Relajar nuestras restricciones o comparar las DNN o GNN más eficientes sería interesante para trabajos futuros. Otra debilidad es que la comparación se realiza solo en un único conjunto de datos. El tamaño del conjunto de datos tiene un impacto significativo en la selección del método. Sería interesante comparar los mismos métodos con conjuntos de datos de diferentes tamaños, ya sean subconjuntos del conjunto de datos original u otros conjuntos de datos del ámbito laboral (por ejemplo, de diferentes mercados en los que opera OLX). Además, sería interesante explorar la correlación entre diversidad y resultados en línea, con el objetivo de desarrollar una métrica fuera de línea que se alinee mejor con los objetivos

Contribuciones de los autores: Conceptualización, RK; metodología, RK y TG; software, RK y VD; validación, RK, VD, TG y AF; análisis formal, RK y TG; investigación, RK y TG; recursos, RK; curación de datos, RK y VD; redacción: preparación del borrador original, RK, AF y TG; redacción: revisión y edición, RK, AF y TG; visualización, RK y TG; supervisión, TG y AF; administración del proyecto, RK Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: Conjunto de datos: https://www.kaggle.com/datasets/olxdatascience/olx-jobs-interactions , consultado el 29 de mayo de 2024; código fuente: https://github.com/rob-kwiec/olx-jobs-recomendaciones , consultado el 29 de mayo de 2024.

Conflictos de intereses: Los autores Robert Kwieci ´nski, Agata Filipowska y Viacheslav Dubrov fueron empleados de la empresa OLX Group. El resto del autor declara que la investigación se realizó en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un potencial conflicto de intereses.

Referencias

1. Davis, M. ¿Qué son los clasificados online? Revista Big Easy, 4 de enero de 2021. 2.
Jones, S. Clasificados en línea; Proyecto Pew Internet & American Life: Washington, DC, EE. UU., 2009.
3. Gourville, J.; Soman, D. Exceso de elección y tipo de surtido: cuándo y por qué la variedad fracasa. Marca. Ciencia. 2005, 24, 382–395. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

4. Chernev, A. Cuando más es menos y menos es más: el papel de la disponibilidad y el surtido de puntos ideales en la elección del consumidor. J. Consumir. Res. 2003, 30, 170–183. [Referencia cruzada]
5. Boatwright, P.; Nunes, J. Reducción del surtido: un enfoque basado en atributos. J. Marcos. 2001, 65, 50–63. [Referencia cruzada]
6. Gómez-Uribe, C.; Hunt, N. El sistema de recomendación de Netflix. Transmisión ACM. Gestionar. Inf. Sistema. 2015, 6, 1–19. [Referencia cruzada]
7. Smith, B.; Linden, G. Dos décadas de sistemas de recomendación en Amazon.com. Computación de Internet IEEE. 2017, 21, 12-18. [Referencia cruzada]
8. Aggarwal, CC Recommender Systems: The Textbook, 1ª ed.; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2016. 9. Li, S.; Karahanna, E. Sistemas de recomendación en línea en un contexto de comercio electrónico B2C: una revisión y direcciones futuras. J. Asociación. Inf. Sistema. 2015, 16, 72-107. [Referencia cruzada]
10. Twardowski, B. Modelado de información contextual en sistemas de recomendación conscientes de sesiones con redes neuronales. En Actas de la Décima Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Boston, MA, EE. UU., 15 a 19 de septiembre de 2016; págs. 273–276. [Referencia cruzada]
11. Alotaibi, S. Una encuesta sobre sistemas de recomendación de empleo. En t. J. Física. Ciencia. 2012, 7, 5127–5142. [Referencia cruzada]
12. Abel, F.; Benczúr, A.; Kohlsdorf, D.; Larson, M.; Pálovics, R. RecSys Challenge'16: Actas del Recommender Systems Challenge; Association for Computing Machinery: Nueva York, NY, EE. UU., 2016.
13. Abel, F.; Deldjoo, Y.; Elahi, M.; Kohlsdorf, D. RecSys Challenge'17: Actas del Recommender Systems Challenge 2017; Association for Computing Machinery: Nueva York, NY, EE. UU., 2017.
14. Li, S.; Shi, B.; Yang, J.; Yan, J.; Wang, S.; Chen, F.; Él, Q. Profunda comprensión laboral en LinkedIn. En actas de la 43.ª Conferencia internacional ACM SIGIR sobre investigación y desarrollo en recuperación de información, virtual, 25 a 30 de julio de 2020; págs. 2145-2148. [Referencia cruzada]
15. Zhu, G.; Chen, Y.; Wang, S. Recomendaciones de trabajos y cursos personalizados habilitadas por Graph-Community con datos entre dominios Integración. Sostenibilidad 2022, 14, 7439. [CrossRef]
16. Lacic, E.; Reiter-Haas, M.; Kowald, D.; Reddy Dareddy, M.; Cho, J.; Lex, E. Uso de codificadores automáticos para recomendaciones de trabajos basadas en sesiones. daciones. Modelo de usuario. Adaptación del usuario. Interactuar. 2020, 30, 617–658. [Referencia cruzada]
17. Pazzani, MJ; Billsus, D. Sistemas de recomendación basados en contenido. En La Web Adaptativa: Métodos y Estrategias de la Web Personalización; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2007; págs. 325–341. [Referencia cruzada]
18. Chen, R.; Hua, Q.; Chang, YS; Wang, B.; Zhang, L.; Kong, X. Una encuesta sobre sistemas de recomendación basados en filtrado colaborativo: de métodos tradicionales a métodos híbridos basados en redes sociales. Acceso IEEE 2018, 6, 64301–64320. [Referencia cruzada]
19. Wang, X.; Él, X.; Wang, M.; Feng, F.; Chua, TS Filtrado colaborativo de gráficos neuronales. En Actas de la 42.ª Conferencia Internacional ACM SIGIR sobre Investigación y Desarrollo en Recuperación de Información, París, Francia, 21 a 25 de julio de 2019; págs. 165-174. [Referencia cruzada]
20. Schafer, JB; Frankowski, D.; Herlocker, J.; Sen, S. Sistemas colaborativos de recomendación de filtrado. En La Web Adaptable; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2007; págs. 291–324. [Referencia cruzada]
21. Takács, G.; Pilászy, I.; Nemeth, B.; Tikk, D. Enfoques de filtrado colaborativo escalables para grandes sistemas de recomendación. J. Mach. Aprender. Res. 2009, 10, 623–656. [Referencia cruzada]
22. Jawaheer, G.; Szomszor, M.; Kostkova, P. Comparación de comentarios implícitos y explícitos de un servicio de recomendación de música en línea. En Actas del 1er Taller Internacional sobre Heterogeneidad y Fusión de la Información en Sistemas de Recomendación, Barcelona, España, 26 de septiembre de 2010; págs. 47–51. [Referencia cruzada]
23. Tamm, YM; Damdinov, R.; Vasilev, A. Métricas de calidad en sistemas de recomendación: ¿calculamos métricas de forma coherente? En Actas de la Decimoquinta Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Ámsterdam, Países Bajos, 27 de septiembre a 1 de octubre de 2021; págs. 708–713. [Referencia cruzada]
24. Kaminskas, M.; Bridge, D. Diversidad, casualidad, novedad y cobertura: una encuesta y análisis empírico de objetivos más allá de la precisión en sistemas de recomendación. Transmisión ACM. Interactuar. Intel. Sistema. 2016, 7, 1–42. [Referencia cruzada]
25. Kunaver, M.; Pozrl, T. Diversidad en sistemas de recomendación, una encuesta. Sistema basado en el conocimiento. 2017, 123, 154-162. [Referencia cruzada]
26. Ge, M.; Delgado-Battenfeld, C.; Jannach, D. Más allá de la precisión: evaluación de los sistemas de recomendación por cobertura y casualidad. En Actas de la Cuarta Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Barcelona, España, 26 a 30 de septiembre de 2010; págs. 257–260. [Referencia cruzada]
27. Mogenet, A.; Pham, bronceado; Kazama, M.; Kong, J. Predicción del rendimiento en línea de los sistemas de recomendación de empleo con evaluación fuera de línea. En Actas de la 13.ª Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Copenhague, Dinamarca, 16 a 20 de septiembre de 2019; págs. 477–480. [Referencia cruzada]
28. Anelli, VW; Bellogín, A.; Di Noia, T.; Jannach, D.; Pomo, C. Algoritmos de recomendación Top-N: una búsqueda de lo último en tecnología. En actas de la 30.ª Conferencia ACM sobre modelado, adaptación y personalización de usuarios, Barcelona, España, 4 a 7 de julio de 2022; págs. 121-131. [Referencia cruzada]
29. Dacrema, MF; Boglio, S.; Cremonesi, P.; Jannach, D. Un análisis inquietante de la reproducibilidad y el progreso del recomendador Investigación de sistemas. Transmisión ACM. Inf. Sistema. 2021, 39, 1–49. [Referencia cruzada]
30. Anelli, VW; Bellogín, A.; Di Noia, T.; Pomo, C. Reimaginando la comparación entre el filtrado colaborativo neuronal y la factorización matricial. En Actas de la Decimoquinta Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Ámsterdam, Países Bajos, 27 de septiembre a 1 de octubre de 2021; págs. 521–529. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

31. Zhu, J.; Dai, Q.; Su, L.; Mar.; Liu, J.; Cai, G.; Xiao, X.; Zhang, R. BARS: Hacia una evaluación comparativa abierta para sistemas de recomendación. En actas de la 45.ª Conferencia Internacional ACM SIGIR sobre Investigación y Desarrollo en Recuperación de Información, Madrid, España, 11 a 15 de julio de 2022; págs. 2912-2923. [Referencia cruzada]
32. Dong, Y.; Li, J.; Schnabel, T. Cuando lo más nuevo no es mejor: ¿El aprendizaje profundo realmente se beneficia de la recomendación de la retroalimentación implícita? En actas de la 46.ª Conferencia Internacional ACM SIGIR sobre Investigación y Desarrollo en Recuperación de Información, Taipei, Taiwán, 23 a 27 de julio de 2023; págs. 942–952. [Referencia cruzada]
33. Anelli, VW; Malitesta, D.; Pomo, C.; Bellogin, A.; Di Sciascio, E.; Di Noia, T. Desafiando el mito del filtrado colaborativo de gráficos: un análisis razonado y basado en la reproducibilidad. En actas de la 17.ª Conferencia ACM sobre sistemas de recomendación, Singapur, 18 a 22 de septiembre de 2023; págs. 350–361. [Referencia cruzada]
34. Koren, Y.; Bell, R.; Volinsky, C. Técnicas de factorización matricial para sistemas de recomendación. Computadora 2009, 42, 30–37. [Referencia cruzada]
35. Kula, M. Incorporaciones de metadatos para recomendaciones de arranque en frío de usuarios y elementos. arXiv 2015, arXiv:1507.08439.
36. Rendle, S.; Freudenthaler, C.; Gantner, Z.; Schmidt-Thieme, L. BPR: Clasificación bayesiana personalizada a partir de comentarios implícitos. arXiv 2012, arXiv:1205.2618 37. Weston, J.; Bengio, S.; Usunier, N.
Wsabie: Ampliación a anotación de imágenes de vocabulario amplio. En Actas de la Vigésima Segunda Conferencia Internacional Conjunta sobre Inteligencia Artificial, Barcelona, España, 16 a 22 de julio de 2011; págs. 2764–2770.
38. Weston, J.; Sí, H.; Weiss, RJ Aprendiendo a clasificar las recomendaciones con la estadística de pérdida de orden K. En Actas de la Séptima Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Hong Kong, China, 12 a 16 de octubre de 2013; págs. 245–248. [Referencia cruzada]
39. Hu, Y.; Koren, Y.; Volinsky, C. Filtrado colaborativo para conjuntos de datos de retroalimentación implícita. En actas del octavo IEEE de 2008 Conferencia internacional sobre minería de datos, Pisa (Italia), 15 a 19 de diciembre de 2008; págs. 263–272. [Referencia cruzada]
40. Takács, G.; Pilászy, I.; Tikk, D. Aplicaciones del método de gradiente conjugado para el filtrado colaborativo de retroalimentación implícita. En Actas de la Quinta Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Chicago, IL, EE. UU., 23 a 27 de octubre de 2011; págs. 297–300. [Referencia cruzada]
41. Ning, X.; Karypis, G. SLIM: Métodos lineales dispersos para sistemas de recomendación Top-N. En Actas de la 11.ª Conferencia Internacional sobre Minería de Datos del IEEE de 2011, Vancouver, BC, Canadá, 11 a 14 de diciembre de 2011; págs. 497–506. [Referencia cruzada]
42. Christoffel, F.; Paudel, B.; Newell, C.; Bernstein, A. Blockbusters y Wallflowers: recomendaciones precisas, diversas y escalables con paseos aleatorios. En Actas de la 9ª Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Viena, Austria, 16 a 20 de septiembre de 2015; págs. 163-170. [Referencia cruzada]
43. Cooper, C.; Lee, SH; Radzik, T.; Siantos, Y. Paseos aleatorios en sistemas de recomendación: cálculos exactos y simulaciones. En Actas de la 23.ª Conferencia Internacional sobre la World Wide Web, Nueva York, NY, EE. UU., 7 a 11 de abril de 2014; págs. 811–816. [Referencia cruzada]
44. Grbovic, M.; Radosavljevic, V.; Djuric, N.; Bhamidipati, N.; Savla, J.; Bhagwan, V.; Sharp, D. Comercio electrónico en su bandeja de entrada: recomendaciones de productos a escala. En Actas de la 21ª Conferencia Internacional ACM SIGKDD sobre Descubrimiento de Conocimiento y Minería de Datos, Sydney, NSW, Australia, 10 a 13 de agosto de 2015; págs. 1809–1818. [Referencia cruzada]
45. Barkan, O.; Koenigstein, N. ITEM2VEC: Incrustación de elementos neuronales para filtrado colaborativo. En actas del 26.º taller internacional del IEEE de 2016 sobre aprendizaje automático para el procesamiento de señales (MLSP), Vietri sul Mare, Italia, 13 a 16 de septiembre de 2016; págs. 1–6. [Referencia cruzada]
46. Mikolov, T.; Sutskever, I.; Chen, K.; Corrado, G.; Dean, J. Representaciones distribuidas de palabras y frases y su composicionalidad. En Actas de la 26.ª Conferencia Internacional sobre Sistemas de Procesamiento de Información Neural: Volumen 2, Red Hook, Nueva York, EE. UU., 5 a 10 de diciembre de 2013; págs. 3111–3119.
47. De Ruijt, C.; Bhulai, S. Sistemas de recomendación de empleo: una revisión. arXiv 2021, arXiv:2111.13576.
48. Kula, M. LightFM: Repositorio Github. 2023. Disponible en línea: https://github.com/lyst/lightfm (consultado el 29 de mayo de 2024).
49. Frederickson, B. ALS—Repositorio Github. 2022. Disponible en línea: https://github.com/benfred/implicit/blob/main/implicit/als.py (consultado el 29 de mayo de 2024).
50. Levy, M.; Grisel, O. SLIM: Repositorio Github. 2014. Disponible en línea: https://github.com/Mendeley/mrec/blob/master/ mrec/item_similarity/slim.py (consultado el 29 de mayo de 2024).
51. Quadrana, M. SLIM—Repositorio Github. 2021. Disponible en línea: https://github.com/MaurizioFD/RecSys2019_DeepLearning_ Evaluación/blob/master/SLIM_ElasticNet/SLIMElasticNetRecommender.py (consultado el 29 de mayo de 2024).
52. Bernardis, C. RP3Beta—Repositorio Github. 2021. Disponible en línea: https://github.com/MaurizioFD/RecSys2019_DeepLearning_ Evaluación/blob/master/GraphBased/RP3betaRecommender.py (consultado el 29 de mayo de 2024).
53. Paudel, B.; Christoffel, F.; Newell, C.; Bernstein, A. Recomendaciones actualizables, precisas, diversas y escalables para aplicaciones interactivas Aplicaciones. Transmisión ACM. Interactuar. Intel. Sistema. 2016, 7, 1–34. [Referencia cruzada]
54. Reh ˚u˘rek, R.; Sojka, P. Marco de software para modelado de temas con grandes corporaciones. En actas del taller LREC 2010 sobre nuevos desafíos para los marcos de PNL, La Valeta, Malta, 22 de mayo de 2010; págs. 45–50, ISBN 2-9517408-6-7. Disponible en línea: http://is.muni.cz/publication/884893/en (consultado el 29 de mayo de 2012).
55. Meng, Z.; McCreadie, R.; Macdonald, C.; Ounis, I. Exploración de estrategias de división de datos para la evaluación de modelos de recomendación. En actas de la 14.ª Conferencia ACM sobre sistemas de recomendación, virtual, 22 a 26 de septiembre de 2020; págs. 681–686. [Referencia cruzada]
56. Shani, G.; Gunawardana, A., Evaluación de sistemas de recomendación. En Manual de sistemas de recomendación; Springer: Boston, MA, EE.UU., 2011; págs. 257–297. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

57. Friedman, M. El uso de rangos para evitar el supuesto de normalidad implícito en el análisis de varianza. Mermelada. Estadística. Asociación 1937, 32, 675–701. [Referencia cruzada]
58. Friedman, M. Comparación de pruebas de significancia alternativas para el problema de las clasificaciones. Ana. Matemáticas. Estadística. 1940, 11, 86–92. [Referencia cruzada]
59. Imán, RL; Davenport, JM Aproximaciones de la región crítica del estadístico de Friedman. Comunitario. Métodos de teoría estadística 1980, 9, 571–595. [Referencia cruzada]
60. García, S.; Herrera, F. Una extensión sobre “Comparaciones estadísticas de clasificadores en múltiples conjuntos de datos” para todas las comparaciones por pares. J. Mach. Aprender. Res. 2008, 9, 2677–2694.
61. García, S.; Fernández, A.; Luengo, J.; Herrera, F. Pruebas No Paramétricas Avanzadas para Comparaciones Múltiples en el Diseño de Experimentos en Inteligencia Computacional y Minería de Datos: Análisis Experimental de Potencia. Inf. Ciencia. 2010, 180, 2044–2064. [Referencia cruzada]
62. Demšar, J. Comparaciones estadísticas de clasificadores sobre múltiples conjuntos de datos. J. Mach. Aprender. Res. 2006, 7, 1–30.
63. Nemenyi, P. Comparaciones múltiples sin distribución. Doctor. Tesis, Universidad de Princeton, Princeton, Nueva Jersey, EE. UU., 1963.
64. Dacrema, MF; Cremonesi, P.; Jannach, D. ¿Realmente estamos avanzando mucho? Un análisis preocupante de los enfoques recientes de recomendación neuronal. En Actas de la 13.ª Conferencia ACM sobre Sistemas de Recomendación, Copenhague, Dinamarca, 16 a 20 de septiembre de 2019; págs. 101-109. [Referencia cruzada]
65. Wilcoxon, F. Comparaciones individuales mediante métodos de clasificación. Bioma. Toro. 1945, 1, 80–83. [Referencia cruzada]
66. Vijaymeena, M.; Kavitha, K. Una encuesta sobre medidas de similitud en la minería de textos. Mach. Aprender. Aplica. En t. J. 2016, 3, 19-28. [Referencia cruzada]
67. Kwieci 'nski, R.; Melniczak, G.; Górecki, T. Comparación de recomendaciones de trabajos por lotes y en tiempo real. Acceso IEEE 2023, 11, 20553–20559. [Referencia cruzada]
68. Kwieci'nski, R.; Górecki, T.; Filipowska, A. La importancia del aprendizaje en las recomendaciones basadas en gráficos bipartitos. En Actas de la 17.ª Conferencia sobre Ciencias de la Computación y Sistemas de Inteligencia (FedCSIS) de 2022, Sofía (Bulgaria), 4 a 7 de septiembre de 2022; págs. 227-233. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Blockchain y cifrado homomórfico para la seguridad de los datos y Privacidad estadística

Rahul Raj 1,*, Ye¸sem Kurt Peker [1] y Zeynep Delal Mutlu [2]

[1] Escuela de Ciencias de la Computación TSYS, Universidad Estatal de Columbus, Columbus, GA 31907, EE. UU.;
[2] peker_yesem@columbusstate.edu Investigador independiente, 1200 Bruselas, Bélgica; zeynepdelalmutlu@gmail.com * Correspondencia: raj_rahul@students.columbusstate.edu

Resumen: Este estudio propone un sistema basado en blockchain que utiliza cifrado totalmente homomórfico para proporcionar seguridad de datos y privacidad estadística cuando los datos se comparten con terceros con fines de análisis o investigación. El sistema propuesto no sólo proporciona seguridad a los datos en tránsito, en reposo y en uso, sino que también garantiza la privacidad y la integridad computacional para cálculos estadísticos simples. Esto se logra aprovechando los atributos de la tecnología blockchain, que proporciona disponibilidad e integridad de los datos, combinados con cifrado homomórfico, que proporciona confidencialidad de los datos en uso. Los cálculos se realizan en contratos inteligentes que residen en la cadena de bloques, lo que proporciona integridad computacional. El sistema propuesto se implementa en la cadena de bloques Zama y realiza operaciones estadísticas que incluyen media, mediana y varianza de datos cifrados. Los resultados indican que es posible realizar cálculos totalmente homomórficos en la cadena de bloques. Aunque las limitaciones informáticas actuales de la cadena de bloques no permiten ejecutar el sistema para grandes conjuntos de datos, la tecnología está disponible y, con avances hacia operaciones homomórficas más eficientes en las cadenas de bloques, el sistema propuesto proporcionará una solución definitiva para brindar la tan deseada seguridad. propiedades en las aplicaciones, incluida la privacidad estadística y de datos, la confidencialidad y la integridad en reposo, en tránsito y en uso.

Palabras clave: privacidad de datos; integridad de los datos; integridad computacional; cifrado homomórfico; cadena de bloques; privacidad estadística; seguridad de datos; confidencialidad estadística

check for updates

Cita: Raj, R.; Kurt Peker, Y.; Mutlu, ZD Blockchain y Cifrado homomórfico para seguridad de datos y privacidad estadística. Electrónica 2024, 13 , 3050. https://doi.org/10.3390/electronics13153050

Editor académico: Simeone Marino

Recibido: 8 de junio de 2024
Revisado: 20 de julio de 2024
Aceptado: 26 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Proteger la privacidad de los usuarios y la confidencialidad de los datos confidenciales es vital en todos los sistemas donde se almacenan, transmiten o procesan datos de los usuarios. A menudo, es necesario analizar los datos con fines comerciales o en beneficio del público. Por ejemplo, los datos del censo registran información sobre la población de un país, estado, ciudad u otras áreas geográficas bien definidas . Incluyen información confidencial como edad, raza, género, creencias religiosas y condiciones de salud a largo plazo en muchos casos. Los datos del censo son los datos primarios utilizados para comprender las condiciones sociales, económicas y demográficas a nivel local y nacional y proporcionar la información que los gobiernos necesitan para desarrollar políticas, planificar y administrar servicios públicos y asignar fondos. La protección de los datos censales es esencial desde su recopilación hasta su procesamiento. Una salvaguardia es permitir que sólo personas autorizadas accedan a los datos. El cifrado es un mecanismo común para implementar esta salvaguarda. Los datos se cifran en el almacenamiento y se transmiten entre los usuarios autorizados. Sin embargo, existe el riesgo de que los usuarios autorizados cometan errores involuntarios o que un usuario autorizado se vuelva malicioso, poniendo en peligro la seguridad y privacidad de los datos y la integridad del análisis. En algunos casos, es necesario poner los datos a disposición de terceros (por ejemplo, investigadores) para que se pueda realizar un análisis adecuado y objetivo. En estos casos, para proteger la privacidad del usuario, los datos se anonimizan o se anonimizan antes de compartirlos. Sin embargo, estos métodos no siempre preservan la privacidad del usuario como se esperaba. Además de errores involuntarios y el

Machine Translated by Google

amenazas, cuando se ponen a disposición grandes conjuntos de datos, la información del usuario puede filtrarse debido a ataques más sofisticados. especialmente cuando se dispone de grandes conjuntos de datos. El estudio de 2016 “¡Expuesto! Una encuesta sobre ataques a datos privados” de Dwork et al. presenta una encuesta de ataques comunes contra datos agregados. Describe ataques de reconstrucción y rastreo. Los ataques de reconstrucción implican aproximar características sensibles de individuos dentro de un conjunto de datos. Los ataques de rastreo tienen como objetivo determinar si los datos de un individuo objetivo están incluidos en el conjunto de datos o no [1]. Al estudio de Dwork le siguen muchos estudios centrados en los ataques a la privacidad de los datos y los mecanismos para defenderse de ellos [2–6].

Dos términos relacionados con la seguridad de los datos en el sentido estadístico son privacidad estadística y confidencialidad estadística. La privacidad estadística es “el arte de diseñar un mecanismo de privacidad que transforme datos sensibles en datos que sean simultáneamente útiles y no sensibles” [7]. El objetivo de las metodologías estadísticas de privacidad es "permitir un amplio intercambio de datos entre diferentes contextos y dominios de datos donde se desea o requiere que las identidades de los individuos o los atributos sensibles estén protegidos (por ejemplo, censos, salud, datos genómicos, redes sociales)" [8].

La confidencialidad estadística se refiere a la “protección de la información de unidades estadísticas individuales” o, de manera equivalente, “la protección de los datos recopilados con fines estadísticos” [9]. La confidencialidad estadística está estrechamente relacionada con la privacidad estadística. Aunque no existe una distinción clara entre estos términos en la literatura, según las definiciones a las que se hace referencia en este artículo, consideramos que la confidencialidad estadística significa la protección de las unidades estadísticas, es decir, los datos recopilados sobre individuos o empresas, y garantizar el uso aprobado de a ellos. La privacidad estadística es el concepto de seguridad más amplio que incluye la transformación de datos sensibles en datos útiles y no sensibles. La confidencialidad estadística es uno de los principios fundamentales de las estadísticas oficiales respaldados por la Asamblea General de las Naciones Unidas [10]. También es un principio fundamental de las estadísticas europeas, que define principios, reglas y procedimientos para proteger los datos confidenciales y al mismo tiempo permitir su uso con fines estadísticos [11].

La primera publicación de Innovations in Federal Statistics [12] analiza los desafíos y la necesidad de un nuevo paradigma en el sistema estadístico federal. El capítulo 5 de la publicación titulada “Protección de la privacidad y la confidencialidad al proporcionar acceso a datos para uso en investigación” se centra en proteger la confidencialidad de la información recopilada para uso estadístico. Después de discutir las implicaciones de seguridad de vincular múltiples conjuntos de datos para el análisis, incluida la base legal para la privacidad y la confidencialidad, los autores llegan a dos conclusiones principales: “A medida que las agencias federales de estadística avanzan en la vinculación de múltiples conjuntos de datos, deben abordar simultáneamente la cuantificación y el control de la información. riesgo de pérdida de privacidad” y “Las técnicas de mejora de la privacidad y el análisis de datos estadísticos para preservar la privacidad pueden permitir potencialmente el uso de fuentes de datos del sector privado para las estadísticas federales”. Con estas conclusiones, recomiendan que “las agencias federales de estadística deberían adoptar tecnologías modernas de bases de datos, criptografía y preservación y mejora de la privacidad”.

En este estudio proponemos un sistema que proporciona seguridad de datos, privacidad estadística y confidencialidad utilizando técnicas y herramientas puramente matemáticas e informáticas . Exploramos el uso de un sistema basado en blockchain que permite realizar cálculos estadísticos sobre datos cifrados mediante el uso de cifrado totalmente homomórfico en blockchain mediante contratos inteligentes. El sistema propuesto proporciona seguridad de extremo a extremo de los datos desde el momento en que salen del propietario de los datos hasta el momento en que el investigador recibe los resultados de los cálculos estadísticos. La seguridad proporcionada incluye la integridad y confidencialidad de los datos en tránsito, en reposo y en uso. No sólo los puntos de datos individuales nunca se revelan en texto sin formato, sino que los resultados solo están disponibles para usuarios autorizados en formato de texto sin formato. Además, debido a que los cálculos se llevan a cabo en la cadena de bloques, es casi imposible alterar los algoritmos para los cálculos estadísticos. Además, no es posible solicitar estadísticas distintas a las aprobadas en el contrato inteligente. Como tal, el sistema propuesto proporciona privacidad y confidencialidad estadística deseada en diversas aplicaciones, incluidos los sistemas estadísticos federales. En la Sección 2, proporcionamos breves descripciones de estudios recientes en los que se utiliza blockchain y cifrado homomórfico para proporcionar seguridad de datos. En

Machine Translated by Google

En la Sección 3, describimos nuestro sistema propuesto y la implementación de una prueba de concepto para el sistema. En la Sección 4, presentamos los resultados de ejecutar la prueba de concepto y, finalmente, en la Sección 5, proporcionamos una discusión de los resultados.

2. Trabajo relacionado

Se han realizado numerosos estudios que han intentado introducir la seguridad y la integridad de los datos no solo cuando están en reposo sino también cuando están en uso a través de diversos medios, incluido el cifrado homomórfico y la tecnología blockchain. Uno de esos estudios propone un sistema para un paradigma de capacitación de datos colaborativos para el intercambio de datos de imágenes médicas donde el libro de contabilidad blockchain proporciona la descentralización de los modelos de aprendizaje federados sin depender de un servidor central, y el cifrado homomórfico alivia las preocupaciones relacionadas con el intercambio de datos sin procesar [13]. Su sistema cifra los gradientes de forma homomórfica y los comparte a través de blockchain.

Liang et al. [14] proponen la integración de blockchain y cifrado homomórfico para abordar los desafíos en la protección de los derechos de autor de los circuitos. Su estudio propone un modelo matemático basado en cifrado homomórfico dentro de la cadena de bloques que protege las transacciones y al mismo tiempo garantiza la integridad y confidencialidad de los datos mediante el uso de contratos inteligentes.

Yaji et al. [15] propuso un sistema que utiliza esquemas de cifrado Goldwasser-Micali y Paillier para el estudio de evaluación comparativa con un enfoque en técnicas de privacidad de datos que utilizan la tecnología blockchain para aplicaciones de IA. El estudio encontró que los ataques a la cadena de bloques, como la colisión, la preimagen y los ataques a la billetera, se pueden evitar mediante el cifrado de bloques utilizando los esquemas de cifrado propuestos por Goldwasser-Micali y Paillier.

Mutlu et al. [16] propuso un sistema que utiliza tecnología blockchain y cifrado homomórfico y permite a terceros (investigadores) realizar una regresión lineal en datos cifrados. Utilizan el algoritmo Pallier para calcular la suma requerida para la regresión lineal mediante contratos inteligentes. El propietario de los datos cifra los datos utilizando la clave pública del investigador y los envía al contrato inteligente donde se realiza el cálculo. Luego, el investigador puede acceder al resultado cifrado y descifrarlo en su sistema utilizando su clave privada.

Vanin et al. [17] proponen un modelo para proteger el registro de salud personal (PHR) que utiliza un sistema de archivos de protocolo interplanetario basado en tablas hash distribuidas (DHT) junto con la cadena de bloques. Los metadatos de PHR se almacenan en la cadena de bloques y se comparten en toda la red, mientras que los datos de PHR se almacenan fuera de la cadena a través de la red IPFS. Utilizan dos elementos: Data Steward (DS), que es responsable de almacenar PHR en nombre del individuo, y Shared Data Vault (SDV), que es un área de almacenamiento temporal de IPFS donde las instituciones de salud pueden acceder a PHR con el consentimiento del individuo. . Los datos cifrados están disponibles para el público a través de portales estadísticos, donde pueden realizar operaciones con los datos utilizando cifrado homomórfico para obtener resultados significativos. Para ello utilizan la biblioteca de aritmética cifrada simple de Microsoft (SEAL), que implementa el algoritmo BFV en JavaScript.

Umar et al. [18] propusieron un modelo para el voto electrónico utilizando el algoritmo de Paillier. Una vez que el elector emite su voto, este se cifra de forma homomórfica. Luego se crea un nuevo bloque de la transacción , que contiene las boletas cifradas, la dirección seudónima del votante y del administrador, la marca de tiempo de la creación del bloque, el hash del bloque anterior de la transacción, así como el hash de la transacción. bloque actual. Luego, el nuevo bloque de la transacción se extrae mediante el mecanismo de consenso. Después de la extracción, el nuevo bloque se guarda en el libro mayor de la cadena de bloques. Este proceso continúa hasta el final de la elección, después de lo cual el administrador cuenta los votos cifrados utilizando el algoritmo Paillier, que produce la suma final, que luego puede descifrarse para determinar los resultados.

Shrestha et al. [19] realizó un estudio que analiza los problemas de seguridad con Internet de las cosas (IoT). Una de las principales preocupaciones que se ha destacado es la privacidad de los datos. Este estudio también explora la posibilidad de integrar IoT con blockchain y con cifrado homomórfico. Los beneficios incluyen la inmutabilidad de los datos, la inolvidabilidad, la eliminación de puntos únicos de falla y la confidencialidad de los datos.

Machine Translated by Google

Caldarola et al. [20] propusieron el Protocolo de equidad neuronal, un mecanismo de consenso que integra el algoritmo de firma digital de curva elíptica (ECDSA) y técnicas criptográficas. Este protocolo mejora el anonimato y la responsabilidad en las transacciones de blockchain, particularmente mediante el desarrollo de un algoritmo ECDSA de umbral sólido. Más allá de su aplicación inicial, esta innovación muestra potencial para mejorar la seguridad en varias criptomonedas, como Litecoin y Mastercoin.

El sistema propuesto en este estudio se puede comparar con el trabajo propuesto por Liang [14], Yaji [15] y Mutlu [16] en el sentido de que utiliza tecnología blockchain junto con cifrado homomórfico para proporcionar privacidad de los datos mientras Están siendo usados. Además, el sistema propuesto por Mutlu [14] utiliza cifrado homomórfico parcial sobre el contrato inteligente, que es similar a la arquitectura de nuestro sistema propuesto. Sin embargo, los estudios mencionados anteriormente utilizan el algoritmo Pallier, que es parcialmente homomórfico, mientras que este estudio utiliza un sistema totalmente homomórfico que no sólo permite la suma sino también la multiplicación de los datos cifrados, lo que permite realizar una gama más amplia de cálculos de forma segura.

3. Materiales y métodos

En esta sección, describimos un sistema que permite compartir y analizar datos de forma segura entre propietarios de datos y terceros. Los propietarios de los datos son entidades o personas físicas que tienen acceso a los datos simples. También podrían verse como sensores con capacidad de procesar datos y transmitirlos. Los propietarios están autorizados o dan su consentimiento para que se analicen los datos con la condición de que se preserve la privacidad de los datos. Los terceros en el sistema son investigadores. Podrían ser personas físicas o una entidad autorizada para realizar determinados tipos de análisis de los datos. Es posible que no tengan autorización para ver los datos en texto plano.

3.1. Descripción del sistema propuesto

El sistema cifra los datos utilizando un esquema de cifrado homomórfico antes de que abandonen al propietario de los datos. Los datos cifrados se almacenan en un contrato inteligente en blockchain. Los análisis que se pueden realizar sobre los datos también se almacenan en el contrato inteligente. Cuando un investigador necesita realizar un análisis de los datos, suponiendo que el tipo de análisis esté disponible en el contrato inteligente, el análisis se realiza en los datos cifrados mediante cálculos homomórficos. Los resultados de los cálculos homomórficos también están cifrados. Para recibir el resultado por su parte, el investigador solicita que el resultado se vuelva a cifrar con la clave del investigador para que pueda transmitirse de forma segura al investigador y solo él pueda descifrarlo. Cabe señalar aquí que los datos en texto plano nunca se revelan durante todo el proceso, ni siquiera durante el nuevo cifrado. Cuando el investigador envía su clave pública al contrato inteligente para volver a cifrarlo, el contrato inteligente inicia un protocolo de descifrado distribuido a través del cual diferentes validadores descifran partes del resultado, se vuelven a cifrar utilizando la clave pública del investigador y luego se combinan para obtener el resultado final vuelto a cifrar [21]. La Figura 1 muestra una descripción general del sistema con un propietario de datos y un investigador como actores principales.

Machine Translated by Google

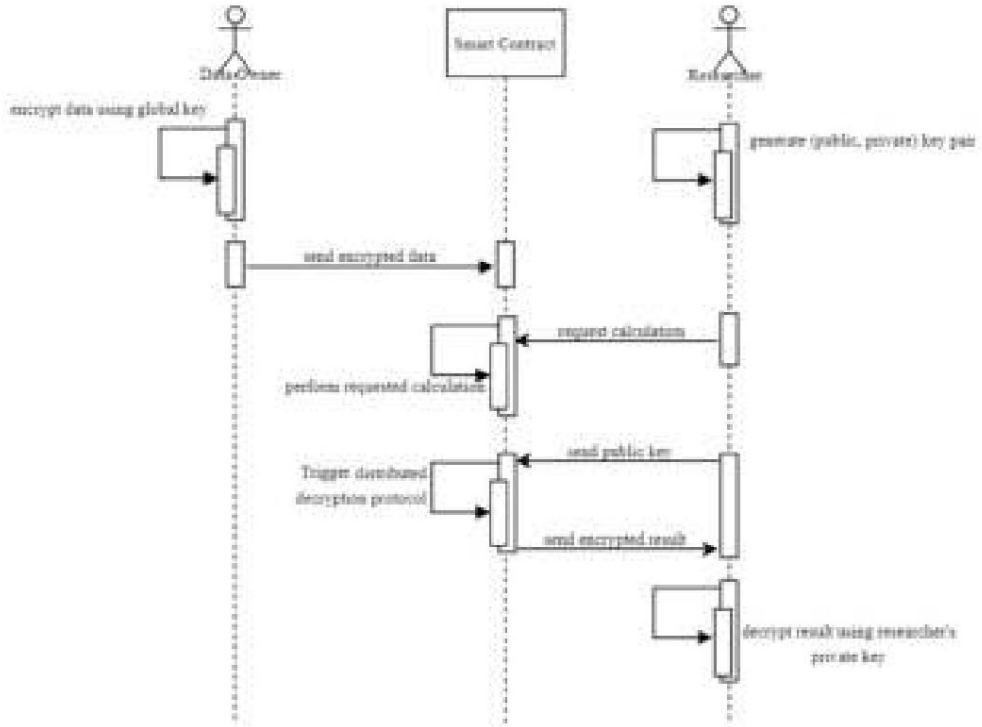


Figura 1. Una descripción general del sistema propuesto.

3.2. Implementación

El sistema propuesto se implementa en Zama Blockchain, una cadena de bloques basada en Ethereum Virtual Machine (EVM) que admite el cálculo de valores cifrados [18]. Al igual que Ethereum, que tiene una moneda conocida como Ether, Zama tiene su propia moneda, llamada ZAMA. La idea básica detrás de Zama es proporcionar contratos inteligentes confidenciales. Esto significa que los datos enviados o recibidos del contrato inteligente están cifrados y no se pueden leer si se intercepta la transferencia de datos. Zama utiliza cifrado asimétrico y, por tanto, utiliza dos claves: pública y privada. La clave pública, también conocida como clave global, se almacena públicamente en la cadena y cada usuario la utiliza para cifrar sus datos y realizar cálculos sobre esos datos cifrados. La clave global es generada durante una fase de configuración por los validadores iniciales y se vuelve a compartir de forma segura cuando se cambia el conjunto de validadores [21]. Esto permite mezclar datos cifrados de múltiples usuarios y entre múltiples contratos inteligentes. La clave privada se utiliza para descifrar los datos y no es propiedad de ningún usuario. En cambio, Zama utiliza un protocolo de umbral. En un protocolo de umbral, partes de la clave privada se distribuyen entre los nodos validadores de la red, y un cierto número de validadores deben cooperar para descifrar los datos. En el caso de Zama, es necesaria la participación de al menos un tercio de los validadores para realizar el descifrado [18]. Este método mejora la seguridad a través de la descentralización, evitando el uso no autorizado de la clave. Zama utiliza un esquema de cifrado probabilístico, lo que significa que el valor cifrado de un único texto sin formato no siempre será el mismo. Por ejemplo, considere una matriz que tiene 4 elementos [2, 4, 1, 4]. Una vez que los elementos de esta matriz estén cifrados, hipotéticamente, se convertiría en [d5048, e2314, x3215, o9849]. Observe que el número 4 aparece dos veces en la matriz de texto sin formato en el índice 1 y el índice 3, pero su versión cifrada no tiene repeticiones y los valores en el índice 1 y el índice 3 son diferentes. Este esquema mejora aún más la seguridad al evitar que los atacantes deduzcan información sobre el texto sin formato tt basándose en patrones en el texto cifrado.

f

El sistema propuesto utiliza las bibliotecas para cálculos homomórficos proporcionadas por tt
Zama. Una vez compilado el contrato, produce la Interfaz Binaria de Aplicación (ABI).
La ABI especifica las funciones disponibles en el contrato inteligente junto con sus parámetros y tipos de devolución, lo que permite a los usuarios interactuar con el contrato inteligente. Tanto el propietario de los datos como el investigador tienen sus propias aplicaciones JavaScript que utilizan ABI y métodos.

Machine Translated by Google

proporcionado por la biblioteca Ethers para comunicarse con el contrato inteligente. El propietario de los datos envía los datos al contrato inteligente y el investigador solicita el análisis del contrato inteligente. La Figura 2 muestra la interacción de los actores con el contrato inteligente.

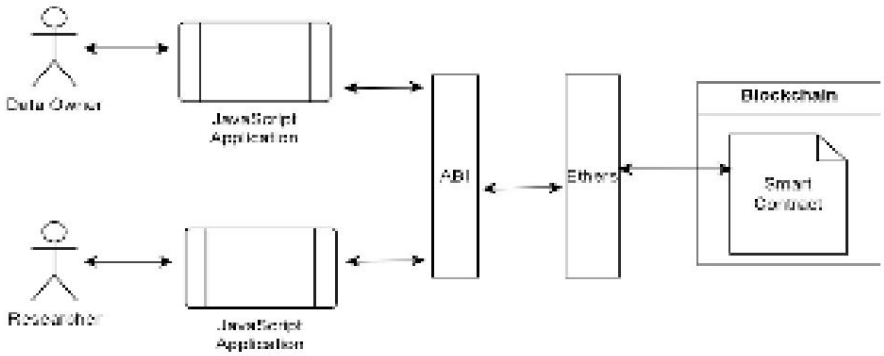


Figura 2. Interacción con el contrato inteligente.

A continuación se muestra una lista de herramientas y tecnologías que se utilizaron para implementar el sistema:

- Solidez: un lenguaje de programación que se utiliza para escribir contratos inteligentes en varios plataformas, incluido Ethereum.
- Node.js: Es un entorno de ejecución de JavaScript que permite la ejecución de código JavaScript fuera del navegador web. Para este sistema se utilizó la versión 18.18.0. • Remix: Es un entorno de desarrollo integrado (IDE) basado en navegador que se utiliza para desarrollo y despliegue de contratos inteligentes.
- MetaMask: Es una billetera de criptomonedas que se utiliza para conectarse e interactuar con la cadena de bloques.
- Visual Studio Code: Es un IDE que soporta el desarrollo en diversas programaciones. lenguajes, incluido JavaScript.
- Ethers.js: Es una biblioteca de JavaScript que permite la interacción con contratos inteligentes. Para este sistema se utilizó la versión 6.10.0.
- FhEVM: Es una biblioteca proporcionada por Zama que permite la creación de contratos inteligentes confidenciales en EVM usando Solidity. Para este sistema se utilizó la versión 0.4.0.
- FhEVMjs: Es una biblioteca JavaScript proporcionada por Zama que permite la interacción con contratos inteligentes, incluido el cifrado de datos y la generación de claves públicas/privadas. Para este sistema se utilizó la versión 0.4.0.

Como parte de este estudio se implementa una prueba de concepto para el sistema propuesto. Debido a las limitaciones en las bibliotecas para cálculos homomórficos en Zama y al trabajo en una cadena de bloques pública, como se explicará en la Sección 3.2.1, la implementación incluyó cálculos de estadísticas descriptivas simples como la media, la mediana y la varianza. La prueba de concepto se probó con una pequeña cantidad de puntos de datos, con un rango de números entre 1 y 50.

3.2.1. Desafíos Al

implementar el sistema, se identificaron las siguientes limitaciones y desafíos en Solidity y Zama: • Tipos de datos: fhEVM solo admite enteros

- sin signo que sean de 8, 16, 32 o 64 bits. Además, los métodos proporcionados por fhEVM para cálculos con datos cifrados como suma, resta, multiplicación y división devuelven un entero cifrado sin signo. En el caso de la división, existe una limitación adicional según la cual un entero cifrado solo se puede dividir con un entero de texto sin formato. Esto significa que actualmente no es posible dividir dos números enteros cifrados. Incluso si existiera la posibilidad de realizar dicha división, el resultado siempre sería un número entero cifrado debido a su tipo de retorno; por tanto, no es posible trabajar con números decimales. Además, los números enteros

Machine Translated by Google

no están firmados; por lo tanto, tampoco es posible manejar números enteros negativos. Estas limitaciones restringen la cantidad de análisis que se pueden realizar en el contrato inteligente.

- Límite de gas: los cálculos en la cadena de bloques funcionan con gas, una unidad de costo asociada con la realización de una transacción o cálculo en la red. El gas se utiliza para pagar a los validadores por los recursos que utilizan para realizar transacciones. El límite de gas se refiere a la cantidad máxima de gas que se puede gastar en una transacción o cálculo. Establecer un límite en el consumo de gas es importante porque garantiza que las transacciones tengan un límite superior predefinido en el consumo de recursos para protegerse contra escenarios en los que la ejecución del código podría entrar en un bucle infinito. Actualmente, existe un límite de gas de 10.000.000 en Zama devnet [22]. Sin embargo, los cálculos homomórficos son bastante costosos en términos de recursos y, dado que estos cálculos se realizan en el contrato inteligente, consumen mucho gas. El consumo de gas depende de las operaciones que se realizan con los datos cifrados y aumenta con la complejidad del algoritmo y los bits del tipo de datos (las operaciones de 32 bits consumirían más gas en comparación con las ope

  El límite de gas actual restringe la funcionalidad en términos de la cantidad de puntos de datos que se pueden procesar.
- Solidity: a diferencia de los lenguajes de programación tradicionales como Python y Java, Solidity tiene varias limitaciones. Uno de ellos es que la estructura de datos utilizada para almacenar valores de pares de claves (asignaciones) es bastante limitada en términos de funcionalidad y no es posible iterar sobre claves o valores. Esto dificulta la implementación de varios algoritmos, como el cálculo de la moda (el valor más frecuente en una matriz).

3.2.2. Cálculo de la media

Para un conjunto de valores {x1, x2, . . . , xn}, la media aritmética, denotada por $\bar{x}$, es la suma de los valores dividida por el número de valores, como se muestra en la Ecuación (1).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{yo=1}^{norte} xi}{norte} \quad (1)$$

En el sistema diseñado, solo el numerador, la suma de los valores cifrados, se calcula en el contrato inteligente. La operación de división se realiza por parte del investigador . Esto se debe a la limitación mencionada en la Sección 3.2.1 de que una división siempre devolverá un número entero y, por tanto, perderá precisión en el resultado. En resumen, el contrato inteligente envía la suma cifrada así como la cantidad cifrada de elementos al investigador.

Luego, el investigador descifra estos dos valores y se realiza una división final para obtener el resultado.

3.2.3. Cálculo de la mediana

Calcular la mediana de datos ordenados es una tarea sencilla. Suponiendo que los datos constan de n valores, la mediana es el elemento medio si n es impar y es el promedio de los dos elementos medios si n es par. La fórmula para la mediana de un conjunto de datos ordenados con n puntos de datos se proporciona en la ecuación (2).

$$\text{Med} = \begin{cases} \frac{norte+1}{2}^{th} \text{ elemento si n es impar} \\ \frac{1}{2}\left(\text{elemento } \frac{n}{2}\right) + \left(\text{elemento } \frac{n}{2}+1\right) \text{ si n es par} \end{cases} \quad (2)$$

En el sistema, la diferenciación en el cálculo de la mediana se maneja simplemente mediante una declaración if. Si n es impar, la mediana se calcula en el contrato inteligente y se devuelve al investigador en forma cifrada. Si n es par, la suma de los dos elementos intermedios se calcula en el contrato inteligente y se envía al investigador. Luego, el investigador descifra el resultado y lo divide por 2 para obtener la mediana. Así, el investigador toma la decisión de realizar la división en función del número de elementos.

El cálculo de la mediana anterior supone que los datos están ordenados. Sin embargo, el mayor desafío al calcular la mediana de datos no clasificados es la implementación de un algoritmo de clasificación en el contrato inteligente, ya que ordenar datos cifrados no es una tarea trivial. E

Machine Translated by Google

El sistema propuesto utiliza el algoritmo de clasificación de burbujas para ordenar los datos. Se eligió este algoritmo por su simplicidad. Funciona comparando dos valores adyacentes en una matriz e intercambiando los números según el resultado de esa comparación, lo que facilita su implementación. Además, la implementación de la clasificación por burbujas no requiere ninguna estructura de datos adicional. Esto lo hace adecuado para escribir en Solidity, considerando las limitaciones del lenguaje de programación así como de la biblioteca fhEVM.

3.2.4. Cálculo de la varianza

La fórmula para calcular la varianza de un conjunto de valores {x1, x2 ,. . . , xn} se da en la ecuación (3), donde x representa la media de los datos.

$$V = \frac{\sum_{yo=}^{norte} (xi - \bar{x})^2}{1\ norte - 1} \tag{3}$$

Como se analizó en la Sección 3.2.2, no es factible calcular la media exacta de cualquier secuencia en el contrato inteligente porque la función de división en la biblioteca fhEVM siempre devuelve un número entero cifrado. Para eliminar el cálculo de la media en la fórmula de la varianza, derivamos una fórmula equivalente que no incluía la media ni ningún operador de división que no fuera una operación de división mayor en el último paso. A continuación se muestra la derivación paso a paso de la fórmula a partir de la ecuación (3).

$$V = \frac{\sum_{yo=}^{norte} (xi - \bar{x})^2}{1\ norte - 1}$$

$$= \frac{\sum_{yo=1}^{norte} \left(xi - \frac{\sum_{j=1}^{norte} xj}{norte}\right)^2}{norte - 1}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{norte} \left(xi^2 - \frac{\sum_{j=1}^{norte} xj \sum_{j=1}^{norte} xj + (\ ) - 2xi}{norte} \frac{\left(\sum_{j=1}^{norte} xj\right)^2}{norte^2}\right)}{norte - 1}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{norte} \left(xi^2 + \frac{\sum_{j=1}^{norte} xj^2 - 2xi}{norte} \frac{\left(\sum_{j=1}^{norte} xj\right)^2}{norte^2}\right)}{norte^2 \quad norte - 1}$$

$$= \frac{\sum_{yo=1}^{norte} \left(n\ 2xi^2 - 2n\ 2xi \frac{\sum_{j=1}^{norte} xj}{norte} + n \frac{\left(\sum_{j=1}^{norte} xj\right)^2}{norte^2}\right)}{norte\ 2\ (norte - 1)}$$

$$= \frac{n\ 2\sum_{i=1}^{norte} xi^2 - 2n\sum_{i=1}^{norte} \left(xi \sum_{j=1}^{norte} xj\right) + \sum_{yo=1}^{norte} n \left(\sum_{j=1}^{norte} xj\right)^2}{2(n - 1)}$$

$$= \frac{norte\ 2\sum_{norte\ i=1}^{norte} xi^2 - 2n\sum_{j=1}^{norte} xj \sum_{j=1}^{norte} xj + n\left(\sum_{j=1}^{norte} xj\right)^2}{2n(n - 1)} \tag{4}$$

Este enfoque eliminó el cálculo de la media del algoritmo y, a su vez, también eliminó la división. Sin embargo, como se muestra en la Ecuación (4), no fue posible eliminar completamente la división. Teniendo en cuenta estas limitaciones, en el contrato inteligente solo se implementa el cálculo del numerador. El resultado cifrado del numerador se envía al investigador junto con el valor cifrado de n, donde se realiza la división final. Tras una inspección más cercana de la ecuación (4), se puede observar que hay tres componentes principales en el propio numerador. Además, el numerador también implica resta. Como se analizó en la Sección 3.2.1, Zama solo proporciona números enteros sin signo, lo que significa que cualquier resultado por debajo de cero socavaría la precisión del resultado. Para mitigar el problema, estos tres componentes se calculan por separado y sus resultados se almacenan en variables separadas. Luego, el primer componente se suma al tercero y luego el segundo componente se resta del resultado de la suma. Esto asegura que el resultado no caiga por debajo de cero.

Machine Translated by Google

3.3. Garantías de seguridad del sistema propuesto

El sistema propuesto proporciona los requisitos de seguridad para todos los principios de seguridad de la información. Proporciona garantías de seguridad cuando los datos están en tránsito, en reposo y en uso. A continuación, describimos cómo se logra la confidencialidad, integridad y disponibilidad en el sistema propuesto.

- Confidencialidad: los datos se cifran antes de compartirse y permanecen cifrados a partir de ese momento. Los datos se cifran en tránsito, en reposo y en uso, lo que proporciona privacidad y confidencialidad estadística. Los datos cifrados se transmiten al contrato inteligente, donde se almacenan, lo que permite realizar cálculos sobre ellos. El resultado de estos cálculos también está cifrado. Antes de compartir el resultado con el investigador, se vuelve a cifrar después de descifrarlo internamente en la cadena de bloques utilizando el protocolo de descifrado distribuido. Esta operación no es visible en los bloques de la cadena y, por tanto, no es visible para los usuarios. Engañar al sistema para obtener la clave de descifrado requeriría que un tercio de los nodos de la cadena de bloques colaboraran, lo cual es un escenario poco probable para las cadenas de bloques. • Integridad de los datos: Cada bloque de una blockchain contiene el hash del bloque anterior, creando una cadena. La manipulación de un bloque cambia el hash de ese bloque y de todos los bloques que le siguen. Dado que establecer la cadena con los bloques actualizados es una tarea casi imposible, los datos de la cadena de bloques son resistentes a la manipulación. Esto proporciona la integridad de los datos. • Integridad de los cálculos: Los algoritmos de cálculo permitidos sobre los datos se implementan en el contrato inteligente. Dado que los contratos inteligentes son parte de la cadena de bloques, no es factible modificarlos de forma no autorizada. Esto proporciona integridad en los cálculos y, por tanto, confianza en los algoritmos implementados para los cálculos. • Autorización: La autorización en el sistema propuesto puede considerarse desde dos perspectivas. Uno es el control de qué tipo de análisis se puede realizar sobre los datos. Debido a que las funciones de análisis están disponibles en el contrato inteligente del sistema propuesto y solo los usuarios/entidades autorizados pueden cambiar la funcionalidad del contrato inteligente, un investigador está limitado a utilizar las funciones disponibles en el contrato inteligente. Suponiendo que solo se implementen funciones aprobadas en el contrato inteligente, un investigador no puede realizar análisis no aprobados de los datos. La otra consideración de autorización en el sistema es quién puede enviar datos al contrato inteligente y quién puede solicitar el análisis de los datos. Las aplicaciones blockchain se pueden programar para controlar el acceso a las funciones proporcionadas en el contrato inteligente. Cada usuario se identifica de forma única mediante su clave pública, y esta clave se puede utilizar para determinar su acceso a las funciones del contrato inteligente.

- Disponibilidad: la disponibilidad es una característica proporcionada por la propia cadena de bloques debido a su naturaleza descentralizada. Cada nodo de la red tiene su propia copia del libro mayor, por lo que incluso si un nodo deja de estar disponible, todo el sistema seguirá siendo accesible. Esto elimina un único punto de falla e introduce tolerancia a fallas en el sistema.

4. Resultados

Ejecutamos la implementación de prueba de concepto del sistema, donde el contrato inteligente tiene la funcionalidad de calcular la media, la mediana y la varianza del conjunto de datos. Registramos el tiempo necesario para realizar varias operaciones para los puntos de datos 4, 8, 10, 16, 24 y 32. Estas operaciones incluyen configurar los datos (es decir, enviar los datos al contrato inteligente), calcular la media y ordenar los datos. (que es necesario para encontrar la mediana), cálculo de la mediana y cálculo de la varianza. Todos los experimentos se llevaron a cabo con un tipo de datos de 16 bits. Cada conjunto de datos se generó aleatoriamente con puntos en el rango de 0 a 50.

Cada conjunto de datos producido se envió al contrato inteligente a la vez. Cada tamaño de conjunto de datos se probó ocho veces para garantizar la confiabilidad de los resultados. Las pruebas se realizaron en diferentes momentos y en diferentes ubicaciones geográficas con diferente conectividad. La Tabla 1 muestra el tiempo promedio de ocho ensayos para cada tamaño de conjunto de datos.

Machine Translated by Google

Tabla 1. Tiempo de las operaciones desde la solicitud hasta el resultado en milisegundos.

Número de Puntos de datos (n)	Enviando Datos	Significar Cálculo	Ordenar datos	Mediana Cálculo	Diferencia Cálculo
4	8088.66679	7512.111693	9063.634214	6312.926094	18,109.45269
8	6642.155596	8792.629253	22,330.79229	7679.880587	28.161,12535
10	7243.960528	10,486.1769	34.412,11508	7358.729393	
dieciséis	7111.459872	11,948.44701			
24	9990.13181	16.596,62563			
32	13.358,13821	21.479,25259			

Como se muestra en la Tabla 1, los tamaños de algunos conjuntos de datos no eran adecuados para ciertos operaciones debido al límite de gas impuesto por Zama. Por ejemplo, mientras el proceso de clasificación se realizó en conjuntos de datos que contenían 4, 8 y 10 puntos de datos, el proceso de varianza fue se aplica solo a conjuntos de datos que contienen 4 y 8 puntos de datos. Envío de los conjuntos de datos al blockchain y calcular el valor medio se podría realizar en todos los conjuntos de datos.

La Figura 3 compara los tiempos de cada operación según la cantidad de puntos de datos. También compara los tiempos de diferentes operaciones. En general, a medida que el número de puntos de datos aumenta, el tiempo requerido para una operación también aumenta. Algunas excepciones a esto son envío de datos para un número menor de puntos de datos y cálculo de la mediana. Atribuimos Esto se debe al hecho de que las operaciones que requieren poco tiempo para completarse son más susceptibles. a verse impactado por el volumen de transacciones así como por la calidad de la red conectividad. Como se muestra en el gráfico, la variación y la clasificación toman más tiempo que establecer datos, cálculo de la media y cálculo de la mediana. El cálculo de la mediana lleva menos tiempo ya que implica algunas operaciones simples en comparación con las otras operaciones independientemente de el tamaño de los datos.

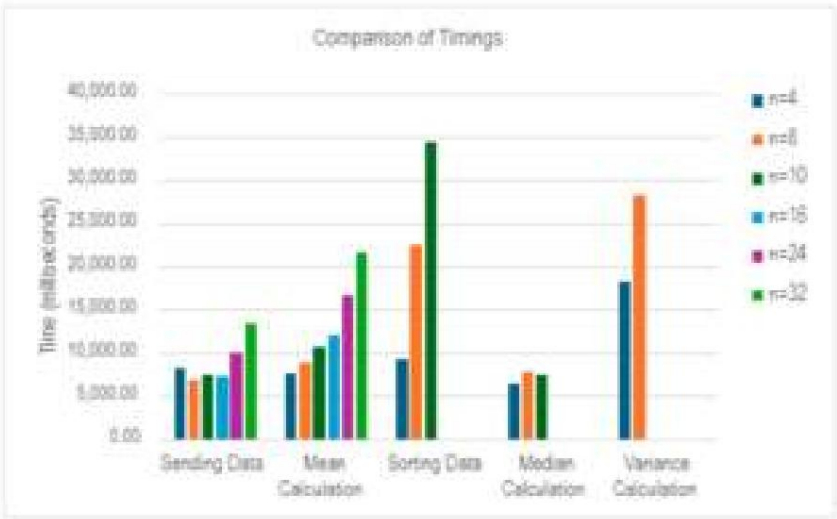


Figura 3. Comparación de tiempos de operaciones con respecto al número de puntos de datos.

También registramos el uso de gas de cada operación para cada prueba y verificamos que el El cálculo de la variación y la clasificación de datos alcanzó el límite de gas impuesto por Zama en 10 puntos de datos. y 8 puntos de datos, respectivamente. La Tabla 2 muestra los promedios de los ocho ensayos para cada dato. establecer el tamaño.

Machine Translated by Google

Tabla 2. Consumo de gas de las operaciones.

Número de Puntos de datos (n)	Enviando Datos	Significar Cálculo	Clasificación Datos	Mediana Cálculo	Diferencia Cálculo
4	290.491,5	577,618	1.367.854	169,517	5.022.035
8	565.458,875	1.124.706	6.007.343	169,517	8.213.723
10	709.171,5	1.398.250	9.565.005	169,517	
[illegible]	1.166.246,625	2.218.883			
24	1.835.907,625	3.313.060			
32	2.574.607,375	4.407.237			

No es de extrañar que el uso de gas fuera constante para la cantidad dada de puntos de datos. para la misma operación. La Figura 4 muestra una comparación del uso de gas en relación con el número de puntos de datos para cada operación, así como una comparación del uso de gas con respecto a las diferentes operaciones.

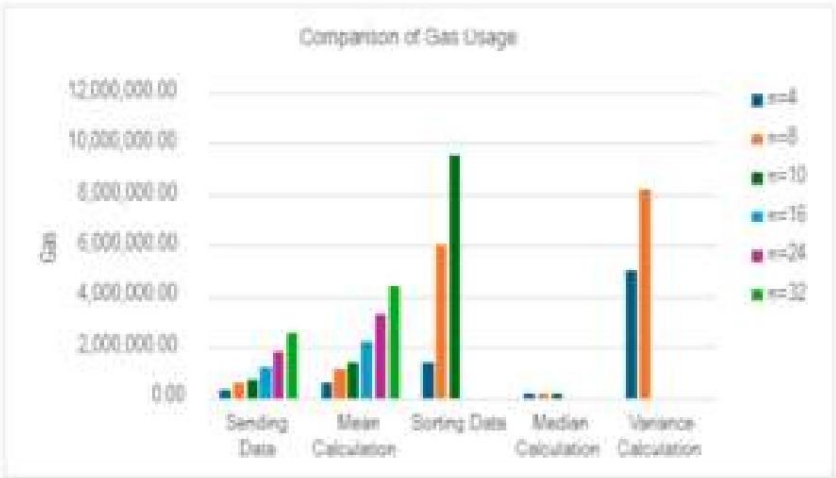


Figura 4. Comparación del uso de gas de las operaciones con respecto al número de puntos de datos.

Como muestra la Figura 4 , el uso de gas aumentó con el número de puntos de datos, excepto el mediana. El cálculo de la mediana implicó una operación simple de encontrar el índice de la elemento intermedio, que requiere solo una suma y una división independientemente del número de puntos de datos. Por lo tanto, el uso de gas fue el mismo para los tres tamaños de conjuntos de datos. Calculando el la mediana requiere que los datos estén ordenados. Sin embargo, debido a que la clasificación de datos requiere demasiado gas, no se puede calcular para más de 10 puntos de datos. De manera similar, se requiere el cálculo de la varianza alrededor de 10 millones de gas para ocho puntos de datos. Agregar un punto de datos adicional requeriría más de 10 millones de gas, lo que estaría por encima del límite de gas impuesto por Zama. Como es evidente a partir del gráfico y la descripción de la implementación de las operaciones en Sección 3, las operaciones que requieren más cálculos requieren más gas.

5. Discusión

Este estudio propuso un sistema que proporciona seguridad de datos, privacidad estadística y confidencialidad utilizando técnicas y herramientas puramente matemáticas e informáticas. El sistema utiliza cifrado totalmente homomórfico en una cadena de bloques y garantiza la seguridad de los datos de extremo a extremo desde el momento en que salen del propietario hasta el investigador. recibe los resultados del cálculo. Los datos están protegidos en tránsito, en reposo, así como en usar. Además, el sistema propuesto también proporciona integridad computacional. Con toda las protecciones que proporciona, el sistema es una solución definitiva para cumplir con la seguridad de los datos requisitos.

Machine Translated by Google

Se lleva a cabo una implementación de prueba de concepto para el sistema propuesto en la cadena de bloques pública Zama. En la implementación, un investigador puede solicitar cálculos seguros de media, mediana y varianza. Se presentan los resultados de tiempo para llevar a cabo las operaciones requeridas en varios números de puntos de datos, junto con las limitaciones de trabajar con bibliotecas de cifrado homomórfico y una cadena de bloques pública. Si bien este estudio demuestra con éxito la posibilidad de proteger datos y cálculos en una cadena de bloques utilizando un cifrado totalmente homomórfico, existen ciertos desafíos y áreas que necesitan mejorar.

Las operaciones totalmente homomórficas son bastante caras en términos de recursos y existen limitaciones en la cantidad de cálculos que se pueden realizar en la cadena de bloques antes de exceder los límites de gas y costo. Esto es especialmente crítico cuando se ejecuta la aplicación en la red principal, donde las transacciones generan tarifas. Esta limitación se puede mitigar parcialmente en una red blockchain privada o autorizada. Una cadena de bloques de este tipo ofrece garantías similares a las de la cadena de bloques pública y ofrece más control sobre quién puede utilizar la aplicación.

Los estudios futuros en esta área pueden incorporar algoritmos más complejos en diversas disciplinas, desde la estadística hasta el aprendizaje automático, e incluir una gama de datos más amplia a medida que haya más recursos disponibles y avances tecnológicos. Además, los algoritmos tradicionales que se han diseñado para datos de texto plano, como la búsqueda y la clasificación, deben revisarse cuidadosamente para admitir cálculos homomórficos, sujeto a las capacidades de las bibliotecas disponibles. Otra posible dirección para futuros estudios podría ser desarrollar un marco que admita cálculos totalmente homomórficos sobre ese contrato inteligente y proporcione una gama más amplia de funcionalidades al mismo tiempo que supere las limitaciones del sistema actual, como permitir la división de dos números cifrados e incorporar decimales o flotantes. números de puntos.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, YKP; Curación de datos, RR, YKP y ZDM; Análisis formal, YKP y ZDM; Investigación, RR, YKP y ZDM; Metodología, RR y YKP; Administración de proyectos, YKP; Recursos, RR, YKP y ZDM; Software, RR y ZDM; Supervisión , YKP; Validación, RR, YKP y ZDM; Visualización, YKP y ZDM; Redacción: borrador original, RR y YKP; Redacción: revisión y edición, RR, YKP y ZDM Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: Las contribuciones originales presentadas en este estudio se incluyen en el artículo/Más consultas pueden dirigirse a los autores correspondientes.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Dwork, C.; Smith, A.; Steinke, T.; Ullman, J. ¡Expuesto! Una encuesta sobre ataques a datos privados. Año. Estadísticas Rev. Aplica. 2017, 4, 61–84. [Referencia cruzada]
2. Kitamura, K.; Irván, M.; Yamaguchi, RS Ataques de prueba de anonimato e indicadores de vulnerabilidad para la divulgación de "Características del paciente" en artículos médicos. En actas del Simposio europeo IEEE sobre talleres de seguridad y privacidad de 2022 (EuroS&PW), Génova, Italia, 6 a 10 de junio de 2022; págs. 186-193. [Referencia cruzada]
3. Nissim, K. Privacidad: de la reconstrucción de bases de datos a los teoremas legales. En actas del 40.º Simposio ACM SIGMOD-SIGACT-SIGAI sobre principios de sistemas de bases de datos, en PODS'21, evento virtual, China, 20 a 25 de junio de 2021; Association for Computing Machinery: Nueva York, NY, EE. UU., 2021; págs. 33–41. [Referencia cruzada]
4. Wang, Y.-R.; Tsai, Y.-C. La protección del intercambio de datos para la privacidad en Financial Vision. Aplica. Ciencia. 2022, 12, 7408. [Referencia cruzada]
5. Agarwal, S. Sray y Mishra Privacidad de datos y modelos. En IA responsable: implementación de algoritmos éticos e imparciales; Saltador Publicaciones internacionales: Cham, Suiza, 2021; págs. 153-170. [Referencia cruzada]
6. Sokolovska, A.; Kocarev, L. Integración de conceptos técnicos y legales de privacidad. Acceso IEEE 2018, 6, 26543–26557. [Referencia cruzada] 7. Kifer, D.; Lin, B.-R. Una visión axiomática de la privacidad y la utilidad de las estadísticas. J. Priv. Confidencialidad 2012, 4. [CrossRef]
8. Slavkovi´c, A.; Seeman, J. Privacidad de datos estadísticos: una canción de privacidad y utilidad. Año. Estadísticas Rev. Aplica. 2023, 10, 189–218. [Referencia cruzada]
9. C.3. Confidencialidad estadística: Guía para compiladores de MSITS 2010: Wiki de estadísticas de la ONU. Disponible en línea: https://unstats.un.org/ wiki/display/M2CG/C.3.++Estadística+confidencialidad (consultado el 4 de junio de 2024).

Machine Translated by Google

10. DENU—Principios Fundamentales de las Estadísticas Oficiales Nacionales. Disponible en línea: https://unstats.un.org/fpos/ (accedido en 5 de junio de 2024).
11. Confidencialidad estadística y protección de datos personales—Eurostat. Disponible en línea: https://ec.europa.eu/eurostat/web/ microdatos/confidencialidad-estadistica-y-proteccion-de-datos-personales (consultado el 18 de junio de 2024).
12. Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina; División de Ciencias Sociales y del Comportamiento y Educación; Comité de Estadísticas Nacionales; Panel sobre la mejora de las estadísticas federales para la investigación de políticas y ciencias sociales utilizando múltiples fuentes de datos y métodos de estimación de última generación; Arboledas, RM; Harris-Kojetin, BA (Eds.) Innovaciones en estadísticas federales: combinación de fuentes de datos mientras se protege la privacidad; The National Academies Press: Washington, DC, EE. UU., 2017. [CrossRef]
13. Kumar, R.; Kumar, J.; Khan, AA; Ali, H.; Bernardo, CM; Khan, RU; Zeng, S. Agregación de modelos de preservación de la privacidad basada en blockchain y cifrado homomórfico para imágenes médicas. Computadora. Medicina. Gráfico de imágenes. 2022, 102, 102139. [Referencia cruzada] [PubMed]
14. Liang, W.; Zhang, D.; Lei, X.; Tang, M.; Li, K.-C.; Zomaya, A. Circuit Copyright Blockchain: homomórfico basado en blockchain Cifrado para protección de circuitos IP. Traducción IEEE. Emergente. Arriba. Computadora. 2020, 9, 1410–1420. [Referencia cruzada]
15. Yaji, S.; Bangera, K.; Neelima, B. Preservación de la privacidad en Blockchain basada en un sistema de cifrado homomórfico parcial para aplicaciones de IA. En actas de la 25.ª Conferencia internacional del IEEE de 2018 sobre talleres de informática de alto rendimiento (HiPCW), Bengaluru, India, 17 a 20 de diciembre de 2018; págs. 81–85. [Referencia cruzada]
16. Mutlu, ZD; Peker, YK; Aydın, A. Selçuk Privacidad basada en blockchain que preserva la regresión lineal. J. Com-mun de ondas milimétricas. Óptimo. Modelo. 2023, 3, 45–49. Disponible en línea: https://www.jomcom.org/index.php/1/article/view/81 (consultado el 5 de junio de 2024).
17. Vanin, FN; Policarpo, LM; Righi, RD; Diablos, SM; da Silva, VF; Goldim, J.; da Costa, CA Un modelo de protección de datos de extremo a extremo basado en blockchain para el intercambio de registros médicos personales: un enfoque de cifrado totalmente homomórfico. Sensores 2023, 23, 14. [Referencia cruzada] [PubMed]
18. Umar, B.; Olaniyi, O.; Olajide, D.; Dogo, E. Paillier ChainNode basado en criptosistema para votación electrónica segura. Frente. Blockchain 2022, 5, 927013. [CrossRef]
19. Shrestha, R.; Kim, S. Integración de IoT con blockchain y cifrado homomórfico: problemas y oportunidades desafiantes. Adv. Computadora. 2019, 115, 293–331. [Referencia cruzada]
20. Caldarola, F.; d'Atri, G.; Zanardo, E. Protocolo Blockchain de equidad neuronal mediante una lotería de curvas elípticas. Matemáticas 2022, 10, 3040. [Referencia cruzada]
21. fhevm/fhevm-whitepaper.pdf en main·zama-ai/fhevm·GitHub. Disponible en línea: https://github.com/zama-ai/fhevm/blob/ principal/fhevm-whitepaper.pdf (consultado el 4 de junio de 2024).
22. Estimar Gas|0.3|fhEVM. Disponible en línea: https://docs.zama.ai/fhevm/v/0.3-2/how-to/gas (consultado el 4 de junio de 2024).

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Análisis de modelado del ensamblaje de canales en CRN basado en Estrategia de programación prioritaria con cola reservada

Qianyu Xu [1], Suoping Li 2,*, Jaafar Gaber 3 y Yuzhou Han [2]

1 Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Aeronáutica de Xi'an, Xi'an 710077, China; 202202001@xaau.edu.cn

2 Escuela de Ingeniería Eléctrica y de la Información, Universidad Tecnológica de Lanzhou, Lanzhou 730050, China; 19119376252@163.com

3 Departamento de Ciencias de la Computación e Ingeniería Informática, Université de Technologie Belfort-Montbeliard, 90010 Belfort, Francia; gaber@utbm.fr

* Correspondencia: lsuop@lut.edu.cn

Resumen: En las redes de radio cognitiva, el ensamblaje de canales permite a los usuarios secundarios (SU) ampliar la capacidad de la red y mejorar la utilización del espectro. Las estrategias de programación basadas únicamente en una clasificación de servicios heterogénea no pueden garantizar la prioridad de prestación de servicios elásticos vitales en escenarios especiales como el rescate de emergencia. Por lo tanto, en este trabajo se propone una estrategia de programación prioritaria con cola reservada (Ps-rq). Se define un factor estático para clasificar las SU en servicios elásticos y servicios en tiempo real según el tipo de mensaje, mientras que se define un factor dinámico para diferenciar los servicios elásticos de alta prioridad según la validez de la información, la correlación del mensaje y el tamaño del mensaje. Los usuarios de alta prioridad en los servicios elásticos interrumpidos se colocan en la cola reservada para garantizar sus servicios. En consecuencia, se presenta el algoritmo de programación y el proceso de acceso dinámico al canal. Se realiza un análisis de cadena de Markov en tiempo continuo y se derivan todos los posibles estados de transición, eventos desencadenantes, tasas de transición y condiciones de transición del sistema a partir de un estado general. Además, se obtienen índices de evaluación del desempeño del sistema. Los casos de estudio y los resultados de la simulación demuestran que la estrategia propuesta puede mejorar la capacidad de la red, reducir la probabilidad de bloqueo y la probabilidad de terminación forzada para los usuarios secundarios y, en particular, mejorar el rendimiento de los servicios elásticos de alta prioridad. Además, analizamos las características de Ps-rq mediante una comparación exhaustiva con otros cuatro esquemas. El experimento demuestra que la estrategia Ps-rq puede mejorar eficazmente la calidad del servicio de los servicios elásticos vitales sobre la base de una programación justa.

Palabras clave: redes de radio cognitivas; montaje de canales; estrategia de programación de prioridades; cola reservada ; cadena de Markov; utilización del espectro; condiciones de transición

check for updates

Cita: Xu, Q.; Li, S.; Gaber, J.; Han, Y. Análisis de modelado del ensamblaje de canales en CRN basado en una estrategia de programación de prioridades con Cola reservada. Electrónica 2024, 13, 3051. https://doi.org/10.3390/electrónica13153051

Editores académicos: Duc Tai Le y Syed Muhammad Raza

Recibido: 11 de junio de 2024
Revisado: 29 de julio de 2024
Aceptado: 30 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Las redes de comunicación inalámbrica tradicionales se basan principalmente en una asignación estática de espectro. Sin embargo, el usuario con licencia siempre ocupa una banda de frecuencia fija, lo que provocará un desperdicio excesivo de espectro [1]. Las redes de radio cognitivas (CRN) permiten a los usuarios secundarios (SU) explorar y utilizar el espectro no utilizado de los usuarios primarios (PU) a través de la detección del espectro para mejorar la utilización del espectro [2,3].

Mejorar la utilización del espectro requiere sistemas de radio cognitivos para programar y asignar de manera flexible los recursos del espectro disponibles [4,5]. El acceso dinámico al espectro (DSA) puede garantizar que las SU obtengan acceso a las brechas de espectro en el ancho de banda del espectro bajo licencia [6]. La flexibilidad de DSA se refleja en que las SU en curso pueden salir del canal una vez que detectan las señales de las PU, luego la adaptación del espectro se puede realizar mediante transferencia de espectro o selección dinámica de canal. Diseñar reglas de programación de recursos basadas en DSA que se ajusten al entorno de la aplicación puede ayudar a mejorar el rendimiento de la red secundaria [7].

Machine Translated by Google

En las CRN, la adopción de tecnología de ensamblaje de canales y tecnología de adaptación del espectro en el proceso de DSA puede mejorar significativamente la eficiencia del servicio de las SU. La tecnología de ensamblaje de canales permite a las SU vincular o agregar un canal inactivo a más para aumentar la capacidad de la red secundaria. En combinación con la tecnología de adaptación del espectro, las SU en curso pueden ajustar de forma adaptativa el número de canales ensamblados de acuerdo con las actividades de otras PU y SU para proporcionar una programación flexible. Sin embargo, el modelado del proceso DSA basado en la asignación de recursos es complejo, por lo que es necesario analizar y evaluar el desempeño de las redes secundarias para ayudar a diseñar reglas de operación.

El desempeño del servicio de las SU es inseparable del método de programación y asignación de recursos. El flujo de servicios en la comunicación inalámbrica se puede dividir en servicios en tiempo real (como audio y video) y servicios elásticos (como datos) según la sensibilidad al retardo. El servicio en tiempo real suele tener mayor prioridad que el servicio elástico, mientras que el servicio elástico tiene una menor sensibilidad al retraso y su velocidad de transmisión se puede ajustar de forma adaptativa según el entorno de la red.

Los investigadores propusieron una variedad de métodos de asignación de recursos para tráfico heterogéneo con el fin de mejorar la utilización del espectro [8-14]. La técnica principal consiste en agregar los recursos de espectro disponibles en la agrupación de espectro de acuerdo con el entorno dinámico de la red y luego asignarlos según demanda. Entre ellos, los refs. [10-13] estudiaron el problema de programación de recursos de redes de radio cognitivas multicanal con tráfico heterogéneo basado en el ensamblaje de canales y utilizaron métodos matemáticos para establecer el modelo de análisis para evaluar el rendimiento de las redes secundarias. Investigaciones anteriores [11] demostraron que disponer un número variable de canales ensamblados para servicios elásticos y un número fijo de canales ensamblados para servicios en tiempo real según el entorno operativo puede ayudar a mejorar la eficiencia del espectro.

En [15], los autores propusieron que la adopción del proceso de cadena de Markov de tiempo continuo (CTMC) puede proporcionar un método de modelado para el análisis de rendimiento de CRN con ensamblaje de canales, que tiene la ventaja de evitar el problema de sincronización temporal de las PU y SU en el mismo canal. En [11], los autores propusieron una estrategia de ensamblaje de canales considerando la adaptación del espectro y servicios heterogéneos, y se utilizó CTMC para evaluar el rendimiento de la red secundaria. Sin embargo, la SU interrumpida por la PU no puede continuar el servicio después de salir del canal, lo que obviamente aumenta la posibilidad de que la SU se caiga. Por tanto, réf. [12] propusieron establecer colas para servicios heterogéneos y adoptar un algoritmo de programación de colas para mejorar la capacidad de la red sobre la base de la priorización. Investigaciones anteriores [12,16] demostraron que establecer colas para las SU puede mejorar la capacidad de la red y reducir la probabilidad de bloqueo de las SU.

Al considerar una variedad de factores que afectan la capacidad del canal, incluido un enlace inalámbrico variable en el tiempo , un buffer finito, clases de tráfico y un esquema de codificación y modulación adaptativa (AMC) , se propuso una estrategia de ensamblaje de canales con colas en [17] y el La interacción entre los parámetros del sistema se investigó estableciendo un modelo de análisis CTMC. Basado en el ensamblaje de canales, se propuso un algoritmo de arrendamiento de espectro adaptativo en [18], y se discutió el rendimiento DSA del tráfico SU con prioridad de acceso mediante el desarrollo del modelo CTMC. La investigación anterior muestra que la adopción de tecnología de ensamblaje de canales para servicios heterogéneos puede mejorar la utilización del espectro inactivo. Además, el establecimiento de CTMC puede ayudar a modelar la dinámica de programación de los recursos del espectro entre los usuarios en el problema de asignación de recursos. La investigación antes mencionada presenta una metodología más rigurosa y refinada para analizar matemáticamente el desempeño del sistema secundario.

En CRN con servicios de múltiples tipos, la asignación de recursos basada en la clasificación de servicios puede mejorar la confiabilidad de la transmisión de información importante. Sin embargo, las mejoras generalmente resultan en el problema de la escasez de servicios de baja prioridad debido a la falta de servicio durante mucho tiempo. En [19-21] se propusieron esquemas de programación de recursos que pueden aliviar el problema de inanición de los usuarios de baja prioridad , y el rendimiento del sistema secundario se evaluó estableciendo modelos de análisis de Markov con colas. En [20], se adoptó la tecnología de unión de canales con mitigación de la inanición y se adoptó una prioridad no preventiva.

Machine Translated by Google

Se utilizó el modelo de cola M/G/1 para representar el proceso de transferencia de espectro de las SU, con el fin de mejorar la utilización de recursos. En [21] se propuso un algoritmo de programación de prioridad por turnos (RRP) que combina la asignación de recursos estática y dinámica . Este algoritmo obtuvo las oportunidades de transmisión de los usuarios de baja prioridad suspendiendo temporalmente la cola de alta prioridad. El propósito de esto es minimizar la escasez de servicios de baja prioridad en los CRN. De hecho, el algoritmo RRP en [21] adopta la programación de sondeo de cola, pero cuando el tráfico de una cola es grande, la programación del usuario basada únicamente en el sondeo de cola reducirá en gran medida el rendimiento del sistema [22]. La programación de servicios heterogéneos, basada en la división del tipo de servicio, puede ofrecer de hecho un esquema de programación de prioridades más conveniente para la asignación de canales y la programación de prioridades en los CRN durante la inicialización del sistema . Sin embargo, la investigación anterior no logró abordar los requisitos de transmisión de los usuarios elásticos de alta prioridad en aplicaciones prácticas, por lo que no logró proporcionar una solución fundamental al problema de la falta de servicio causada por las prioridades de programación.

En consecuencia, esto motiva la investigación de nuestro estudio. Este artículo investiga la programación y asignación de recursos con clasificación de servicios para CRN que requieren clasificación de servicios en escenarios especiales. Es necesario dar mayor prioridad a algunos servicios elásticos importantes en escenarios especiales de aplicación de CRN, incluido el rescate de emergencia, los drones [23] y los vehículos aéreos no tripulados. Por lo tanto, considerando que los esquemas de programación con servicios jerárquicos a menudo conducen al problema de escasez de servicios de baja prioridad debido a largos períodos de servicios sin servicio, el objetivo de este estudio es mejorar la eficiencia de la entrega de información importante basándose en proporcionar un mecanismo de distribución lo más justo. como sea posible.

A diferencia de nuestros estudios anteriores [9], este artículo considera un esquema de programación más general basado en servicios heterogéneos. El objetivo de este estudio es proponer un esquema de asignación y programación de recursos más completo para los CRN, que pueda garantizar la QoS de los servicios elásticos de alta prioridad. Más específicamente, según la programación de sondeo, se proporciona una nueva cola reservada para los servicios elásticos con alta prioridad que son interrumpidos por las PU, y se organiza la prioridad más alta para las SU en la cola reservada.
Con base en la tecnología de ensamblaje de canales y adaptación del espectro, se analiza el proceso dinámico de acceso al espectro de servicios heterogéneos y se investiga la asignación de recursos del espectro entre SU mediante el desarrollo de un CTMC. Las principales contribuciones de este estudio son las siguientes: 1. Este estudio propone

una estrategia de programación prioritaria con cola reservada (estrategia Ps-rq). Se presenta el modelo del sistema y el esquema de clasificación de servicios de la estrategia propuesta . Al combinar la tecnología de ensamblaje de canales y adaptación del espectro, se proporciona un esquema de asignación de prioridad proporcional basado en la estrategia Ps-rq.

2. El proceso de flujo de recursos de la red secundaria se mapea en un CTMC. Al emplear métodos de análisis estocástico, las complejas actividades del usuario en el CRN se asocian con transiciones de estado individualmente. Se proporcionan el evento de transición, la tasa de transición y la condición de transición que pueden desencadenar cambios en los estados del sistema, ofreciendo así una base teórica para mejorar el rendimiento de los sistemas secundarios mediante el ensamblaje de canales.

3. Se proporciona el procedimiento para la reducción de dimensiones de cadenas de Markov de alta dimensión. En base a esto, se investigan y simulan numéricamente los resultados analíticos del rendimiento de la red secundaria. Presentamos una comparación del Ps-rq con cuatro esquemas anteriores, y se demuestra mediante verificación numérica que la estrategia propuesta garantiza la calidad del servicio para servicios elásticos importantes interrumpidos mientras mantiene una programación justa.

2. Estrategia de programación de prioridades con cola reservada (estrategia Ps-rq)

Esta sección proporciona un esquema de clasificación de servicios heterogéneo para CRN con servicios de múltiples tipos. Sobre esta base, se propone una estrategia de programación prioritaria con cola reservada (Ps-rq). El propósito es proporcionar una programación justa para los CRN con servicios de múltiples tipos, que pueda garantizar la confiabilidad de la entrega de información importante y al mismo tiempo aliviar el problema de hambre de las colas de baja prioridad.

Machine Translated by Google

2.1. Modelo del sistema y supuestos

Las redes de radio cognitivas centralizadas (CRN) constan de dos tipos de radios, usuario primario (PU) y usuario secundario (SU). La programación del usuario está controlada por la estación base correspondiente. El nodo central es responsable de interactuar con el entorno circundante , así como de gestionar la asignación de espectro y las decisiones de programación para otras SU a través de un canal de control. El nodo central en los CRN centralizados puede mejorar el rendimiento del sistema al tomar decisiones eficientes y reducir la interferencia entre los usuarios. A diferencia de los CRN distribuidos, los CRN centralizados eliminan la necesidad de deliberar más sobre aspectos como la interferencia entre usuarios y el egoísmo de los nodos.

Suponemos que hay M (M Z) PU que comparten el ancho de banda del espectro, y que cada PU puede acceder solo a un canal. En comparación con las SU, las PU tienen prioridad absoluta de acceso al canal. Las SU están equipadas con medios para la detección de energía espectral, suponiendo que las SU tengan una capacidad de detección perfecta. Y el tiempo de detección requerido es tan corto que las PU no llegarán al canal dentro de este período. Una vez que se detecta la PU, la SU en curso liberará inmediatamente los canales ensamblados y saldrá y realizará la adaptación del espectro al mismo tiempo. Suponiendo que se dedique menos tiempo a la adaptación del espectro, el cambio de canal no afectará la transmisión de las SU.

2.2. Clasificación de servicios heterogéneos

Apoyado en el modelo del sistema, esta sección propone un esquema de clasificación de servicios heterogéneo para satisfacer las demandas de programación de CRN con servicios de múltiples tipos que incluyen datos, imágenes, audio y video. Por ejemplo, el retraso en la entrega o la pérdida de paquetes de información vital de los pacientes durante una emergencia médica pueden poner en peligro la vida, y esta parte de la información es principalmente un servicio elástico. Sin embargo, un estudio previo [12] basado en una clasificación heterogénea de servicios no consideró servicios elásticos importantes con alta prioridad de entrega en escenarios especiales. Difícilmente se puede garantizar la prioridad de transmisión y la fiabilidad de importantes servicios elásticos. Sobre la base de una clasificación de servicios heterogénea, los servicios de tipos múltiples en los CRN también se clasifican mediante factores dinámicos y los servicios elásticos con alta prioridad se separan. Los detalles son los siguientes

- Factor estático: tipo de mensaje. Las SU en CRN se clasifican en servicios elásticos (SUe) y servicios en tiempo real (SUr) según la sensibilidad al retardo. Los servicios elásticos tienen las características de una longitud de trama corta, un flujo de tráfico intenso y una alta tolerancia al retraso. Los servicios en tiempo real requieren la puntualidad de la transmisión de datos. Según la tolerancia de retraso, la prioridad del servicio se define de la siguiente manera:

$$\text{Prioridad: SUr} > \text{SUe} ;$$

• Factor dinámico: los servicios elásticos en los CRN se reclasifican en función de tres factores dinámicos que incluyen la validez de la información, la correlación del mensaje y el tamaño del mensaje.

La validez de la información (Val) se refiere al tiempo que queda antes de la fecha límite. Los mensajes con tiempos restantes más cortos tienen mayor prioridad.

$$\text{vale} = \frac{\text{El tiempo que queda antes de la fecha límite.}}{\text{El tiempo de entrega de la información.}}; \quad (1)$$

La correlación de mensajes (Cor) se refiere al tipo de mensaje que debe entregarse primero.

$$\begin{matrix}\text{corazón} = 1, & \text{Relevancia de la información importante.} \\ \text{coro} = 0, & \text{Otros}\end{matrix} ; \quad (2)$$

El tamaño del mensaje (Tamaño) es inversamente proporcional a la prioridad del mensaje.

$$\text{Tamaño} = \frac{\text{El tamaño del mensaje de la SU.}}{\text{Longitud promedio del mensaje}}; \quad (3)$$

Machine Translated by Google

Después de combinar los tres factores dinámicos anteriores, los servicios elásticos se clasifican en prioridades alta, media y baja. El propósito es identificar los servicios elásticos con alta prioridad (SUh e), y luego priorizarlos sobre los servicios en tiempo real. La prioridad del servicio se sugiere de la siguiente manera:

Prioridad : SUh > SUr > SUe

Además, en la Figura 1 se presenta una vista de prioridad tridimensional (3D) de los servicios elásticos. El control difuso de Takagi-Sugeno se utiliza para priorizar los servicios elásticos [24]. El valor de entrada del sistema de inferencia difusa varía de 0 a 1. La salida del sistema es prioritaria y se divide en tres conjuntos difusos, cuyos dominios son [−1, 1]. Según la aptitud, se adopta la regla "Si-entonces" para establecer 27 reglas difusas, y la prioridad de los servicios elásticos se divide en prioridades alta, media y baja. Por ejemplo, si Val = 0, Cor = 1 y Tamaño = 1, entonces Prioridad = 1, que representa información importante con poco tiempo restante y un tamaño de mensaje pequeño. A partir de las variables de entrada y salida, se utilizan funciones de membresía gaussianas y trapezoidales para obtener la vista de prioridad 3D de los servicios elásticos.

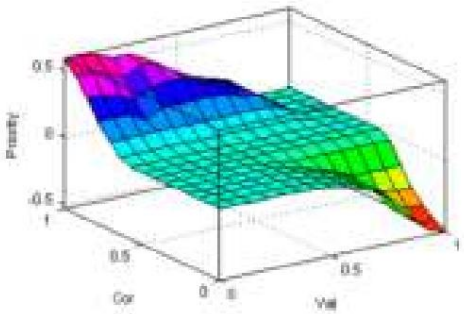


Figura 1. Vista prioritaria 3D de servicios elásticos.

2.3. Estrategia Ps-rq

Basado en el esquema de clasificación de servicios heterogéneo anterior, el tráfico con servicios de múltiples tipos que ingresan al sistema es atendido por la estrategia de programación prioritaria con cola reservada (estrategia Ps-rq). Como se muestra en la Figura 2, la estrategia Ps-rq consta de una unidad de programación de información y una unidad de transmisión de datos. Los usuarios que ingresan al sistema secundario (SU) se dividen en servicio elástico (SUe) y servicio en tiempo real (SUr) según un factor estático a través de un clasificador de paquetes I. (Los clasificadores de paquetes se emplean con el fin de analizar los tipos de paquetes entrantes.) Se organizan diferentes colas físicas para SUe y SUr , que se indican como Le y Lr . Si el servicio de las SU es interrumpido por una PU durante la transmisión, se realizará la adaptación del espectro. Teniendo en cuenta que SUr requiere alta puntualidad y tiene tolerancia a la fluctuación, si falla la adaptación del espectro, el SUr interrumpido se eliminará y liberará los canales ensamblados, y no regresará al final de Lr . Es decir, Lr no tiene bucle de retroalimentación.

A diferencia de SUr , SUe tiene bajos requisitos de puntualidad y puede contener señales L vitales . Por lo tanto, se organiza un circuito de retroalimentación para Le . El SUe interrumpido volverá a ingresar al clasificador de paquetes II y se clasificará en prioridades alta, media y baja según un factor dinámico. El propósito es separar los servicios elásticos de alta prioridad, marcarlos como SUh y colocarlos en la cola reservada L e . Mientras tanto, el servicio elástico de prioridad media (SUm e) interrumpido y el servicio elástico de prioridad baja (SUl e) se eliminan de sus marcas y se devuelven al final de la cola Le (bucle de retroalimentación). Suponiendo que cada cola es isomórfica, los usuarios secundarios en la cola están esperando ser programados según el orden de servicio por orden de llegada (FCFS). La prioridad de la cola se establece en L > Lr > Le . Las SU de diferentes tipos solo pueden alinearse en la cola correspondiente. El servicio de SU se bloqueará si no queda espacio en la cola. Si está lleno cuando el SUe y SUh interrumpidos ingresan a la cola correspondiente, el servicio se verá obligado a finalizar.

Machine Translated by Google

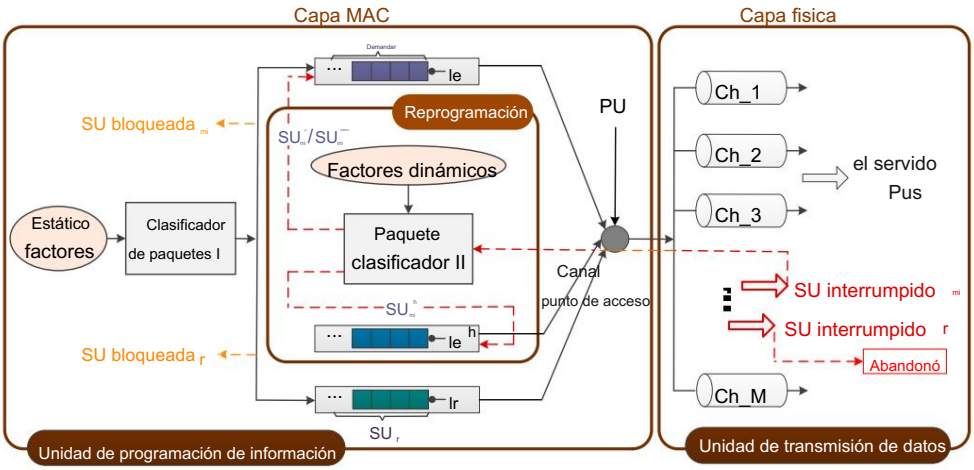


Figura 2. Estrategia Ps-rq.

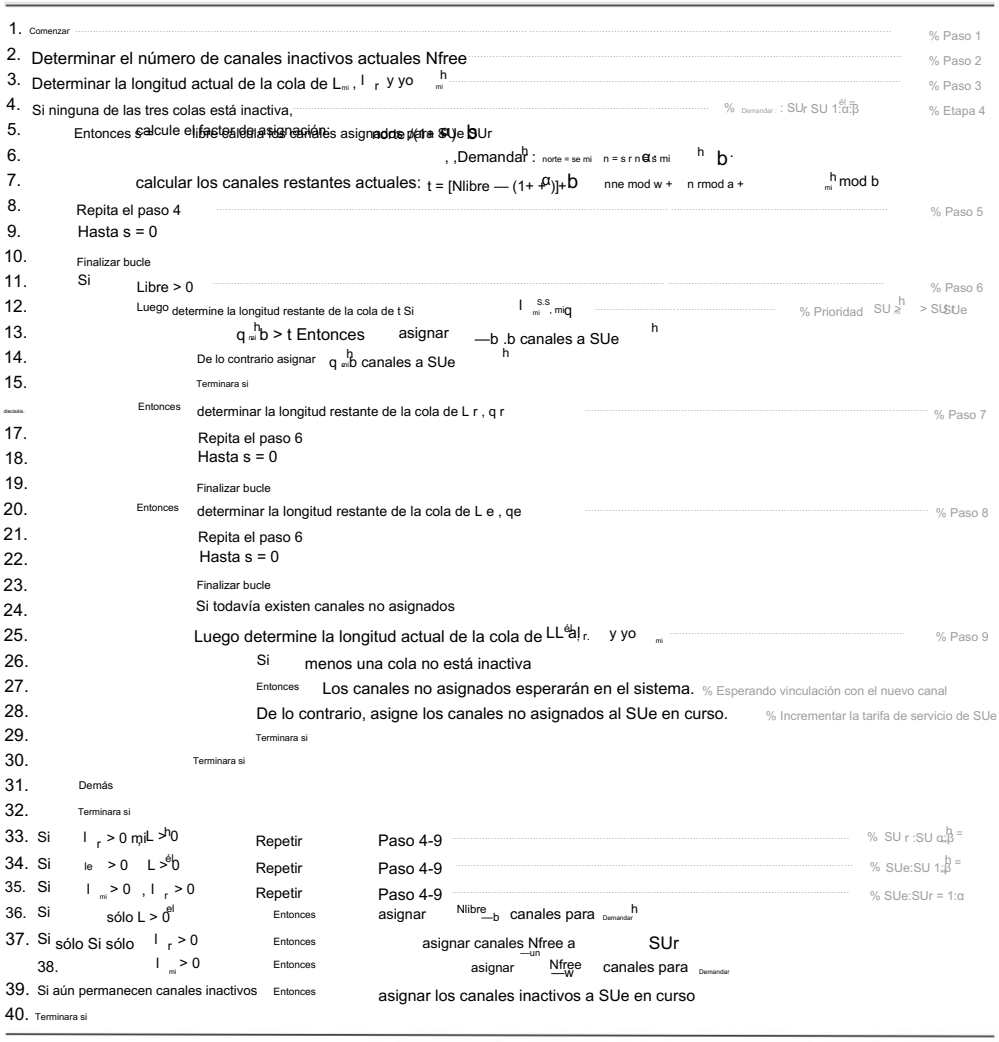
2.4. Asignación de canales basada en la estrategia Ps-rq

En el proceso de programación, se adopta tecnología de ensamblaje de canales para mejorar la tasa de servicio de las SU ensamblando uno o más canales en las SU. Mientras tanto, se utiliza tecnología de adaptación del espectro para permitir la asignación adaptativa de los canales ensamblados. Para los CRN con servicios de tipos múltiples, la asignación de canales basada en la estrategia Ps-rq es la siguiente: el SUr y el SUh marcado se ensamblan con un número fijo de canales para garantizar la eficiencia de la transmisión. Más concretamente, se puede iniciar el servicio de SUr . En consecuencia, SUh al agregar a canales, donde a Z puede iniciar el canales, donde b Z . La diferencia es que SUe puede ajustar dinámicamente y de manera flexible la cantidad de canales ensamblados según la tecnología de adaptación del espectro. Ser *. Específico, el servicio de SUe se puede iniciar agregando w canales, y la tasa de servicio se puede mejorar aumentando los canales agregados hasta el límite superior v, donde w, v Z y w ≤ v. Para facilitar el inicio del servicio de SUr y el marcado SUh la parametrización de este estudio se basa en a = b < w. Supongamos que la tasa de servicio de las SU aumenta linealmente después de que se adopta la tecnología de ensamblaje de canales, la tasa de servicio de las SU con canales de ensamblaje aumenta una vez .

Los canales se asignan a las SU en función de la asignación proporcional de canales con prioridad. Según la prioridad de la cola L > Lr > Le , si hay Nf canales inactivos, detecte si las tres colas están vacías. Si ninguno de ellos está vacío, el canal inactivo se asigna a SUh e , SUr y SUe en la cola en proporción de 1: α : β, donde α, β ≥ 1. Aquí, el valor de α, β se puede determinar de acuerdo a los requisitos de prioridad y tolerancia de retardo de SUh e , SUr y SUe . Luego, los canales restantes se asignan a SUh e según prioridad, seguido de SUr y SUr .

Si solo dos de las colas no están vacías, el proceso de asignación es el mismo que el anterior. Si solo uno no está vacío, todos los canales libres se asignan a esta cola. Además, si todavía hay canales inactivos, los canales restantes se asignan al SUe en curso . El proceso de asignación anterior se realiza en MATLAB, y la asignación proporcional de canales con prioridad se muestra en el Esquema 1. Aquí, el número de canales inactivos aún lo determinan las SU que obtienen información de los canales inactivos disponibles a través de la tecnología de detección de energía del espectro para lograr un acceso oportunista.

Machine Translated by Google



Esquema 1. Asignación proporcional de canales con prioridad.

3. Proceso de acceso dinámico al canal

En las CRN, los comportamientos de llegada y salida de las PU y SU dan como resultado un cambio en el estado del sistema. Para analizar el proceso de flujo de recursos de las SU en diferentes estados del sistema, el proceso de acceso dinámico al canal basado en la estrategia Ps-rq propuesta es investigado en esta sección clasificando las actividades del usuario en los CRN en cuatro eventos: Llegada PU, salida PU, llegada SU y salida SU.

• Evento A: llegada de PU

Las SU en CRN se clasifican en servicios elásticos y servicios en tiempo real según sensibilidad al retardo. Los servicios elásticos tienen las características de estructura corta, pesada flujo de tráfico y alta tolerancia a retrasos. Los servicios en tiempo real requieren la puntualidad de los datos transmisión. Según la tolerancia de retraso, la prioridad del servicio se define de la siguiente manera:

Cuando llega la PU, si hay un canal inactivo en el sistema, se asignará a la PU recién llegada. En este caso, los servicios de otras SU no se verán afectados. Pero si Si no hay canales inactivos en el sistema, la PU interrumpirá cualquier canal en curso. de las SU debido a la mayor prioridad de acceso a los datos. La SU interrumpida saldrá del canal. y realizar la adaptación del espectro. Es decir, la SUe en curso con el número máximo de canales donará el canal a la SU interrumpida hasta que los canales ensamblados de SUe no puede soportar el servicio, entonces la SUe en curso con el segundo número máximo de canales donará su canal . . . hasta que todos los SUe no puedan proporcionar los servicios requeridos número de canales de la SU interrumpida. Entonces, la adaptación falla, lo que significa que todos

Machine Translated by Google

la SUe en curso no puede donar el canal para la SU interrumpida. La SUe que falla el
La adaptación ingresará al clasificador de paquetes II y marcará la prioridad a través de un controlador difuso. Si
la SUe pertenece a SUh $_{e}$, entrará en la cola reservada L $^{h}_{mi}$; de lo contrario, volverá a
el final de la cola Le . Si la cola está llena, el servicio de la SU se verá obligado a finalizar.

Si la PU se adelanta al canal de un SUr o de un SUh marcado $_{e}$, la adaptación del espectro
realizarse de la misma manera. El servicio continuará cuando la adaptación sea exitosa;
de lo contrario, el SUr o SUh interrumpido $_{mi}$ se verá obligado a terminar y liberar el ensamblado
canal.

En particular, los canales liberados por el SUh despedido por la fuerza o SUr no puede ser
el canal inactivo se puede utilizar para el canal en curso cuyos canales ensamblados no se han utilizado para
iniciar el servicio de las SU en la cola debido a la configuración de a = b < w. sin embargo, el
alcanzar el límite superior con la tecnología de ensamblaje de canales.
Los canales liberados por la SUe terminada a la fuerza se pueden utilizar para la cola SUh $_{mi}$ y SU
Específicamente, el canal inactivo se asigna preferentemente a , obedeciendo en Lr . La asignación
en L $^{h}_{mi}$ de canales de las SU en la cola sigue el Esquema 1. Si no hay ninguna SU en la cola
regla de servicio por orden de llegada (FCFS). El servicio de puede iniciarse sólo cuando :
La cola utiliza el canal inactivo, estos canales se ensamblarán en otras SU , obedeciendo la Regla 1.
Existen canales gratuitos en el sistema. Si los en la cola no usan el canal inactivo, se
Regla 1: El canal inactivo se ensamblará preferentemente al SUe en curso con el
agregan canales mínimos hasta que el SUe se ensambla en el límite superior, v. Si hay
El canal se puede ensamblar para en , v el servicio de . Solo se pueden
iniciar los canales que aún están inactivos, los canales restantes se ensamblarán en el SUe en curso con
los segundos canales agregados mínimos hasta que todos los SUe en curso alcancen la parte superior
cuando − existen canales libres en el sistema. Si ambos en la cola no se unen, v:
Utilice el canal inactivo, el canal se puede montar en . De manera similar, el servicio Presentamos un diagrama
de flujo, como se muestra en la Figura 3, para mostrar el acceso dinámico al canal.
de sólo se puede iniciar cuando ya existen canales inactivos en el sistema. Si no hay
proceso basado en la estrategia Ps-rq al llegar la PU. De manera similar, otros eventos, incluido PU
Las SU en la cola utilizan el canal inactivo y este canal se ensamblará en el proceso de acceso de las SU en
Salida, llegada de SU y salida de SU también pueden utilizar el diagrama de flujo para describir el canal.
en el sistema, obedeciendo la Regla 1.
curso.

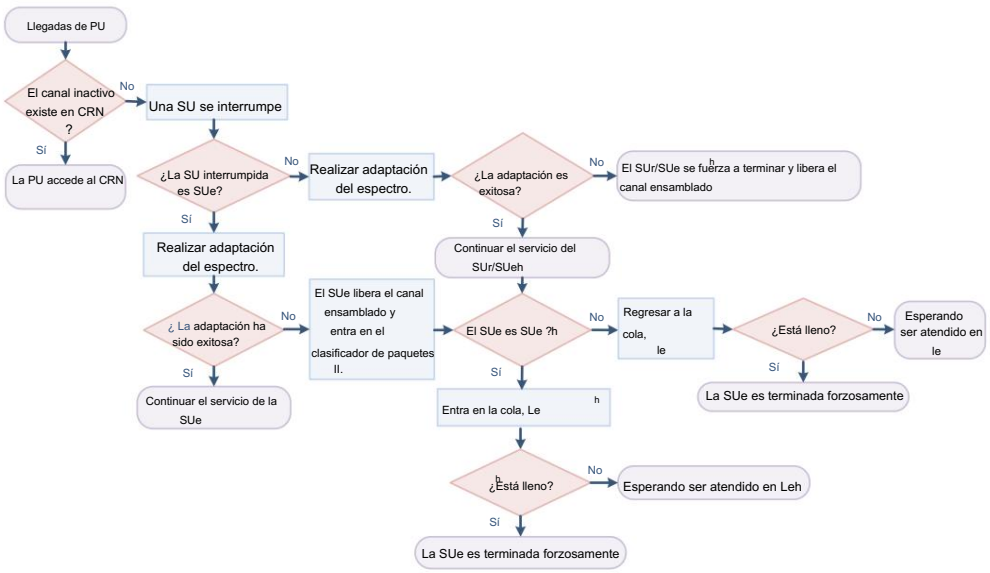


Figura 3. El proceso dinámico de acceso al canal basado en la estrategia Ps-rq a la llegada de la PU.
Figura 3. El proceso dinámico de acceso al canal basado en la estrategia Ps-rq al llegar la PU.

• Evento C: llegada a SU
Evento B: salida de PU

Hay tres tipos de llegadas de SU: la primera, entre ellas y La salida de una PU libera un canal.
El canal liberado será preferentemente .
Si la SU que llega al sistema es y hay canales inactivos en el sistema, el canal inactivo se
utilizado para las SU que esperan en la cola. Si las SU en la cola no usan el canal inactivo,
puede utilizar para la SUe en curso cuyos canales ensamblados no han alcanzado
luego el servicio del recién llegado se puede iniciar. De manera similar, el servicio
del límite superior con la tecnología de ensamblaje de canales.
recién llegado se puede iniciar cuando el número de canales existentes en Específicamente, el canal inactivo se asigna preferentemente a SUh $_{mi}$ en L $_{e}$, obedeciendo la regla
el sistema alcanza el valor mínimo w o a . Si los canales libres en el sistema no pueden del servicio por orden de llegada (FCFS). El servicio de SUh $_{m}$ sólo se puede iniciar cuando b − 1 está libre
respaldar el servicio, el actual realizará la adaptación del espectro para donar el se puede existir canales en el sistema. Si el SUh en la cola no use el canal inactivo, el canal
canal para las SU recién llegadas. Si todos los que están en curso no pueden proporcionar el SUr en la ensamblar a SUr en Lr , y el servicio de SUr se puede iniciar solo cuando a − 1 libre
número requerido de canales, la SU recién llegada se clasificará al final de la cola correspondiente. Si la cola existen canales en el sistema. Si ambos SUh $_{m}$ cola no usan el canal inactivo,
está llena, se bloqueará el servicio de la SU. Sin embargo, dado que todo el cuándo está lleno, El canal se puede montar en SUe en Le . Del mismo modo, el servicio de SUe sólo se puede iniciar
entrar en la cola proviene de la interrumpida ,
el servicio de Se verá obligado a terminar, es decir, no hay ningún bloqueado. .

• Evento D: salida de SU

Machine Translated by Google

cuando ya existen w − 1 canales inactivos en el sistema. Si ninguna SU en la cola utiliza el canal inactivo, el canal se ensamblará con las SU en curso en el sistema, obedeciendo la Regla 1.

• Evento C: llegada a SU

Hay tres tipos de llegadas SU al sistema, incluidas SUh e , SUe y SUr . la SU que llega al sistema es Si SUh y hay canales inactivos en el sistema, entonces se puede iniciar el servicio de la SUh recién llegada . Del mismo modo, el servicio del SUe o SUr recién llegado se podrá poner en marcha cuando el número de canales existentes en el sistema alcance el valor mínimo w o a. Si los canales gratuitos del sistema no pueden soportar el servicio, la SUe en curso realizará una adaptación del espectro para donar el canal a las SU recién llegadas. Si todas las SUe en curso no pueden proporcionar la cantidad requerida de canales, la SU recién llegada se clasificará al final de la cola correspondiente. Si la cola está llena, se bloqueará el servicio de la SU. Sin embargo, dado que todos los SUh e que entran en la cola están llenos, el servicio de SUh se verá obligado a

h provienen de la SUe interrumpida , cuando L terminar, es decir, no hay SUh bloqueado .

• Evento D: salida de SU

La salida de SU libera todos los canales agregados. Es decir, la salida de SUe libera k (w ≤ k ≤ v) canales; la salida de SUr libera canales ; y la salida de SUh lanza canales b . El esquema 1 se utiliza para asignar los canales liberados por las SU, donde es la suma del número de canales liberados por las SU y el número de canales libres inactivos en el sistema. Si todavía hay canales inactivos después de que se hayan reunido todas las SU que esperan en la cola, el canal inactivo se asignará a la SUe en curso , obedeciendo la Regla 1.

4. Análisis CTMC y medidas de QoS

En el proceso de acceso al canal, las actividades del usuario desencadenan el cambio en el estado del sistema. Las cadenas de Markov de tiempo continuo (CTMC) se utilizan para establecer una relación correspondiente entre la posible transición de estado del sistema y los eventos desencadenantes que causan el cambio en el estado del sistema, que puede representar el flujo de recursos del espectro entre SU de varios tipos . Por tanto, el análisis de rendimiento del sistema secundario se puede realizar mediante el CTMC. Las actividades de las SU se pueden mapear en el espacio de probabilidad multidimensional. Luego, se puede establecer el modelo matemático de la estrategia Ps-rq propuesta para obtener las métricas de QoS a través de la solución de estado estacionario y se puede evaluar el desempeño del sistema secundario.

4.1. Programación de análisis dinámico y modelado CTMC.

Tenga en cuenta que el estado general es el siguiente:

$$x = lw, \ldots, lv, ga, gb, lpu, leq, lrq, lhq$$

donde lm (w ≤ m ≤ v) es el número de SUe con m canales agregados, ga es el número de SUr con canales agregados , gb es el número de SUh con b canales agregados, lpu es el número de PU en el sistema y leq, lrq y lhq son las longitudes de cola actuales de Le , Lr y Le , respectivamente .

Además, el conjunto de estados factibles del sistema se puede indicar como

$$S = lw, \ldots, lv, ga, gb, lpu, leq, lrq, lhq \geq 0;\ b(x) \leq M;\ leq \leq Qeq;\ lrq \leq Qrq;\ lhq \leq Qhq;\ \sum_{yo=1}^{v-w} ilw+i < w, \text{ si } leq > 0 \quad (4)$$

Aquí, Qeq, Qrq y Qhq son las capacidades totales de Le , Lr y Le , respectivamente. si leq > 0 significa que si Le no está vacío, la $\sum_{yo=1}^{v-w} ilw+yo < w$, suma del número máximo de canales

Machine Translated by Google

que todas las SUe en curso pueden donar siempre serán menores que su número mínimo de agregación. b(x) es el número total de canales utilizados en el estado x que puede describirse mediante:

$$b(x) = lpu + aga + bgb + \sum_{m=}^{v} wmlm \quad (5)$$

Además, M − b(x) es el número de canales inactivos en el sistema (es decir, Nf ree asumido en el Esquema 1).

Para analizar la tasa de transición del estado general x a otros estados, asumimos que la llegada del usuario al sistema obedece a la distribución de Poisson y la salida obedece a la distribución exponencial. Tenga en cuenta que la tasa de llegada de PU es λp y la tasa de salida es μp. Las tasas de llegada de SUr y SUe son λsr y λse, y las tasas de salida son μsr y μse, respectivamente. Además, la programación con bucle de retroalimentación de SUe puede provocar que la llegada externa de los servicios que entran en Le y L ya no obedezcan a la distribución de Poisson. Para simplificar nuestro análisis, suponemos que el establecimiento del circuito de retroalimentación tiene poco efecto sobre los servicios en Le y L y suponemos que la llegada ex Todos los servicios obedecen a la distribución de Poisson.

Con base en los supuestos anteriores, analizando el proceso de acceso al canal, se establece el modelo CTMC basado en la estrategia Ps-rq. Se desarrollan todos los posibles estados de destino, actividades, tasas de transición y condiciones de transición del sistema a partir del estado general x .

• Evento A: llegada de PU

Tras la llegada de la PU, las transiciones de estado del sistema secundario comenzando desde el estado general x hasta todos los eventos desencadenantes posibles se derivan como se muestra en la Figura 4, y las condiciones de transición para todos los estados posibles se enumeran en la Figura 5. Excepto el estado t1 en Como muestra la figura, no hay canales inactivos en el sistema que puedan asignarse directamente a la PU llegada. Por tanto, existe M − b(x) = 0 desde el estado t2 hasta el estado t35.

La llegada de la PU puede adelantarse al servicio de cualquier SU. Del estado t4 al estado t14 y del estado t16 al estado t17 de interrupción del servicio en la Figura 5, indica que las SU en estos estados no pueden realizar la adaptación del espectro, es decir, m (w < m ≤ v), lm = 0. Dado que Lr no tiene bucle de retroalimentación, el servicio del SUr interrumpido se verá obligado a terminar, como en el estado t30 al estado t32.

En el estado t3 y el estado t15, puede haber dos casos en los que las SU no realizan la adaptación del espectro: no hay ningún usuario secundario en el sistema que pueda realizar la adaptación, es decir m (w < m ≤ v), lm = 0, o las SU en el sistema no pueden realizar la adaptación del espectro y m (h = m = v), lm > 0. Se deben cumplir condiciones similares para los estados t18, t30 y t33.

Además, dado que a = b < w, a = b ≤ w − 1. Es decir, los canales liberados por el in SUe interrumpido no puede iniciar el servicio de SUe en Le sino el servicio de SUr y SUh h Lr y L liberado por el SUe terminado forzosamente, canales se puede iniciar, como en el estado t6 al estado t14. Esto es lo mismo que los canales liberados por el SUr interrumpido o el SUr terminado y el inicio de como en el estado t21 al estado t29. Sin embargo, cualquier servicio de SU en la cola. • Evento B: salida de PU no pueden apoyar la

Tras la salida de la PU, las transiciones de estado del sistema secundario comenzando desde el estado general x hasta todos los eventos desencadenantes posibles se derivan en la Figura 6, y las condiciones de transición para todos los estados posibles se enumeran en la Figura 7.

En este caso, si la cola L no está vacío y b = 1, entonces el servicio de SUh en la cola se puede iniciar directamente. Si b > 1, entonces se requiere M − b(x) = b − 1, es decir, existen b − 1 canales en el sistema, como en el estado t1. Esto es lo mismo que SUr como el del estado t2. Dado que a = b < w, es decir, w = 1, el servicio de SUe en Le sólo puede iniciarse bajo la condición de M − b(x) = w − 1, como en el estado t3.

Machine Translated by Google

Figura 4. La transición del sistema desde el estado general x a todos los estados alcanzables al llegar la PU.

Machine Translated by Google

Figura 5. Las condiciones de transición del sistema desde el estado general x a todos los estados alcanzables en PU llegada.

Machine Translated by Google

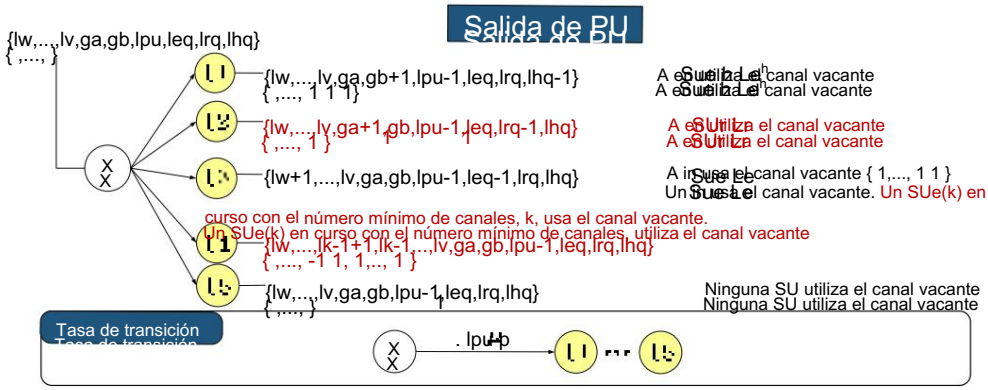


Figura 6. La transición del sistema desde el estado general x a todos los estados alcanzables al salir la PU.

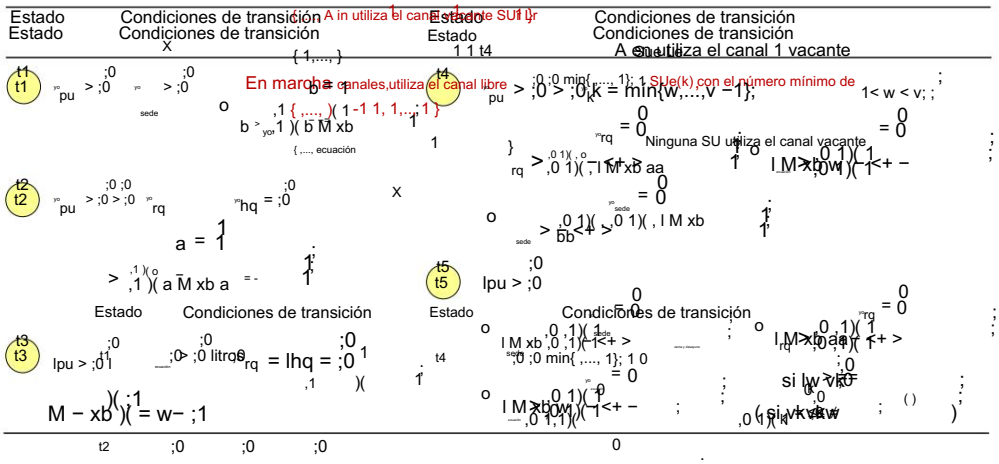


Figura 7. Condiciones de transición del sistema desde el estado general x a todos los estados alcanzables en PU salida.

• Evento C: llegada a SU

A la llegada de la SU, las transiciones de estado del sistema secundario a partir del estado general x de todos los eventos desencadenantes posibles se deriva como se muestra en la Figura 8, y el Las condiciones de transición para todos los estados posibles se enumeran en la Figura 9.

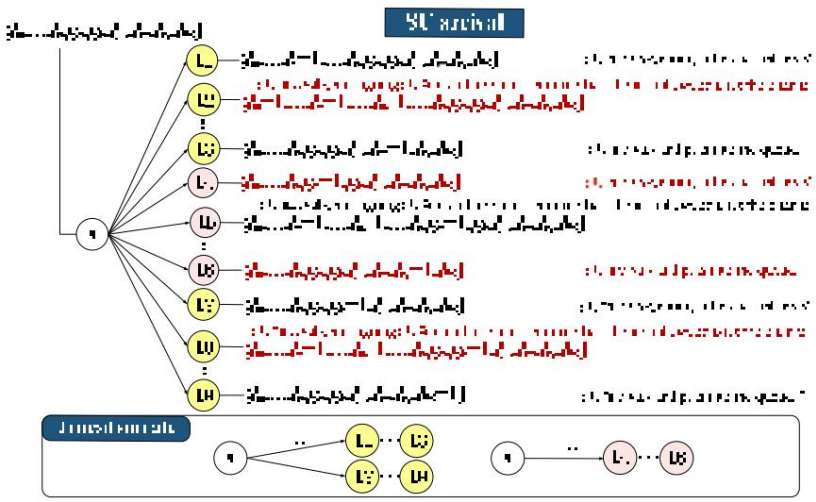


Figura 8. La transición del sistema desde el estado general x a todos los estados alcanzables al llegar a SU.

Machine Translated by Google

Estado	Condiciones de transición	Estado	Condiciones de transición
t1	M − xb)(> w;	t6	rq Qrq l <; si Mvw xb)(− < ( ) m lw un ; si w=Mvm xb a)(
t2	lm > ;0 m = máx{w +1,..., v}; < vw ; mh +− M − xb)(= w;	t7	M − xb)(> b;
t3	eq Qeq l <; Mvw xb)(si w − ( ) < ; si w=Mvm xb w)(	t8	lm > ;0 m = máx{w +1,..., v}; w < v; mh +− M − xb = b;)(
t4	M − xb)(> a;	t9	hq Qhq l < si Mvw xb ;)(+ ( ) m lw b < ; si w Mvm xb)(<
t5	lm > ;0 m = máx{w+1,...,v}; mh +− M ;)(xb)(= a;		

Figura 9. Condiciones de transición del sistema desde el estado general x a todos los estados alcanzables en SU (llegada.

La condición del servicio de SUe podrá iniciarse cuando su arribo sea la suma de el número de canales inactivos existentes en el sistema y los canales que pueden ser donados por las SU en curso no son menores que el límite inferior de SUe , es decir, M − b(x) + $\sum_{metro=w+1}^{v}$ (metro − w)lm ≥ w. De lo contrario, se pondrá en la cola Le , siempre que leq < Qeq, como en el estado t3. SUr y SUh llegan de la misma manera, es decir, estado t6 y estado t9.

• Evento D: salida de SU

Tras la salida de SU, las transiciones de estado del sistema secundario a partir del El estado general x para todos los eventos desencadenantes posibles se deriva como se muestra en la Figura 10, y el Las condiciones de transición para todos los estados posibles se enumeran en la Figura 11.

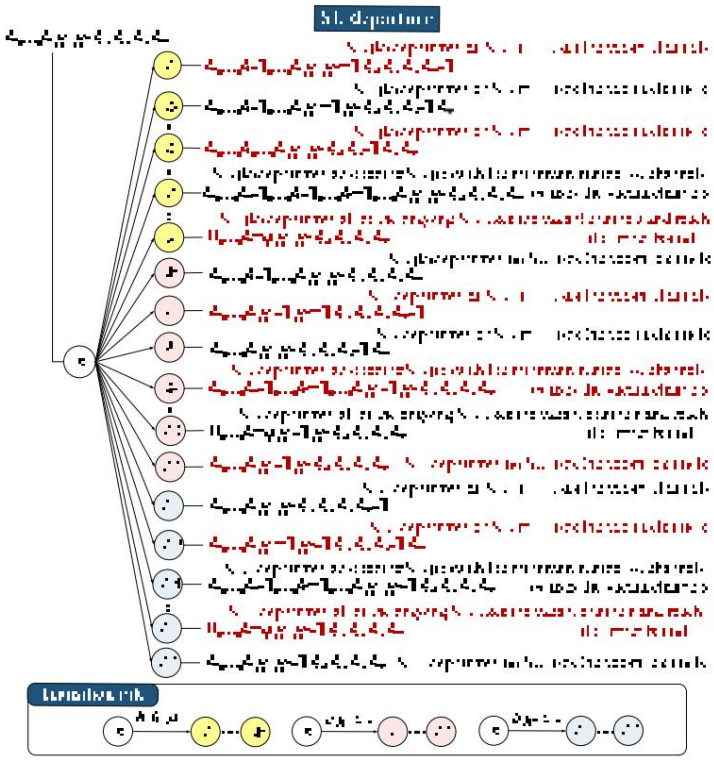


Figura 10. La transición del sistema desde el estado general x a todos los estados alcanzables al salir de SU.

Machine Translated by Google

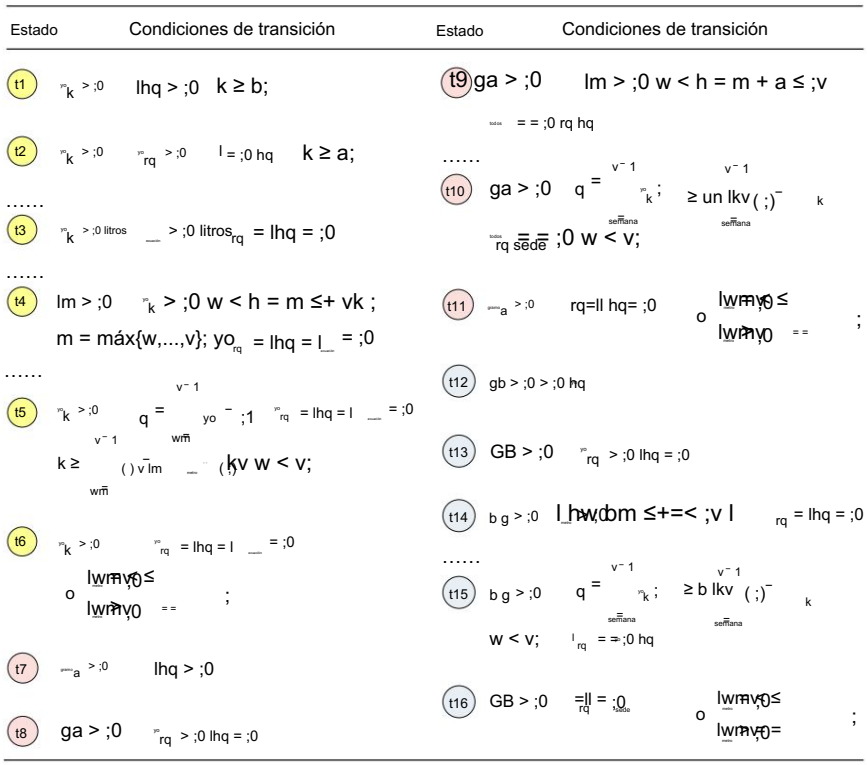


Figura 11. Las condiciones de transición del sistema desde el estado general x a todos los estados alcanzables en Salida de la SU.

En este caso, el número total de canales inactivos utilizados por las SU en curso no debe ser mayor que el número de canales liberados por las SU salientes, como la condición de $k \geq \sum_{m=w}^{v-1} (v-m)\mu - (v-k)$ en el estado t5. Esto es similar al del estado t10 y al estado t15.

4.2. Métricas de calidad de servicio

A través del modelado CTMC, cualquier posible actividad del usuario puede desencadenar la transición de cualquier estado alcanzable ti a otro estado alcanzable tj , como se muestra en las Figuras 4-11. qij (yo, j S e i = j) representa la tasa de transición total, donde S es el conjunto de estados factibles del sistema. Sea π(x) la probabilidad de estado estacionario del sistema, que puede calcularse a partir de datos globales. ecuaciones de equilibrio y la condición de normalización de la siguiente manera.

$$\pi(x)Q = 0, \sum_x \pi(x) = 1 \quad (6)$$

donde π(x) es el vector de probabilidad de estado estacionario y Q es la matriz de tasas de transición generada por la tasa de transición qij. Los elementos diagonales de la matriz de tasas de transición Q, qii pueden se encuentra como $q_{ii} = -\sum_{j=i} q_{ij}$. Por lo tanto, las métricas de QoS del sistema secundario basadas en la Se puede obtener la estrategia Ps-rq propuesta.

- La capacidad de la red se refiere al número promedio de servicios SU completados en los CRN por unidad de tiempo (unidad: paquete/unidad de tiempo) [12]. Sean Ce , Cr las capacidades de SUe , SUr , respectivamente, podemos obtener:

$$Cr = \sum_{x \in S} a_g a \mu_{sr} \pi(x), \quad (7)$$

$$Ce = \sum_{x \in S} \sum_{k=w}^{v} (k l_k + b_{gb}) \mu_{se} \pi(x) \quad (8)$$

donde x S es el conjunto de todos los estados posibles en los sistemas contenidos en las figuras 4-11.

Machine Translated by Google

• La utilización del espectro se refiere a la relación entre el número promedio de canales utilizados y el número total de canales disponibles [25], que puede determinarse mediante:

$$U = \sum_{x \in S} \pi(x) \frac{b(x)}{M} \quad (9)$$

donde b(x) es el número total de canales disponibles del estado x, M es el número total de canales en el sistema y S es el conjunto de todos los estados de transición posibles contenidos en las Figuras 4-11.

• La probabilidad de bloqueo se refiere a la probabilidad de que la SU recién llegada no pueda recibir servicio debido a que todos los canales del sistema están ocupados. Dado que en este estudio la cola de espera está configurada para las SU, el servicio de la SU recién llegada se bloqueará cuando la cola correspondiente esté llena. Cabe señalar que el SUh h es el e que ingresa a L SUe interrumpido por la PU, pero no las SU que recién llegan al sistema.

Por lo tanto, el SUh n_{mi} tiene el caso de ser bloqueado.

El SUe recién llegado se bloqueará si se cumplen las dos condiciones siguientes: (1) la suma del número total de canales inactivos en el sistema y el número total de canales que puede donar el SUe en curso no son suficientes para comenzar el servicio de SUe (es decir , no se alcanza el límite inferior de ensamblaje de canales) y (2) la cola, Le , está llena. Por lo tanto, la probabilidad de bloqueo de SUe , P_b ,

^{mi} se puede obtener mediante:

$$P_b^{mi} = \sum_{ae} \pi(x) \quad (10)$$

donde el conjunto Ae es la condición de activación para la cual se bloquea SUe :

$$Ae = x \quad S, leq = Qeq, M - b(x) + \sum_{k=w+1}^{v} (k - w)lk < w$$

De manera similar, el SUr recién llegado se bloqueará si se cumplen las dos condiciones siguientes: (1) la suma del número total de canales inactivos en el sistema y el número total de canales que puede donar el SUe en curso no son suficientes para iniciar el servicio del SUr y (2) la cola, Lr , está llena. Entonces, la probabilidad de bloqueo de SUr ,P puede determinarse $_b^r$, mediante:

$$P_b^r = \sum_{Arkansas} \pi(x) \quad (11)$$

donde el conjunto Ae es la condición de activación para la cual se bloquea SUe :

$$Ar = x \quad S, lrq = Qrq, M - b(x) + \sum_{k=w+1}^{v} (k - w)lk < a$$

• La probabilidad de terminación forzada se refiere a la probabilidad de que las SU atendidas se vean obligadas a terminar debido a la llegada de una PU. Como conjunto del bucle de retroalimentación de SUe , la SUe interrumpida por la PU puede regresar a la cola Le y Le a través del clasificador de paquetes Il. Si la cola correspondiente está llena, el servicio se verá obligado a finalizar.

En consecuencia, el servicio de SUh se ve obligado a terminar cuando se cumplen las tres condiciones siguientes: (1) no hay canales inactivos en el sistema; (2) la SUe en curso no puede realizar la adaptación del espectro para compartir canales con las SU interrumpidas y (3) la cola h está llena. Para ser específico, los estados t33 a t35 en la Figura 4 indican que la PU se adelanta a cualquier SUh L

$_e$, ^{mi}

con b canales agregados, y el SUh $_{mi}$ se ve obligado a terminar. La terminación forzosa

Machine Translated by Google

probabilidad de SUh $P_{f,e}^{eh}$ se puede calcular mediante la relación entre la terminación forzosa promedio probabilidad a la tasa de llegada de SUh e , λse, como sigue:

$$pf^{eh} = \sum_{B_{mi}^{h}} \pi(x) \frac{\lambda pbgb}{(M - lpu)\lambda se} \quad (12)$$

h donde B_{mi} es el conjunto de condiciones por las que SUh se ve obligado a rescindir:

$$B_{mi}^{h} = x \quad S, M = b(x), lpu < M, gb > 0, lhq = Qhq, o \quad m(w = \begin{matrix} m(w < m \le v), lm = 0 \\ m = v), lm > 0 \end{matrix}$$

De manera similar, el servicio de SUe se ve obligado a finalizar cuando se cumplen las tres condiciones siguientes: (1) después de ser reemplazado, el número de canales restantes de SUe es insuficiente para iniciar el servicio, es decir, el SUe con w canales agregados es adelantado; (2) la SUe en curso no puede realizar la adaptación del espectro para compartir canales con las SU interrumpidas y (3) la cola, Le , está llena. Sobre esta base, los estados t18 a t29 en la Figura 4 indican que la PU se adelanta a cualquier SUe con w canales ensamblados, y la SUe se ve obligada a terminar. La probabilidad de terminación forzada de SUe , P se puede obtener mediante: f , $_{mi}$

$$pf^{mi} = \sum_{Ser} \pi(x) \frac{\lambda pwlw}{(M - lpu)\Lambda e} \quad (13)$$

donde Λe representa la tasa de llegada de SUe que no está bloqueada: Λe = λse(1 − P el conjunto de $_{b}^{mi}$) y ser es condiciones por las cuales SUe se ve obligada a terminar:

$$Be = x \quad S, M = b(x), lpu < M, lw > 0, leq = Qeq, o \quad \begin{matrix} metro(w < metro \le v), lm = 0 \\ m(w = m = v), lm > 0 \end{matrix}$$

Dado que el bucle de retroalimentación no está configurado para la cola Lr , si se cumplen las dos condiciones siguientes , el servicio de SUr se ve obligado a terminar: (1) no hay canales inactivos en el sistema para continuar su servicio y (2) el proceso en curso SUe no puede donar los canales para ello. En base a esto, los estados t30 a t32 en la Figura 4 indican que la PU se adelanta a cualquier SUr con canales agregados , y la SUr se ve obligada a terminar. La probabilidad de terminación forzada de SUr se puede obtener mediante: $P_{f,}^{r}$

$$pf^{r} = \sum_{hemano} \pi(x) \frac{\lambda paga}{(M - lpu)\Lambda r} \quad (14)$$

donde Λr representa la tasa de llegada de SUr que no está bloqueado: Λr = λsr(1 − P el conjunto de $_{b}^{r}$) y Br es condiciones por las cuales SUr se ve obligado a terminar:

$$Br = x \quad S, M = b(x), lpu < M, ga > 0, o \quad m(w = \begin{matrix} metro(w < metro \le v), lm = 0 \\ m = v), lm > 0 \end{matrix}$$

5. Análisis de desempeño de la estrategia Ps-rq propuesta 5.1. Comparación y análisis de las características del modelo

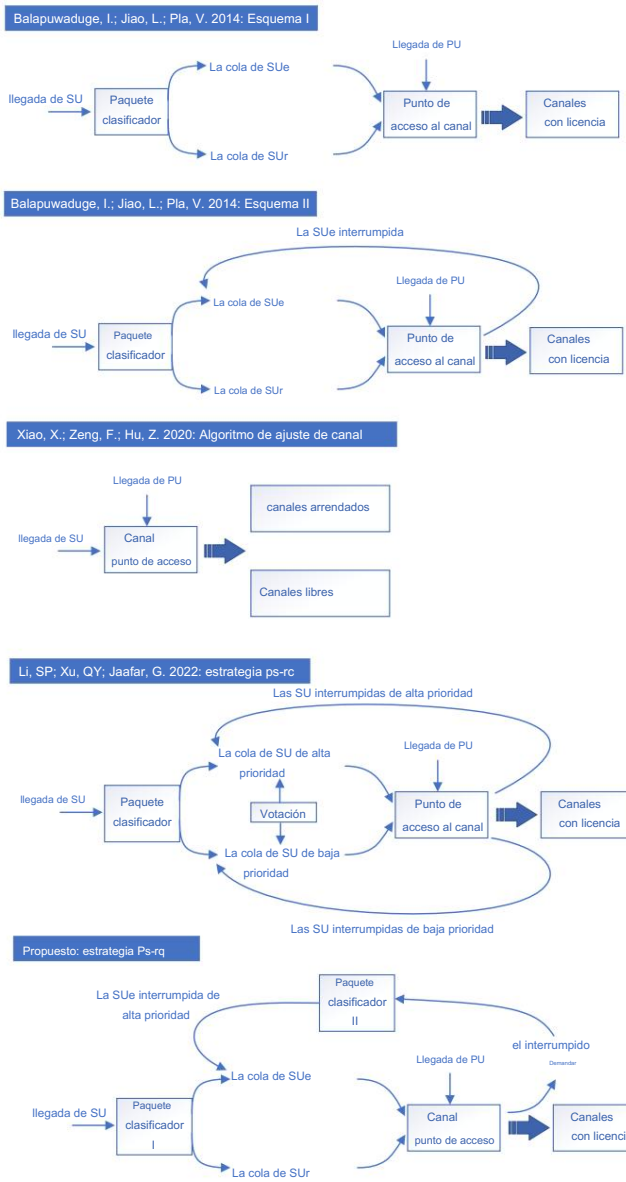
En esta sección, comparamos la estrategia Ps-rq propuesta con dos esquemas de asignación de canales clásicos (referencia [12], 2014), así como dos novedosos (referencia [18], 2020 y referencia [9], 2022), con el objetivo de ilustrar las características de la estrategia propuesta. La comparación de las características del modelo se muestra en la Figura 12.

Machine Translated by Google

. erormance nayss oe ropose s-rq raegy

5.1. Comparación y análisis de las características del modelo

En esta sección, comparamos la estrategia Ps-rq propuesta con dos esquemas de asignación de canales clásicos (referencia [12], 2014), así como dos novedosos (referencia [18], 2020 y referencia [9], 2022), con el objetivo de ilustrar las características de la estrategia propuesta. La comparación de las características del modelo se muestra en la Figura 12.



Tipo de tráfico	Mejora de la capacidad	Méritos	Limitaciones
Servicio heterogéneo	/	· Esquema sencillo · Retrasar aplicaciones críticas	· Alta probabilidad de terminación forzada · Aplicar sólo cuando PU no está activo
Servicio heterogéneo	Bucle de retroalimentación	· Reducir el despido forzoso probabilidad · Aplicaciones tolerantes a retrasos	·Las colas de SUe provocan un problema de inanición en el servicio
/	Arrendamiento de espectro	· Esquema sencillo · Fuerte realizabilidad	·La capacidad de la red se ve afectada por la escala del espectro arrendado. · Los servicios heterogéneos son no considerado
Servicio prioritario	Encuesta, bucle de retroalimentación	· Garantizar los servicios predefinidos de alta prioridad.	·La prioridad debe definirse durante la inicialización de la red. ·Difícil adaptarse al cambiante entorno de red
Servicio heterogéneo	Bucle de retroalimentación	· Aliviar el hambre problema de SUe · Programación justa	· Los tipos de servicios se dividen en detalles. ·Alta complejidad de programación

Figura 12. Comparación de las características del modelo [9,12,18].

Los modelos de investigación mencionados, como se muestra en la Figura 12, tienen como objetivo mejorar la capacidad de las redes secundarias. Al emplear el método de análisis aleatorio y establecer la correspondiente cadena de Markov de tiempo continuo para el análisis sistemático, el rendimiento métricas de desempeño para evaluar la efectividad de los esquemas de investigación. Sin embargo, los estudios mencionados han enfrentado desafíos a la hora de distinguir los tipos de servicios, como lo demuestra en [9,18], o han encontrado limitaciones al implementar aplicaciones de servicios diferenciados. debido a limitaciones del entorno de red, como la de [12].

Estas limitaciones sirven de inspiración para la estrategia descrita en este documento. El La estrategia ps-rq propuesta en este artículo tiene como objetivo proporcionar una diferenciación más equitativa servicio abordando la cuestión del hambre. Para lograr esto, empleamos clasificadores de paquetes I. y II para realizar dos niveles de diferenciación de servicios. El propósito del clasificador de paquetes I es para dividir las SU que llegan en SUe y SUr . Considerando que si el SUe interrumpido por el PU está en cola para volver a repararlo, inevitablemente conducirá al problema de hambre de otro cola. El modelo propuesto en este artículo, por lo tanto, considera los requisitos de servicio de el SUe de alta prioridad parcialmente interrumpido e incorpora el clasificador de paquetes 2 para garantizar la equidad prestación de servicios ofreciendo servicios diferenciados, lo que representa un aspecto destacable

Machine Translated by Google

de nuestro marco de investigación. Sin embargo, la complejidad de la estrategia de programación propuesta sigue siendo difícil de eludir a la luz del refinamiento de la clasificación de los servicios. A continuación, realizaremos un análisis de desempeño detallado de la estrategia de investigación Ps-rq presentada en este artículo.

5.2. Simulación y Análisis Numérico

Para ilustrar el rendimiento del sistema secundario basado en la estrategia de ensamblaje de canales propuesta, en esta sección se presentan los resultados de la simulación numérica de servicios elásticos y servicios en tiempo real basados en MATLAB. Los resultados de la simulación se basan en el procedimiento para la reducción dimensional de cadenas de Markov de alta dimensión. Para verificar el modelo desarrollado, presentamos los resultados de la simulación del rendimiento del sistema secundario bajo diferentes tasas de llegada de usuarios primarios. Los parámetros básicos de la simulación numérica se establecen de la siguiente manera.

El número de PU en el sistema se establece en 6 (M = 6) y el experimento numérico se lleva a cabo en un CRN con seis canales que comparten el ancho de banda del espectro. La tasa de llegada de la PU se establece en λp = 1 y la tasa de salida se establece en μp = 0,5. La tasa de llegada y la tasa de salida del servicio elástico se establecen como λse = 2 y μse = 1, respectivamente, y la del servicio en tiempo real se establece como λsr = 1 y μsr = 1. Tenga en cuenta que la unidad de estos parámetros es “sesiones por unidad de tiempo”. Al asignar valores específicos a estos parámetros, como 0,5 sesiones/seg y longitud del flujo en bits, la capacidad se puede cuantificar en términos de kbps o Mbps.

Los parámetros dinámicos del sistema a, b, w, v, Qeq, Qrq, Qhq) en el proceso de acceso al espectro se fijan como a = b = 1, w = 2, v = 4, Qeq = 2, Qrq = 1 y Qhq = 1. El coeficiente de partición proporcional es α : β = 1 : 1. Según la configuración del sistema anterior, se puede especificar el estado general x del sistema en la Sección 4.1 :

$$\begin{matrix} 3 & 2 & 1 & & & 6 & 2 & 1 & 1 \\ (\, l2 & l3 & l4 & g1 & g1 & lpu & qeq & qrq & Qhq) \end{matrix}^{6\,6} \tag{15}$$

donde li (i = 2, 3, 4) representa SUe que agrega i canales y ga, gb representa SUr con a canales agregados o SUh con b canales agregados (a = b = 1); el superíndice de cada posición indica el límite superior del número de usuarios en el correspondiente

2

posición, como l3, que indica que hay como máximo dos SUe ensamblando tres

6

canales en el sistema al mismo tiempo, lpu, lo que significa que existen como máximo seis PU en el

2

sistema al mismo tiempo y Qeq, lo que indica que la capacidad máxima de la cola Le es 2.

La simulación numérica se basa en el estado general parametrizado. El procedimiento para la reducción de dimensiones de cadenas de Markov de alta dimensión se presenta a continuación.
Dado que el estado general asumido en este artículo es de alta dimensión, es difícil generar directamente la matriz de tasa de transición Q. Por lo tanto, consideramos degradar los marcadores de alta dimensionalidad. Teóricamente, el tamaño de la matriz Q es 2592 × 2592, que se genera por el producto de los superíndices de la Ecuación (15). Tome cualquier estado general I : (1 0 0 1 1 1 0 0 0) existente en el sistema para mostrar el proceso de degradación de la siguiente manera.
El estado I : (1 0 0 1 1 1 0 0 0) indica que el sistema tiene una SUe en curso con dos canales agregados, una SUr en curso con un canal agregado, una SUh en curso con un canal agregado y una PU en curso. Por lo tanto, existen cinco flujos en el sistema en este estado. En consecuencia, el estado I : (1 0 0 1 1 1 0 0 0) puede marcarse como estado l5, −, donde la primera posición del subíndice representa el número total de flujos coexistentes en el sistema, y la segunda posición es el conteo en orden, y el límite superior es la suma de los posibles estados de combinación con cinco flujos en el sistema. Si la llegada de un usuario al sistema se produce en este estado, como la llegada de una PU, entonces la transición de estado correspondiente es (1 0 0 1 1 1 0 0 0) → (1 0 0 1 1 2 0 0 0). En este caso, existen seis flujos coexistiendo en el sistema y el proceso de transición está marcado como l5, − → l6, − .

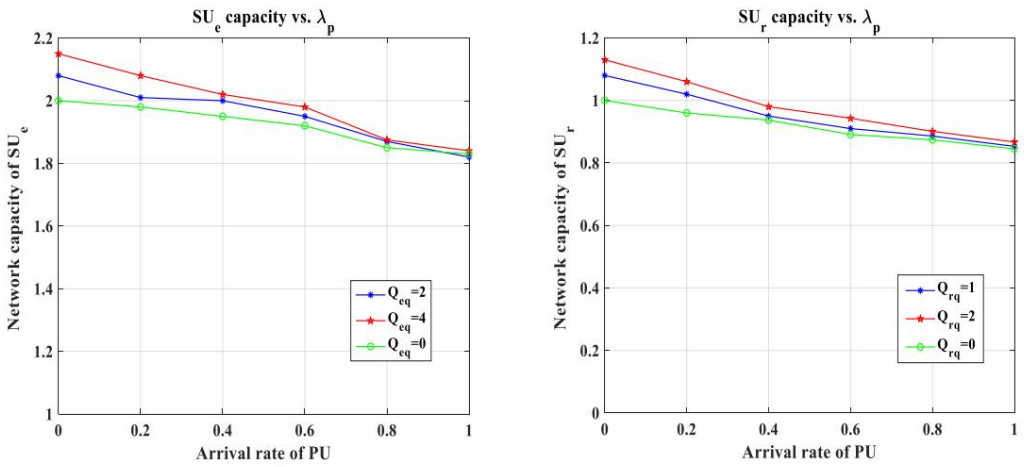
Si se produce una salida de usuario en

Machine Translated by Google

el sistema en este estado, como un SUhe salida, luego la transición de estado correspondiente es (1 0 0 1 1 1 0 0 0) → (0 1 0 1 0 1 0 0 0). En este caso, hay cuatro flujos que coexisten en el sistema y el proceso de transición está marcado como I5, − → I4, − . Según las Figuras 4 a 11, Los posibles eventos de transición y las tasas de transición del sistema en cualquier estado general pueden obtenerse, y luego se puede desarrollar la matriz de tasa de transición Q. Además, el probabilidad de estado estacionario π(x) se puede resolver y las métricas de rendimiento de la secundaria sistema, incluida su capacidad de red, utilización del espectro, probabilidad de bloqueo y La probabilidad de terminación se puede simular aún más. Usamos MATLAB para resolver el Markov modelar y ejecutar simulaciones. Sobre esta base se presentan cuatro casos de estudio y el canal Se analiza el desempeño del ensamblaje con base en la estrategia Ps-rq propuesta.

Caso 1: capacidad de la red secundaria versus tasa de llegada de PU

La Figura 13 muestra la relación entre la capacidad de red de SUe y SUr y la Tasa de llegada de UP. Como puede verse en la figura, la capacidad de la red secundaria. disminuye con el aumento en la tasa de llegada de UP. Cuando el número de PU que ingresan al aumenta el sistema, la prioridad absoluta de acceso a los datos reducirá el número total de datos disponibles. canales restantes en el sistema, por lo que el número de SU que pueden aceptar los servicios en el El sistema también disminuirá en consecuencia. Como resultado, la capacidad de red de SUe y SUr disminuye con el aumento en la tasa de llegada de UP.



(a) (b)

Figura 13. (a) Capacidad de red de SUe; (b) Capacidad de la red de SUr.

Figura 13. (a) Capacidad de la red de ; (b) Capacidad de red de la .

Caso 2: utilización del espectro versus tasa de llegada de SUe

La relación entre la utilización del espectro y la tasa de llegada de SU es que la Figura 14 con la tasa de llegada como eje x. Se puede observar en la cifra 4,8%; la La utilización del espectro aumenta con el aumento de la tasa de llegada. en capacidad de la red de los flujos que pueden coexistir en el sistema aumenta, aumenta es la probabilidad de que las SU tasa de llegada de SU, el espectro inactivo se utiliza por completo. Cuando el descenso del se satura gradualmente, el gradiente disminuirá. Además, no es difícil que SUr tenga una mayor que aumentar la capacidad de la cola puede aumentar la capacidad de la red secundaria, inicie el La utilización del tambor mejora correspondientemente.

Sin embargo, se puede ver en la Figura 13 que aumentar la capacidad total de la cola de SU aumenta la capacidad de la red secundaria. En λp = 0,2, la capacidad del cola de SUe , Qeq, aumenta de 0 a 4, y la capacidad de la red secundaria aumenta en capacidad de la cola de SUr , Qrq, aumenta de 0 a 4, lo que supone un aumento del 9,43% secundaria. Después de aumentar la capacidad de la cola, el número de SU de SU, lo que supone un aumento del 92,3%. Con el aumento podrá aceptar el servicio. Al comparar la Figura 13, no es difícil encontrar que el gradiente de utilización del espectro de la capacidad de la red de SUr es menor que el de SUe . Esto es porque prioridad de servicio que SUe (a excepción del SUh interrumpido)), por lo que es más fácil. servicio para el SUr recién llegado que SUe .

Caso 2: utilización del espectro versus tasa de llegada de SUe

La relación entre la utilización del espectro y la tasa de llegada de SU se muestra en Figura 14 con la tasa de llegada de SUe como eje x. Se puede observar en la figura que el La utilización del espectro aumenta con el aumento de la tasa de llegada. Cuando Qrq = 2, Qeq = 4, la tasa de utilización del espectro es de hasta el 92,3%. Con el aumento en la tasa de llegada de SU, el espectro inactivo se utiliza por completo. Cuando la utilización del espectro se satura

Machine Translated by Google

ase: espectro utzaton vs. tasa de arrva o e

La relación entre la utilización del espectro y la tasa de llegada de SU se muestra en la Figura 14 con la tasa de llegada como eje x. En la figura se puede ver que la utilización del espectro aumenta con el aumento de la tasa de llegada. Cuando

= = , la tasa de utilización del espectro es de hasta el 92,3%. Con el aumento en la tasa de llegada de SU, el espectro inactivo se utiliza por completo. Cuando la utilización del espectro se satura gradualmente, el gradiente disminuirá gradualmente, el gradiente irá disminuyendo. Además, no es difícil encontrar que el aumento que aumentar la capacidad de la cola puede aumentar la capacidad de la red secundaria, por lo que la capacidad de la cola puede aumentar la capacidad de la red secundaria, por lo que la La utilización del espectro mejora correspondientemente. correspondientemente mejorado.

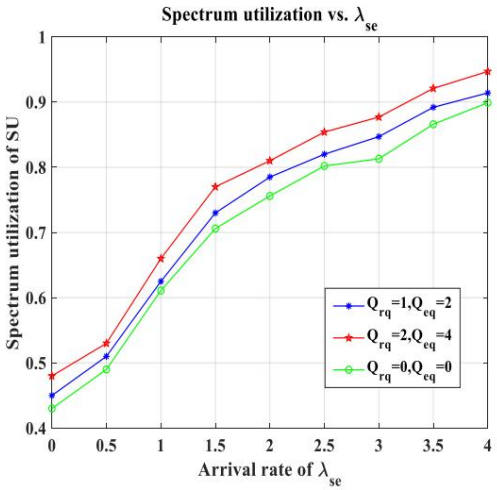


Figura 14. Utilización del espectro de las SU. Figura 14. Utilización del espectro de las SU.

Caso 3: probabilidad de bloqueo versus tasa de llegada de PU

Caso 3: probabilidad de bloqueo versus tasa de llegada de PU

La Figura 15 muestra la relación entre la probabilidad de bloqueo de las SU y la tasa de llegada de las PU. En general, la probabilidad de bloqueo de las SU aumenta con la llegada. Tasa de llegada de UP. En general, la probabilidad de bloqueo de las SU aumenta con la tasa de llegada de las PU. Los canales inactivos se utilizan por completo cuando el número de PU en el sistema aumenta debido a la prioridad absoluta de acceso a datos, lo que resulta en un aumento en la probabilidad de bloqueo de las SU. aumenta debido a la prioridad absoluta de acceso a datos, lo que resulta en un aumento en la probabilidad de bloqueo de las SU. Dado que SUr tiene mayor prioridad que SUe , probabilidad de SU. Dado que tiene una prioridad más alta que la probabilidad de bloqueo, el acceso a los datos es menor que la de SUe . la probabilidad de bloqueo de

de acceso a datos es menor que el de .

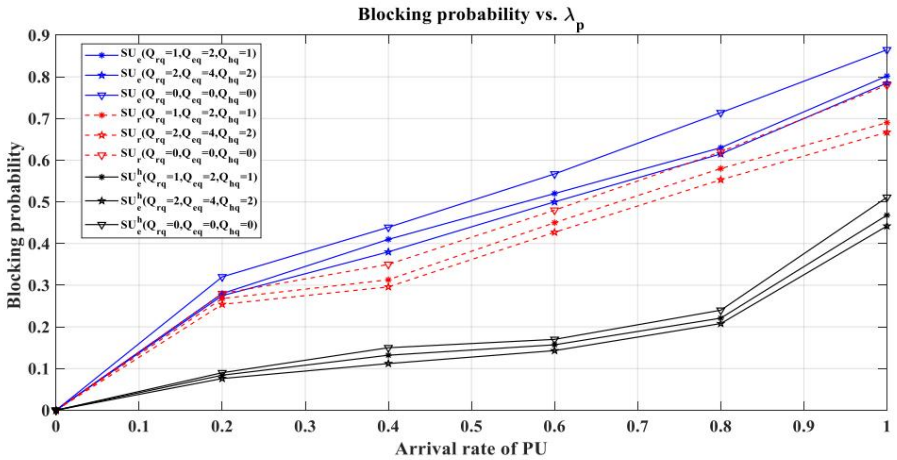


Figura 15. Probabilidad de bloqueo de SU. Figura 15. Probabilidad de bloqueo de SU.

Parece que ambas curvas son relativamente estables y la diferencia en la bloqueo Parece que ambas curvas son relativamente estables y la diferencia en la probabilidad de bloqueo no es más de 0,1. Es ilustrativo del hecho de que la estrategia Ps-rq propuesta pue La capacidad no es más que 0,1. Es ilustrativo del hecho de que la estrategia Ps-rq propuesta puede hacer que SUe y SUr tengan un desempeño estable sobre la base de reducir el bloqueo proba- hacer que tengan un desempeño estable sobre la base de reducir el bloqueo capacidad de los usuarios de alta prioridad SUmi . La adopción de servicios diferenciados proporciona una mayor probabilidad de usuarios de alta prioridad. La adopción de servicios diferenciados proporciona una programación de compromiso equitativa sin causar hambre excesiva a los usuarios de baja prioridad. una baja prioridad (SUe). Sin embargo, el espectro inactivo disponible existente es insuficiente para los usuarios de (SUe) con baja prioridad, lo que resulta en una probabilidad de bloqueo de SUe y disminuye de forma aumentó. Si la tasa de llegada de PU, lo que resulta en una probabilidad de bloqueo de SUe y SUe se acerca gradualmente a 1.

Al comparar la probabilidad de bloqueo de SUe y SUr bajo diferentes capacidades de cola y acercándonos gradualmente a 1 , idades, podemos encontrar que una mayor capacidad mejora la reducción del bloqueo. probabilidad.

Al comparar la probabilidad de bloqueo bajo diferentes y capacidades de cola, podemos encontrar que una mayor capacidad mejora la reducción de la probabilidad de bloqueo. Por ejemplo, la probabilidad de bloqueo se reduce en un 10,82% cuando la capacidad de la cuando la tasa de llegada de PU es = cola es = 4 comparado con

Machine Translated by Google

Por ejemplo, para SUr , cuando la tasa de llegada de PU es λp = 0,6, la probabilidad de bloqueo se reduce en un 10,82% cuando la capacidad de la cola es Qrq = 2, Qeq = 4 en comparación con Qrq = 0, Qeq = 0. Y para SUe , cuando λp = 0,6, la probabilidad de bloqueo se reduce en 11,04% por debajo del mismo valor. Esto explica que el sistema puede proporcionar servicios para más fluye con el aumento de la capacidad de la cola, lo que proporciona más posibilidades para el acceso especulativo de SU. En comparación, se puede observar que el aumento de la cola La capacidad puede mejorar significativamente el rendimiento de SUe . La razón es que una retroalimentación El bucle está configurado para el servicio de SUe en la estrategia Ps-rq propuesta y una mayor capacidad de cola. se instala en la configuración del sistema.

Caso 4: probabilidad de terminación forzada versus tasa de llegada de PU

La Figura 16 muestra la relación entre la probabilidad de terminación forzosa de las SU y la tasa de llegada de UP. Como se muestra en la figura, la probabilidad de terminación forzada de SU aumenta con la tasa de llegada de PU, que también está determinada por el acceso a los datos prioridad de las UP. Dado que se establece una cola reservada para el SUh interrumpido, la terminación forzada probabilidad de SUh es el más bajo en la Figura 16, como en el valor de diferencia máxima, λp = 0,8, cuando Qrq = 1, Qeq = 2, Qhq = 1, la probabilidad de terminación forzada de SUh es un 29,23% inferior al de SUe y un 42,5% inferior al de SUr . Sin embargo, debido a la configuración del circuito de retroalimentación para SUe , SUr tiene una probabilidad de terminación forzada mayor que Demandar . Por lo tanto, la SUe interrumpida puede volver a la cola y no será forzada a hacerlo. termina hasta que la cola esté llena.

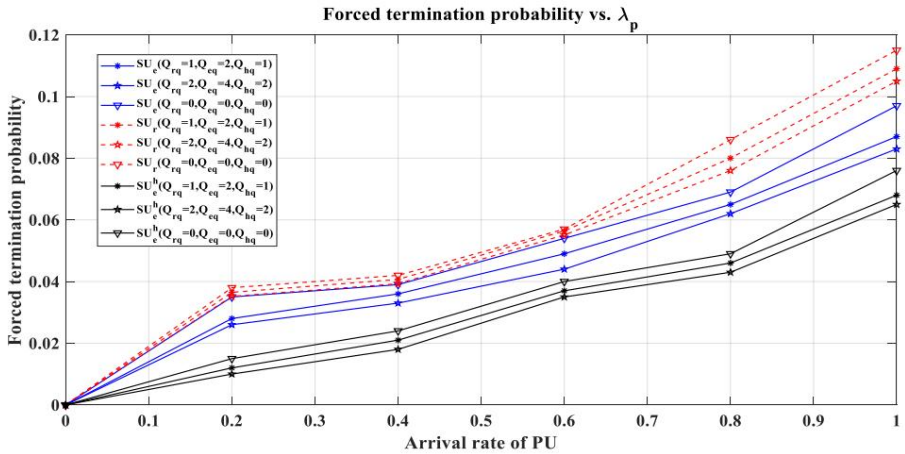


Figura 16. Probabilidad de terminación forzada de SU.

Los servicios en tiempo real son más sensibles a los retrasos y la pérdida de paquetes causada por una ligera fluctuación no causa interferencias graves en la calidad de voz/imagen en tiempo real. Por lo tanto, no hay comentarios de alimentación para SUr . La tasa de ocupación total del canal se puede reducir de esta manera, pero Se adopta un bucle trasero para . En este caso, la tasa de ocupación total del canal se puede reducir a costa de aumentar la probabilidad de terminación forzada de SUr . Tomado en conjunto, el manera, pero a expensas de aumentar la probabilidad de terminación forzada de . La estrategia Ps-rq propuesta puede diferenciar las prioridades de servicio de servicios heterogéneos En general, la estrategia Ps-rq propuesta puede diferenciar las prioridades de servicio de los Nuestros servicios y ofrecerles una programación justa. Sobre esta base, la calidad del servicio del servicio elástico, e , que se ve interrumpido por las PU se puede mejorar. Se puede mejorar el servicio elástico de alta prioridad que se ve interrumpido por la aún más la superioridad de la estrategia propuesta para mejorar la estrategia Ps-rq con respecto a la desempeño de las SU, se proporciona una comparación entre la estrategia Ps-rq y la no Para demostrar probabilidad de terminación forzada, como se muestra en la Figura 17. comparación que no son Ps, todos ocurrieron bajo las condiciones iniciales Qeq = 2 y Qrq = 1. Como se puede rq con respecto a la probabilidad de terminación forzada, como se muestra en la Figura 17. Como se puede ver en la figura, ya sea para SUe o SUr , cuando no se adopta la estrategia, el Todos los resultados del parison ocurrieron bajo las condiciones iniciales = 2 y = 1. Como puede ser, la probabilidad de terminación forzada para las SU aumenta significativamente. El análisis del desempeño. de SUh se ve en la figura, si no se adopta la estrategia, es específica de la estrategia propuesta en este Como se documentó, por lo tanto, no hay comparación de , La probabilidad de despido forzoso para las SU aumenta significativamente. El análisis de desempeño que el cuando no se adopta Ps-rq. La figura ilustra aumento en la probabilidad de terminación forzada para SUe es mayor que para SUr de es específico de la estrategia propuesta en este documento, por lo tanto, no hay comparación en ausencia de Ps-rq. Especialmente cuando la tasa de llegada de PU es pequeña, SUe tiene más la probabilidad de terminación forzosa de al no adoptar Ps-rq. La figura ilustra que el aumento en la probabilidad de despido forzoso es mayor que el de en ausencia de Ps-rq. Especialmente cuando la tasa de llegada de PU es pequeña, tiene más oportunidades de acceder al canal. De la estrategia propuesta se desprende claramente que el excelente resultado se puede atribuir a la mejora del rendimiento de .

Machine Translated by Google

La probabilidad de despido forzoso para las SU aumenta significativamente. El análisis de desempeño es específico de la estrategia propuesta en este documento; por lo tanto, no hay comparación de la probabilidad de terminación forzosa cuando no se adopta Ps-rq. La figura ilustra que el aumento en la probabilidad de despido forzoso es mayor que el de

en ausencia de Ps-rq. Especialmente cuando la tasa de llegada de PU es pequeña, tiene más oportunidades de acceder al canal. De la estrategia propuesta se desprende claramente que las oportunidades de acceso al canal. De la estrategia propuesta se desprende claramente que el resultado excelente se puede atribuir al rendimiento mejorado del resultado excelente se puede atribuir al rendimiento mejorado de SUh .

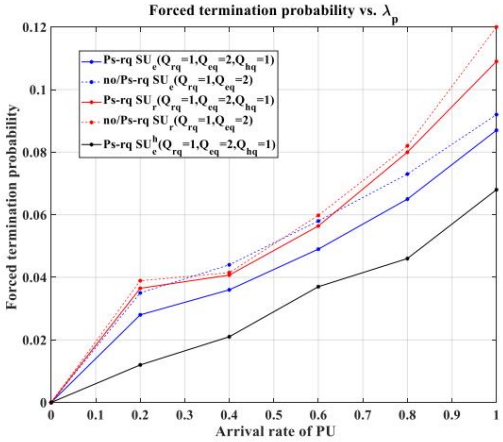


Figura 17. Comparación de probabilidad de terminación forzosa con y sin Ps-rq.

Figura 17. Comparación de probabilidad de terminación forzosa con y sin Ps-rq.

6. Conclusiones

Este estudio diseña y propone una estrategia de programación de prioridades con cola reservada (estrategia Ps-rq) para CRN. Esta estrategia adopta el esquema de clasificación de servicios que combina factores estáticos (tipo de mensaje) y factores dinámicos (validez de la información, correlación de mensajes y tamaño del mensaje), que pueden diferenciar los servicios elásticos con alta prioridad en función de la clasificación heterogénea de servicios en servicios secundarios. Al establecer una nueva cola reservada para servicios elásticos vitales, la estrategia propuesta puede mejorar la prioridad de servicio de los servicios elásticos de alta prioridad interrumpidos por PU. Además, se utiliza el control difuso Takagi-Sugeno para priorizar los servicios elásticos y se presenta una vista de prioridad 3D de los servicios Sobre esta base, se proporciona un esquema de asignación de canales proporcional con prioridad que se combina con tecnología de ensamblaje de canales y tecnología de adaptación de espectro basado en la estrategia Ps-rq. Al dividir las actividades de los usuarios en los CRN en cuatro eventos, incluida la llegada de PU, la salida de PU, la llegada de SU y la salida de SU, se investiga el flujo de recursos en la red secundaria y se proporciona el proceso de acceso dinámico al canal basado en la estrategia Ps-rq. Al establecer el CTMC, el proceso de flujo de recursos en la red secundaria se asigna al espacio de estados de alta dimensión, y se derivan todos los posibles estados de transición, tasas de transición y condiciones de transición desencadenadas por los cuatro tipos de eventos que comienzan desde un estado general. Después de degradar los marcadores de alta dimensión, se puede obtener la solución de estado estable del sistema adquiriendo la matriz de velocidad de transición, y se pueden obtener una serie de índices de evaluación del rendimiento, como la capacidad de la red secundaria, la utilización del espectro, la probabilidad de bloqueo y la probabilidad de terminación forzada. obtenido.

Además, comparamos la estrategia Ps-rq propuesta con esquemas de ensamblaje de cuatro canales para demostrar su idoneidad para escenarios específicos que involucran la transmisión de tráfico elástico. Al combinar el procedimiento para la reducción de dimensiones de cadenas de Markov de alta dimensión, simulamos numéricamente los resultados analíticos de los índices de rendimiento utilizando MATLAB y proporcionamos cuatro casos de estudio. Los resultados de la simulación indican que, en la misma dimensión, a medida que aumenta la capacidad del buffer, la capacidad de la red del SUe aumenta en un 4,8 % y la probabilidad de bloqueo disminuye en un 11,04%, mientras que la capacidad de la red del SUr aumenta en un 9,43% y la probabilidad de bloqueo La probabilidad disminuye en un 10,82%. Y la probabilidad de terminación forzosa de los servicios elásticos de alta prioridad considerados en este documento es un 29,23% menor que la de SUe y un 42,5% menor que la de SUr . Los resultados numéricos muestran que la estrategia propuesta puede ayudar a mejorar la prioridad de servicio de los servicios elásticos de alta prioridad que son interrumpidos por PU en CRN y reducir la probabilidad de terminación forzada sobre la base de proporcionar una programación justa.

Machine Translated by Google

Contribuciones del autor: QX investigó la literatura, concibió los conceptos del estudio, proporcionó los modelos matemáticos, diseñó el algoritmo, completó simulaciones numéricas, se hizo cargo de la preparación del borrador original y editó el manuscrito; SL concibió los conceptos del estudio, mejoró la investigación sistemática y la metodología de análisis y supervisó la finalización del perfeccionamiento del artículo; JG y YH dieron valiosas sugerencias para la revisión y verificaron la deducción de fórmulas y la gramática inglesa. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada en parte por la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China (61663024) y el proyecto del fondo de doctorado en Ciencias Naturales de la Universidad Aeronáutica de Xi'an (2022KY0201).

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos que respaldan este artículo provienen de estudios y conjuntos de datos informados anteriormente, que han sido citados.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Comisión Federal de Comunicaciones. Informe del grupo de trabajo sobre políticas de espectro. Expediente ET; nº 02-135; Comunicaciones federales Comisión: Washington, DC, EE.UU., 2002.
2. Huang, XL; Li, YX; Gao, Y. Acceso al espectro basado en Q-Learning para transmisión multimedia a través de redes de radio cognitivas. Traducción IEEE. Cogn. Comunitario. Neto. 2021, 7, 110-119. [Referencia cruzada]
3. Srikar, D.; Nella, A.; Mamidi, R. Un novedoso sistema de antena de radio cognitiva de comunicación MIMO de 8 elementos y detección UWB integrada . Electrónica 2023, 12, 330. [CrossRef]
4. Muzaffar, MU; Sharqi, R. Una revisión de la detección de espectro en redes de radio cognitivas modernas. Telecom. Sistema. Modelo. Anal. Des. Gestionar. 2024, 2, 85. [Referencia cruzada]
5. Ahmad, W.; Radzi, N.; Samidi, Tecnología FS 5G: hacia el intercambio dinámico del espectro mediante redes de radio cognitivas. Acceso IEEE 2020, 8, 14460–14488. [Referencia cruzada]
6. Azaly, N.; Badran, EF Mejora del rendimiento del acceso dinámico al espectro mediante reserva de canales para radio cognitiva Redes. Alambre. Pers. Comunitario. 2021, 118, 2867–2883. [Referencia cruzada]
7. Lei, J. Agregación y fragmentación de canales para flujos de tráfico; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2020.
8. Liu, X.; Jia, M. Asignación inteligente de recursos de espectro basada en la optimización conjunta en radio cognitiva heterogénea. Traducción IEEE . Emergente. Arriba. Computadora. Intel. 2020, 4, 5-12. [Referencia cruzada]
9. Li, SP; Xu, QY; Jaafar, G. Modelado y análisis de rendimiento del ensamblaje de canales basado en la estrategia Ps-rc con colas prioritarias en CRN. Alambre. Comunitario. Multitud. Computadora. 2022, 17, 6384261. [Referencia cruzada]
10. Mamá, L.; Xu, Y.; Fu, Y. Un esquema de programación de recursos para la agregación de espectro en radio cognitiva heterogénea Redes. Comuna China. 2015, 12, 100-111.
11. Jiao, L.; Li, FY; Pla, V. Modelado y análisis de rendimiento del ensamblaje de canales en redes de radio cognitivas multicanal con Adaptación del Espectro. Traducción IEEE. Veh. Tecnología. 2012, 61, 2686–2697. [Referencia cruzada]
12. Balapuwaduge, I.; Jiao, L.; Pla, V. Montaje de canales con colas basadas en prioridades en redes de radio cognitivas: estrategias y evaluación del desempeño. Traducción IEEE. Alambre. Comunitario. 2014, 13, 630–645. [Referencia cruzada]
13. Esenogho, E.; Srivastava, VM Dos estrategias de ensamblaje de canales heterogéneos en redes de radio cognitivas: una actuación Análisis. En t. J. Ing. Tecnología. Innovación. 2017, 7, 98–116.
14. Zhang, W.; Sol, Y.; Deng, L. Asignación dinámica de espectro para redes de radio cognitivas heterogéneas con múltiples canales. Sistema IEEE J. 2019, 13, 53–64. [Referencia cruzada]
15. Zhu, X. Análisis del acceso cognitivo al espectro de radio con reserva óptima de canales. Comunicaciones IEEE. Letón. 2007, 11, 304–306. [Referencia cruzada]
16. Esenogho, E.; Mambou, EN Integración del régimen de colas en las políticas cognitivas de agregación de canales de radio: una actuación Evaluación. J. Común. 2017, 1–5. [Referencia cruzada]
17. Esenogho, E.; Srivastava, estrategia de ensamblaje de canales VM en redes de radio cognitivas: un enfoque basado en colas. En t. J. Comunitario. Propagación de antena. IRCEAP 2017, 7, 31–47. [Referencia cruzada]
18. Xiao, X.; Zeng, F.; Hu, Z. Arrendamiento dinámico de espectro adaptable al flujo con agregación de canales en redes de radio cognitivas. Sensores 2020, 20, 3800. [CrossRef] [PubMed]
19. El-Toukhy, AT; Arslan, H. Mejora del rendimiento de SU de baja prioridad utilizando canales reservados en CRN. Cable IEEE. Comunitario. Letón. 2020, 9, 513–517. [Referencia cruzada]
20. Bayrakdar, ME; Calhan, A. Mejora de la utilización de la transferencia de espectro para usuarios de radio cognitiva priorizados mediante la explotación Vinculación de canales con mitigación del hambre. En t. J. Electrón. Comunitario. 2017, 71, 181–191. [Referencia cruzada]
21. Suganthi, N.; Meenakshi, S. Un algoritmo de programación eficiente que utiliza un sistema de colas para minimizar la falta de tiempo no real Usuarios secundarios en la red de radio cognitiva. Clúster. Computadora. 2018, 25, 1-12. [Referencia cruzada]
22. Iftikhar, M.; Mathkour, H.; Imran, M. Un marco novedoso para el sistema de colas G/M/1 basado en un mecanismo de programación y sondeo para analizar múltiples clases de tráfico LRD y autosimilar. Alambre. Neto. 2016, 22, 1269–1284. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

23. Khan, M.; Ahmad, J.; Saddik, AE Drone-HAT: Transformador de atención híbrido para reconocimiento de acciones complejas en vídeos de vigilancia con drones. En Actas de los talleres de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones (CVPR), Seattle, WA, EE. UU., 19 a 21 de junio de 2024; págs. 4713–4722.

24. Taherkhani, N.; Pierre, S. Priorización y programación de mensajes para el control de la congestión en redes vehiculares ad hoc. Computadora. Neto. 2016, 108, 15-28. [Referencia cruzada]

25. Han, W.; Li, J.; Tian, Z. Estrategias de detección dinámica para la utilización eficiente del espectro en redes de radio cognitivas. Traducción IEEE. Alambre. Comunitario. 2011, 10, 3644–3655. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Enrutamiento multiruta basado en aprendizaje de refuerzo profundo para LEO Redes de megaconstelaciones

Chi Han [1], Wei Xiong [1,2,*] y Ronghuan Yu [1,2]

[1] Laboratorio Nacional Clave de Concientización sobre Objetivos Espaciales, Universidad de Ingeniería Espacial, Beijing 101400 (China); hanchi@hgd.edu.cn (CH); yrh1983@163.com (RY)

[2] Escuela de Información Espacial, Universidad de Ingeniería Espacial, Beijing 101400, China *

Correspondencia: xiongwei@hgd.edu.cn

Resumen: La expansión de las redes de megaconstelaciones (MCN) representa una solución prometedora para lograr una cobertura global de Internet. Para satisfacer la creciente demanda de servicios satelitales, el enrutamiento multitrayectoria permite el establecimiento simultáneo de múltiples rutas de transmisión, permitiendo la transmisión de flujos en paralelo. Sin embargo, la movilidad de los satélites y los estados de los enlaces que varían en el tiempo presentan un desafío para el descubrimiento de rutas óptimas y la programación del tráfico en el enrutamiento multitrayecto. Dada la inflexibilidad de los algoritmos de enrutamiento estáticos tradicionales basados en el aprendizaje por refuerzo profundo (DRL) al tratar con topologías de constelaciones variables en el tiempo, se propone el enrutamiento multiruta (DMR) basado en DRL habilitado por una red neuronal gráfica (GNN) como un medio para mejorar la rendimiento de transmisión de los MCN. DMR desacopla el problema de optimización estocástica del enrutamiento multiruta bajo restricciones de tráfico y ancho de banda en dos subproblemas: descubrimiento de enrutamiento multiruta y programación del tráfico multiruta. En primer lugar, se propone el algoritmo de descubrimiento de rutas multiruta basado en el número mínimo de saltos (MHMRD) para el cálculo de múltiples rutas disponibles entre todos los En segundo lugar, el esquema de programación de tráfico multitrayecto (GMTS) basado en GNN se propone como un medio para programar dinámicamente el tráfico en cada ruta disponible para cada flujo de datos, en función de la información del estado de los ISL y la demanda de tráfico. Los resultados de la simulación demuestran que el esquema propuesto se puede escalar a constelaciones con diferentes configuraciones sin la necesidad de un entrenamiento repetido y mejorar el rendimiento, la tasa de finalización y el retraso en un 42,64 %, 17,39 % y 3,66 % en comparación con el algoritmo del primer camino más corto (SPF), respectivamente.

Palabras clave: red satelital; enrutamiento multiruta; aprendizaje por refuerzo profundo; programación del tráfico; número de saltos

check for updates

Cita: Han, C.; Xiong, W.; Yu, r. Enrutamiento de rutas múltiples basado en aprendizaje de refuerzo profundo para redes de megaconstelaciones LEO. Electrónica 2024, 13 , 3054. https://doi.org/10.3390/electronics13153054

Editor académico: Stefano Scanzio

Recibido: 12 de julio de 2024
Revisado: 25 de julio de 2024
Aceptado: 31 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Las características de las redes de megaconstelaciones (MCN), como una amplia cobertura de área , baja latencia y gran ancho de banda, les confieren ventajas únicas en comunicaciones de áreas remotas y servicios sensibles a demoras (por ejemplo, comunicaciones de emergencia y monitoreo de desastres) [1]. . Las ventajas antes mencionadas han resultado en el desarrollo acelerado de las MCN, que se prevé que cumplan una multitud de servicios, incluidas comunicaciones, teledetección, navegación y posicionamiento. Además, las MCN están preparadas para convertirse en un componente fundamental de la infraestructura de la red integrada espacio-aire-tierra (SAGIN) [2–4].

Para satisfacer la creciente demanda de servicios de comunicaciones por satélite, el enrutamiento multitrayecto es un enfoque prometedor. El enrutamiento multiruta permite establecer múltiples rutas de transmisión simultáneamente entre los nodos de origen y de destino para cada flujo de datos, lo que puede aumentar el rendimiento de la red [5]. A diferencia del enrutamiento de ruta única, el enrutamiento de rutas múltiples permite la utilización óptima del ancho de banda disponible, aliviando así la congestión, mejorando el rendimiento y mejorando la tolerancia a fallas. Esto se logra permitiendo que un único servicio se transmita a través de múltiples rutas en paralelo. Como co

Machine Translated by Google

El enrutamiento multitrayecto facilita la resiliencia de las redes satelitales con recursos limitados para resistir escenarios de falla de nodos o enlaces. Sin embargo, la alta dinámica de las topologías de las redes satelitales y los estados de los enlaces de transmisión presenta desafíos para el descubrimiento de enrutamiento multitrayecto y la programación del tráfico multitrayecto [6–8].

El descubrimiento de rutas multitrayecto es el primer desafío que plantea la naturaleza variable en el tiempo de la topología y el tráfico de los satélites. Factores como los cambios en la actitud de los satélites y los entornos electromagnéticos complejos pueden hacer que las velocidades de transmisión del enlace láser disminuyan o incluso fallen. Como resultado, las fallas de enlace pueden ocurrir con frecuencia en las MCN en lugar de ser un evento excepcional, como en las redes terrestres. La frecuente ocurrencia de pases o fallas de enlaces impide la capacidad del mecanismo de transmisión para descubrir y mantener rutas de manera oportuna, como es el caso en las redes terrestres. Esto da como resultado un aumento en los gastos generales asociados con la transmisión y el control de rutas. En consecuencia, los protocolos de enrutamiento ad hoc basados en topología, como ADOV [9], no son óptimos en las MCN. Además, debido a las limitaciones de movilidad y energía de los satélites LEO, los enlaces establecidos a menudo no se mantienen de manera estable. Los cambios topológicos en el proceso de descubrimiento de rutas pueden dar como resultado la rápida caducidad de las rutas descubiertas, y las rutas correspondientes ya no existen en el momento de la transferencia de datos. Los factores anteriores requieren el descubrimiento de enrutamiento de rutas múltiples para poder detectar fallas en los enlaces de manera oportuna y establecer de manera razonable múltiples rutas alternativas. Algunos esquemas actualmente implementan cálculos de ruta en el centro de control de la red terrestre (NCC) [10]. El NCC mejora el rendimiento de transmisión de la red al considerar de manera integral la distribución del tráfico de usuarios terrestres y la utilización del enlace y al aprovechar al máximo la redundancia del enlace generada por la topología de malla de la red satelital para planificar múltiples rutas de transmisión paralelas para cada flujo al mismo tiempo.

La programación del tráfico de rutas múltiples en las MCN es el segundo desafío. Los entornos electromagnéticos complejos , los cambios de actitud de los satélites y otros factores provocan fluctuaciones en la calidad del enlace. Como consecuencia, la programación tradicional del tráfico de rutas múltiples basada en enrutamiento estático ya no es aplicable en las MCN. Además, la naturaleza variable en el tiempo del tráfico de usuarios terrestres y la fluctuación en la calidad del enlace hacen que la red satelital sea incapaz de identificar con precisión los patrones de tráfico, y la programación detallada del tráfico entre múltiples rutas frecuentemente carece de información efectiva. El aprendizaje por refuerzo profundo (DRL) ha demostrado ventajas significativas en la descripción de características espaciotemporales, decisiones de flujo y otras áreas relacionadas. Un número considerable de académicos ha optado por adoptar DRL con el fin de programar el flujo adaptativo por trayectos múltiples, como lo demuestra [11-14]. Sin embargo, las redes de satélite que varían en el tiempo y la calidad fluctuante de los enlaces entre satélites (ISL) requieren la agregación de múltiples intervalos de tiempo para la toma de decisiones en modelos que emplean DRL. A medida que aumenta el tamaño de la constelación, la dimensión del modelo se expande dramáticamente, lo que resulta en un aumento significativo en el esfuerzo computacional y una reducción en la escalabilidad del modelo . Las redes neuronales de gráficos (GNN) son capaces de identificar características y patrones en datos estructurados de gráficos, realizar razonamiento relacional y generalización combinatoria en datos estructurados de gráficos [15,16], y se pueden aplicar sin ajuste adicional del modelo a constelaciones de diferentes topologías. y tamaños [17,18].

Recientemente, DRL ha demostrado un potencial considerable en el aprendizaje de las características del tráfico temporal y espacial con el fin de tomar decisiones de ruta. Los investigadores han empleado DRL con el fin de asignar tráfico adaptativo, con el objetivo de reemplazar la segmentación del tráfico estático. Sin embargo, los modelos basados en DRL requieren la capacidad de resumir instantáneas topológicas continuas para poder tomar decisiones en un entorno satelital dinámico. Las redes satelitales tienen espacios de estado dispersos y de alta dimensión, y la dimensionalidad de los modelos DRL aumenta dramáticamente con el tamaño de la constelación y el nivel de demanda de tráfico, lo que a su vez conduce a una escalabilidad deficiente del modelo. Las redes neuronales gráficas (GNN) facilitan la inferencia de datos relacionales y la generalización de estructuras combinatorias dentro de información estructurada gráficamente. Esto permite la aplicación del modelo DRL a constelaciones de satélites de diferentes tamaños sin necesidad de modificaciones adicionales. A la luz del análisis antes mencionado, proponemos enrutamiento multiruta (DMR) basado en DRL integrado por un GNN para mejorar el rendimien

Machine Translated by Google

El problema de enrutamiento multitrayecto se modela inicialmente como un problema de optimización estocástica, con el objetivo de maximizar la eficiencia de la red bajo restricciones de tráfico y ancho de banda . Para obtener la solución óptima, el problema original se desacopla en dos subproblemas: descubrimiento de enrutamiento multiruta y programación del tráfico multiruta. Con respecto al subproblema inicial, se propone aprovechar al máximo la topología redundante de la red de satélite, con la introducción de un algoritmo de descubrimiento de enrutamiento multitrayecto basado en un recuento mínimo de saltos (MHMRD). MHMRD está diseñado para calcular una cantidad de rutas disponibles entre todos los nodos de origen y destino. Sobre esta base, el segundo subproblema se aborda mediante el diseño de programación de tráfico multitrayecto (GMTS) basada en GNN. GMTS modela el proceso de programación del tráfico de rutas múltiples como un proceso de decisión de Markov (MDP), que programa dinámicamente el tráfico en cada ruta disponible para cada flujo de datos basándose en la información del estado del enlace de la red satelital y la demanda de tráfico. Los resultados de la simulación en Iridium y OneWeb demuestran que el esquema propuesto no depende del reentrenamiento para constelaciones de diferentes tamaños. Además, el rendimiento de la red, el retraso promedio y la tasa de finalización del flujo excedieron los del esquema de referencia.

Las principales contribuciones de este artículo se resumen a continuación:

- El problema del enrutamiento por trayectos múltiples en redes de satélite se modela como un problema de optimización estocástica bajo restricciones de tráfico y ancho de banda. El objetivo es maximizar la eficiencia de la red. El problema está desacoplado en un subproblema de descubrimiento de enrutamiento multiruta y un subproblema de programación de tráfico multiruta.
- Para abordar el subproblema de descubrimiento de enrutamiento de rutas múltiples, se ha propuesto el algoritmo MHMRD como un medio para planificar múltiples rutas de conteo mínimo de saltos para cada flujo entre cualquier par de nodos en la red en función de la información del estado del enlace.
- El subproblema de programación de tráfico de rutas múltiples se modela como un MDP, con el esquema GMTS propuesto para programar dinámicamente la proporción de tráfico en cada ruta disponible para cada flujo de datos. GMTS es una solución escalable que se puede aplicar a diferentes constelaciones.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera. La sección 2 proporciona algunos trabajos relacionados. En la Sección 3, proporcionamos el modelo del sistema y la formulación del problema. En la Sección 4, se describe el enrutamiento multiruta basado en DRL . La Sección 5 proporciona la simulación y los principales resultados. Finalmente, resumimos los resultados en la Sección 6.

2. Trabajo relacionado

2.1. Enrutamiento de rutas múltiples

En las redes de satélite, existen múltiples rutas con el mismo número de saltos de un extremo a otro. Para mejorar la confiabilidad de la transmisión de datos y mejorar la capacidad de equilibrio de carga de la red, los investigadores han propuesto el uso de enrutamiento multiruta en redes satelitales, donde cada flujo se divide en múltiples subflujos para la transmisión paralela a lo largo de diferentes rutas. Para distribuir el tráfico en múltiples rutas, el método tradicional de rutas múltiples de igual costo (ECMP) realiza una división del tráfico estático en función de la información del mensaje.

Sin embargo, el enfoque ECMP no considera las limitaciones de los parámetros de la red, como el ancho de banda y el retraso, y es propenso a la congestión cuando la carga de la red es alta.

Para lograr una gestión dinámica del flujo para el enrutamiento multitrayecto, se ha propuesto una arquitectura de red satelital basada en una red definida por software (SDN) para el control central de la topología y el control del tráfico [18-21]. En la arquitectura de red basada en SDN, el plano de datos y el plano de control están separados, el controlador SDN determina el enrutamiento en función de los parámetros de la red y los requisitos de QoS, y el satélite es responsable del reenvío de datos.

En [22], los autores intentaron integrar la codificación de red y el enrutamiento multitrayecto para mejorar la eficiencia de transmisión de datos de las redes satelitales. Sin embargo, el enfoque de control centralizado es susceptible a problemas de alta latencia. En [23], para reducir la latencia de control y mejorar la estabilidad de la transmisión, los autores emplearon un enfoque distribuido para el control de enrutamiento. En [24], los autores propusieron el enrutamiento cooperativo multiruta basado en codificación de red (NCMCR). Para optimizar la capacidad de transmisión, cada flujo

Machine Translated by Google

en NCMCR se transmite a lo largo de múltiples enlaces disjuntos. Sin embargo, los esquemas de enrutamiento multitrayectoria antes mencionados no consideran los parámetros de enlace de las diversas rutas de reenvío y, por lo tanto, no pueden realizar de manera adaptativa una división de tráfico razonable. En [1], los autores diseñaron un esquema de equilibrio de tráfico adaptativo entre múltiples rutas temporales combinando mecanismos de codificación de red dispersos y redundantes. Este enfoque permite lograr garantías de retraso deterministas en recursos de nodo limitados y escenarios de competencia multiusuario . Sin embargo, todos los esquemas de enrutamiento antes mencionados utilizan topologías estáticas, lo que les impide adaptarse a redes de satélite con topologías que cambian dinámicamente.

2.2. Enrutamiento

inteligente El entorno de la red satelital que varía en el tiempo y los enlaces interestelares dinámicos plantean desafíos al enrutamiento de la red satelital. Para garantizar la calidad del servicio de la red en condiciones de proliferación de usuarios y tamaños de constelaciones, el enrutamiento multitrayectoria requiere una planificación de rutas más eficiente y estrategias de control de tráfico más precisas. El aprendizaje por refuerzo es una herramienta inteligente que apoya la toma de decisiones al interactuar con el entorno [25-27], y los académicos han propuesto numerosos esquemas de enrutamiento inteligentes basados en el aprendizaje por refuerzo. En [25], los autores desarrollaron un sistema de aprendizaje profundo supervisado para la construcción de tablas de enrutamiento. En [28], los autores emplearon aprendizaje profundo basado en gráficos en redes satelitales a través de una arquitectura de red neuronal llamada red neuronal de consulta de gráficos. Sin embargo, estos esquemas de enrutamiento basados en el aprendizaje supervisado se ven limitados por su incapacidad para generalizar y adaptarse a diferentes constelaciones. Para abordar este problema, los autores de [29] propusieron un modelo de proceso de decisión de Markov (MDP) para el enrutamiento de redes satelitales, empleando aprendizaje por refuerzo profundo (DRL) de múltiples agentes para satisfacer diversos requisitos de calidad de servicio (QoS). Sin embargo, la política de objetivo fijo hace que los algoritmos de enrutamiento basados en DRL sean inflexibles, ya que no pueden adaptarse a redes que cambian dinámicamente. Es evidente que las configuraciones de objetivos estáticos tradicionales no pueden reflejar la importancia variable de las diferentes métric
Para abordar este problema, los autores de [17,30] integraron una red neuronal gráfica (GNN) en inteligencias DRL, lo que permitió el ajuste oportuno de las métricas de rendimiento de la red al predecir la tendencia de los objetivos de optimización de los algoritmos de enrutamiento. Esto permite a las inteligencias aprender caminos óptimos que pueden adaptarse a diferentes cambios ambientales. En [31,32], los autores propusieron diferentes arquitecturas DRL, todas las cuales ajustan dinámicamente los pesos de los enlaces de acuerdo con la carga de los nodos clave o la carga del enl
En [33], los autores ampliaron las opciones de TCP para aprovechar la información de control relevante y soportar de manera flexible la comunicación entre los subflujos de la capa de transporte y el controlador SDN. Se propuso una arquitectura MPTCP cooperada por SDN (scMPTCP), que selecciona rutas para nuevos subflujos en función del ancho de banda disponible de cada ruta.

y evita el cuello de botella de otros subflujos. También puede adaptarse a los cambios en la carga de la red. En [34], los autores propusieron un controlador DQN considerando un modelo de pérdida de ruta basado en el modelo de proceso de decisión de Markov para la selección de redes y la asignación adaptativa de recursos en redes heterogéneas.

Sin embargo, un examen de la investigación antes mencionada revela que los estudios existentes basados en DRL no son fácilmente escalables debido a su acoplamiento inherente a los estados de entrada y su topología limitada, que es consistente con los datos de entrenamiento. Para resolver la contradicción antes mencionada, el enrutamiento multiruta basado en DRL propuesto integrado con un GNN puede identificar fácilmente la acción óptima dentro de un espacio de acción continuo. DMR desacopla el problema del enrutamiento de rutas múltiples en distintos componentes (descubrimiento de rutas múltiples y programación de tráfico de rutas múltiples) para reducir la complejidad de la solución. Al mismo tiempo, la política objetivo adoptada por DMR se puede modificar de acuerdo con las condiciones ambientales predominantes, mejorando así la flexibilidad del sistema con respecto a diferentes topologías.

Machine Translated by Google

3. Modelo del sistema y formulación del problema 3.1. Escenario de rutas múltiples El escenario

de enrutamiento de rutas múltiples en la MCN se muestra en la Figura 1, donde la red satelital se divide en planos de datos y planos de control mutuamente independientes a través de la SDN.
En la red terrestre, los datos del búfer de envío se transmiten al remitente a través de enrutadores a través de múltiples saltos y se agregan en múltiples subflujos. Cada subflujo puede seleccionar la ruta de transmisión óptima de acuerdo con la condición actual de la red y luego converger en el receptor.

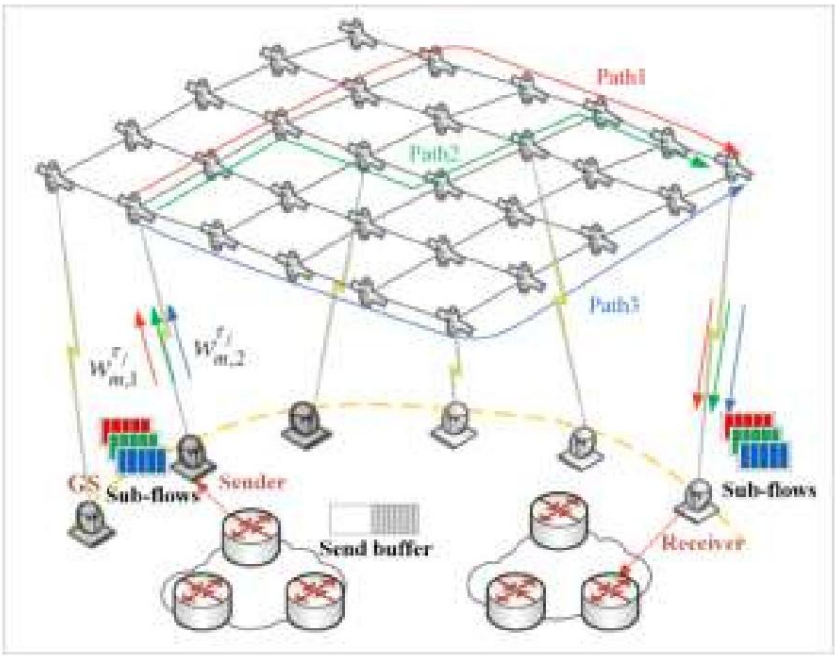


Figura 1. Enrutamiento multiruta en la red de megaconstelaciones.

El plano de datos comprende la constelación Walker Delta NSNP/NP/F, que está distribuida de manera uniforme y simétrica, y la estación terrestre. Los planos orbitales NP se distribuyen uniformemente a lo largo del ecuador, mientras que los satélites NS se distribuyen uniformemente en cada plano. Cada satélite puede conectarse a cuatro enlaces entre satélites (ISL), que comprenden dos ISL intraplano y dos ISL interplano. En el plano de control, el centro de control de red asume las funciones de gestión de topología unificada, programación de tráfico y control de rutas. Debido a la movilidad de las redes de megaconstelaciones LEO, los ISL entre planos están sujetos a frecuentes interrupciones y reconstrucciones, y la topología está en un estado de cambio constante. En consecuencia, el NCC debe actualizarse continuamente para adaptarse a la topología en evolución, lo que presenta un desafío importante para la planificación de enrutamiento multitrayecto y la programación del tráfico.

3.2. Modelo de tráfico y enrutamiento de rutas múltiples

El MCN se modela como un gráfico espaciotemporal G = {(V, E, T, N)}, donde V = S G es el nodo que consta de todos los satélites y puertas de enlace terrestres y E = ES EG es el conjunto de ISL ES y el conjunto de enlaces terrestres EG, mientras que T es el vector de intervalo de tiempo de una longitud N. Como se ilustra en la Figura 1, la topología de malla del MCN permite la existencia de múltiples rutas potenciales entre cualquier par de nodos dado. Supongamos que el número de flujos de paquetes en el intervalo de tiempo t es M (es decir, Pt = { (si , di)|i = 1, 2, · · ·, M}). En otras palabras, la variable M representa el número de subflujos, como se muestra en la Figura 1, donde tres subflujos en el remitente están esperando la transmisión a través de múltiples rutas. El número de caminos disponibles entre el

el nodo de origen si y el nodo de destino di es Lsi ,di , denotado como $R_t = p_{1,1,1,L}^{t}, \cdots, p_{M,L}^{t}$.

Aquí, $p_{m,l}^{t}$ es la l-ésima ruta entre el m-ésimo par de nodos de origen y destino, que consta

Machine Translated by Google

de todos los ISL en esa ruta (es decir, $p^t_{m,l} \quad \varepsilon 1, \varepsilon 2, \cdots, \varepsilon j, \cdots, \varepsilon nm,l$, donde nm,l es el salto total = recuento del enlace actual).

Sea $q^t_{\varepsilon j}$ ser el retraso en la cola del enlace εj , t es el retardo de procesamiento de paquetes y y es r εi εi la distancia del enlace. Entonces, el retraso de la l-ésima ruta de transmisión del m-ésimo par de nodos fuente-destino se puede expresar de la siguiente manera:

$$\eta^t_{m,x} = \sum_{j=1}^{nm,x} t \quad t + r + q\,\varepsilon j\,\varepsilon j \quad \frac{t\ \gamma\ \varepsilon j}{C} \tag{1}$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y nm,l denota el recuento de saltos del enlace actual.

Cada nodo de origen puede dividir el tráfico en subflujos Lsi ,di para pasar a través de rutas Lsi ,di en paralelo. Sea ωt la relación de tráfico de cada subflujo $_{m,l}$. Entonces, la suma de Lsi ,di entre cualquier par de nodos de origen y destino debe ser uno, lo que se puede expresar de la siguiente manera: subflujos

$$\sum_{l=1}^{l} t\omega m\ ,\ l = 1, \quad metro = 1, 2, \cdots, {}_{METRO} \tag{2}$$

Por lo tanto, el tráfico del enlace εj en el tiempo t puede expresarse como

$$f^t_{\varepsilon j} = \sum_{metro=1}^{METRO} \sum_{l=1}^{l} tt\ b\ \delta\ tm\omega_{m,l\ m,l} \tag{3}$$

donde $b\ t_{metro}$ es el requisito de ancho de banda del par m-ésimo para los nodos de origen y destino es la tasa de y $\delta m\ ,l^t$ pérdida de paquetes de ruta. Teniendo en cuenta que el ancho de banda máximo del enlace interestelar es BW, el tráfico ISL no debe exceder el límite máximo de ancho de banda, que se puede expresar de la siguiente manera:

$$f^t_{\varepsilon j} \le BW, \quad \varepsilon j \quad p^t_{m,l} \tag{4}$$

En consecuencia, el rendimiento entre el par de nodos m-ésimo se puede expresar mediante

$$f = {}^t máx\ f\ m,l\ \varepsilon j \quad {}^t, \quad \varepsilon j \quad p^t_{m,\,l} \tag{5}$$

3.3. Formulación del problema

Para medir el retraso y el rendimiento de los ISL, la función de utilidad del MCN se define como

$$Ud.\ pies\ ,\ \bar{}dt = \beta 1 \log pies - \beta 2 \log \bar{}dt \tag{6}$$

donde β1 y β2 son los coeficientes de importancia del rendimiento y el retraso, respectivamente, ft y $\bar{}$dt son el rendimiento y el tiempo actual, respectivamente, que se puede retraso promedio de β1 y β2 que satisfacen β1 + β2 = 1, y el intervalo de expresar como sigue:

$$\bar{}pies = \sum_{m=1}^{METRO} \sum_{l=1}^{|fm|} \sum_{y=1}^{l} {}_{paquete\ |} \frac{paquete}{t}, \quad t \quad [1, T] \tag{7}$$

$$\bar{}dt = \frac{\sum_{m=1}^{METRO} \sum_{l=1}^{|fm|} \sum_{y=1}^{|paquete|} t \sum m,l\ \kappa y}{\sum_{l=1}^{METRO} \sum_{y=1}^{\kappa y} [1, T]\ |fm|\ |paquete|} \tag{8}$$

donde | fm| es el número de flujos de datos entre el par de nodos m, |pk | es el número de paquetes para el k-ésimo flujo de datos, pak es el tamaño del paquete y κy {0, 1} es una variable binaria que mide si el y-ésimo paquete se envió con éxito.

Machine Translated by Google

En consecuencia, la optimización del enrutamiento multitrayecto de la red satelital se puede expresar como el siguiente problema de optimización:

$$
\begin{aligned}
&\text{P0: Uf máx .} \quad \bar{d}, \quad t \quad [1, T] \\
&\text{C1}: \bar{d} = \frac{1}{\text{norte}} \sum_{yo=1}^{\text{norte}} \bar{}_{dt} \\
&\text{C2}: \bar{f} = \frac{1}{\text{norte}} \sum_{yo=1}^{\text{norte}} \text{pie} \\
&\text{st C3}: f \epsilon j \; L^{t} \leq BW, \quad \epsilon j \quad p^{t}_{m,\,l} \\
&\text{C4}: \sum_{l=1} = \varphi t, \quad m \quad [1, M] \; m,l \\
&\text{C5}: dt \leq dtm, l_{mi}, \quad 1 \leq l \leq y \leq L, \quad m \quad [1, M]
\end{aligned}
\tag{9}
$$

donde las restricciones C1 y C2 denotan el retardo promedio y el rendimiento de la red satelital, respectivamente, la restricción C3 estipula que el rendimiento del enlace εj en cualquier momento dado t no puede exceder el límite de ancho de banda, la restricción C4 denota que la comunicación total entre cualquier par de los nodos es el resultado acumulativo de múltiples subcorrientes que atraviesan múltiples rutas y, finalmente, la restricción C5 describe las restricciones de retraso de todas las rutas candidatas entre cada par de nodos. Se puede ver que P0 es un problema NP-difícil con un espacio de solución accidentado. P0 consta de dos partes (descubrimiento de rutas multiruta y programación de tráfico multiruta) que convergen lentamente y pueden caer en óptimos locales si se resuelven mediante optimización estocástica. Para reducir la complejidad de la solución, este documento desacopla el problema en dos subproblemas, descubrimiento de enrutamiento y programación de tráfico, para mejorar la eficiencia del algoritmo.

4. Enrutamiento de rutas múltiples basado

en DRL En este artículo, proponemos el enrutamiento de rutas múltiples (DMR) basado en DRL, como se muestra en la Figura 2, que primero utiliza el algoritmo de descubrimiento de rutas múltiples basado en el recuento mínimo de saltos para resolver múltiples rutas con retrasos aceptables y luego utiliza el algoritmo GMTS para determinar el esquema de programación del tráfico en función del estado de la red de la constelación.

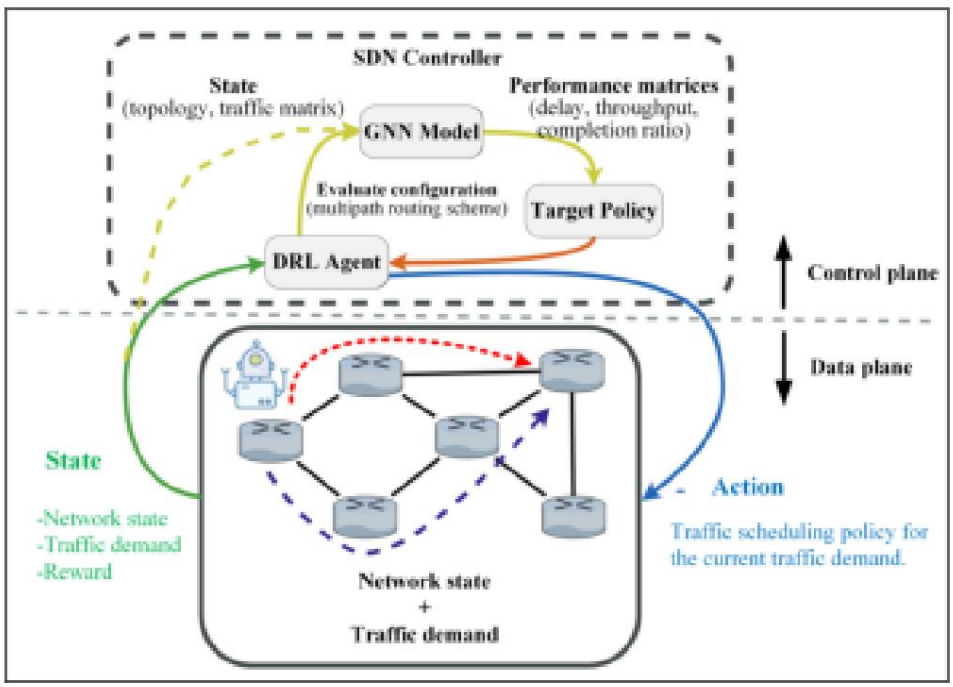


Figura 2. La estructura general del enrutamiento multiruta basado en DRL.

Machine Translated by Google

4.1. Descubrimiento de rutas multiruta

El objetivo del subproblema de descubrimiento de enrutamiento de rutas múltiples es identificar la ruta de retardo óptima y la ruta de retardo subóptima. En las MCN, el retraso de propagación, que depende del número de saltos de ruta, representa un componente importante del retraso de un extremo a otro. En consecuencia, las rutas multitrayecto se consideran principalmente para las rutas óptimas y subóptimas de salto dentro de la red. El subproblema de descubrimiento de enrutamiento multiruta se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{matrix} P1 : \min d\,t_{m,l}, & t \quad T, m \quad [1, M], l \quad [1, L] \\ st\ d\,t \le d\,t_{mi}, & 1 \le l \le y \le L \end{matrix} \tag{10}$$

Inicialmente se determina la ruta mínima de recuento de saltos entre cualquier par de nodos. Sobre esta base, el NCC determina la ruta de transmisión subóptima (es decir, la ruta de respaldo) para cada flujo en orden descendente de tráfico. Esto se debe a que es más probable que el tráfico centralizado cause congestión en los enlaces que el tráfico pequeño descentralizado. En la constelación NSNP/NP/F del Delta de Wakler, como se muestra en la Figura 3, la inclinación es α, y la ascensión recta de la diferencia del nodo ascendente (RAAN) de las órbitas adyacentes es ΔΩ = 2π/NP. La diferencia de fase entre satélites vecinos en la misma órbita es ΔΦ = 2π/NS, mientras que la diferencia de fase entre satélites vecinos en órbitas adyacentes es Δu = 2πF/NSNP, mientras que u1 y u2 son el argumento de latitud (o ángulo de fase) valores de los satélites de origen y destino , respectivamente. El argumento de latitud es el ángulo entre el nodo ascendente y el satélite y básicamente define la posición del satélite en la órbita, donde ζ(u1) y ζ(u2) indican la diferencia de longitud del satélite de origen y destino con respecto al ascendente correspondiente. nodos, respectivamente. En la constelación Walker Delta, el recuento de saltos de extremo a extremo incluye tanto los saltos transversales entre planos Hh como los saltos intraplano Hv.

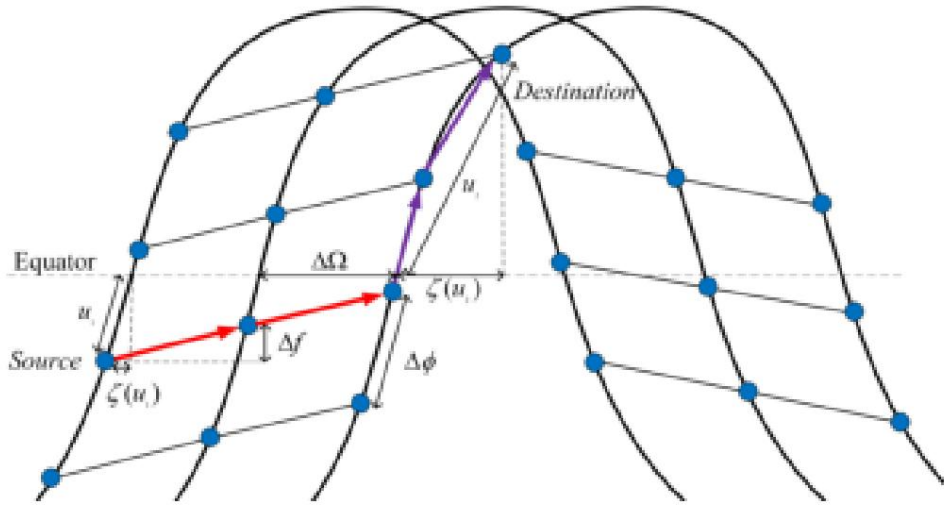


Figura 3. Seguimiento del punto subsatelital de las redes de megaconstelaciones.

4.1.1. Saltos entre planos Hh El

número de saltos entre planos depende de la diferencia RAAN ΔY0 de las órbitas donde se encuentran los nodos de origen y destino. Dado un par de satélites de origen y destino (s, d), ΔY0 se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta Y0 = (Y2 - Y1) \bmod 2\pi \quad [0, 2\pi] \tag{11}$$

donde Y1 y Y2 son los valores RAAN de s y d, respectivamente. Si el satélite de destino está al oeste del satélite de origen, entonces la diferencia RAAN es 2π − ΔY0. Desde la RAAN

Machine Translated by Google

la diferencia entre órbitas adyacentes es constante (es decir, $\Delta\Omega = 2\pi/NP$), los saltos entre planos en las direcciones oeste y este se pueden expresar de la siguiente manera:

$$S.S^{\leftarrow} = \frac{2\pi - \Delta Y0}{\Delta\Omega} \quad (12)$$

$$S.S^{\rightarrow} = \frac{\Delta Y0}{\Delta\Omega} \quad (13)$$

donde $x = \text{sgn}(x)\ x + 1/2$ denota el número entero más cercano a x, $H_h^{\leftarrow}$ es el recuento de saltos entre los planos orbitales hacia el oeste y $H_h^{\rightarrow}$ es el recuento de saltos entre planos hacia el este.

4.1.2. Saltos intraplano Hv Los

saltos intraplano dependen de la diferencia de ángulo de fase Δu del satélite. Cada salto dentro del plano aumenta el ángulo de fase en $\Delta\Phi$, y cada salto entre planos da como resultado un incremento del ángulo de fase de Δf . Por tanto, el ángulo de fase del satélite de destino se puede expresar de la siguiente manera:

$$u2 = u1 + \Delta f \cdot H_h^{\rightarrow} + \underbrace{\Delta\Phi}_{\Delta u} \cdot H_v \quad (14)$$

donde H_v es el recuento de saltos dentro del plano hacia el este. Para calcular Hv, es necesario primero eliminar la diferencia de fase $\Delta f \cdot H_h^{\rightarrow}$ causada por Hh de la diferencia de fase $\Delta u = u2 - u1$, donde u1 y u2 son el argumento de los valores de latitud de los satélites de origen y destino. , respectivamente. Para distinguir entre la diferencia de fase debida a la propagación hacia el este y hacia el oeste, Δu se puede expresar por separado de la siguiente manera:

$$\Delta u = (u2 - u1 - H_h^{\rightarrow} \cdot \Delta f) \bmod 2\pi \quad (15)$$

$$\Delta u^{\leftarrow} = (u2 - u1 + H_h^{\leftarrow} \cdot \Delta f) \bmod 2\pi \quad (16)$$

donde Δf es el cambio del ángulo de fase debido a los saltos entre planos. Como se ilustra en la Figura 3, la trayectoria del punto subsatelital se divide en un segmento ascendente (de suroeste a noreste) y un segmento descendente (de noroeste a sureste), lo que permite la propagación de datos en ambas direcciones. En consecuencia, en este trabajo se calculan los saltos intraplano en las cuatro direcciones, los cuales se pueden expresar de la siguiente manera:

$$h_v = \frac{\Delta tu^{\leftarrow}}{\Delta\Phi} \quad (17)$$

$$h_v = \frac{\Delta u}{\Delta\Phi} \quad (18)$$

$$H_v = \frac{2\pi - \Delta tu^{\leftarrow}}{\Delta\Phi} \quad (19)$$

$$H_v = \frac{2\pi - \Delta u}{\Delta\Phi} \quad (20)$$

donde $\Delta u^{\leftarrow}$ y Δu denotan la diferencia de fase debida a la propagación hacia el oeste y el este y H denota la entre órbitas adyacentes, respectivamente. Mientras tanto, la $_v$, h_v, H_v, $_v$ diferencia de fase H se debe a saltos en la órbita hacia el noroeste, noreste, suroeste y sureste, respectivamente.

Machine Translated by Google

Los saltos entre planos Hh y los saltos intraplano, Hv se calcularon anteriormente. En consecuencia, el recuento mínimo de saltos de un extremo a otro en la constelación de órbita inclinada puede ser expresado de la siguiente manera:

$$H = \text{mín.} \begin{matrix} H_{h}^{\leftarrow} + H_{v} \\ H_{h}^{\leftarrow} + H_{v} \\ H_{h}^{\rightarrow} + H_{v} \\ H_{h}^{\rightarrow} + H_{v} \end{matrix} \quad (21)$$

Sobre la base de obtener la ruta de conteo de saltos más corta, se encuentran múltiples rutas disponibles. generado. Tomando el cálculo de la ruta subóptima entre pares de nodos (s, d) como un Por ejemplo, en primer lugar, la frecuencia de ocupación $F_{a,b}^{t}$ de cada enlace y el número mínimo de saltos conjunto de rutas $R_{a,b}^{t}$ se calculan. Mientras tanto, el umbral de frecuencia de ocupación del enlace ξε es definido. El peso en toneladas $_{a,b}$ [r1,r2] del enlace (a, b) se establece si $F_{a,b}^{t} \le \xi\varepsilon$; de lo contrario, mt [r2,r3], donde r1 < r2 < r3 son números aleatorios. Para evitar la interconexión de caminos dispares, la NCC eliminará los enlaces en $R_{a,b}^{t}$ de la red. Después, el NCC identificará las rutas óptimas viables para (s, d) entre los enlaces restantes, Utilizando el principio del conteo de saltos de extremo a extremo más corto. El proceso mencionado se repite continuamente hasta L posibles caminos entre dos nodos cualesquiera en la red han sido identificados. El proceso específico de MHMRD se ilustra en el Algoritmo 1. El La complejidad computacional del algoritmo 1 es O (N log N).

Algoritmo 1: descubrimiento de rutas multiruta basado en un recuento mínimo de saltos (MHMRD).

Entrada: {(V, E, T, N)}, par de nodos de origen-destino P
Salida: Rutas candidatas R

```
Inicialización: R =
para i = 1 : N hacer
    Calcule la ruta de conteo mínimo de saltos R^t mediante la ecuación (21);
    Calcular otras rutas disponibles;
    para (s, d) en P hacer
        para l = 1 : L − 1 hacer
            Calcular la frecuencia de ocupación F^t_{a,b} de cada LIS;
            para (a, b) en R no lo hago
                F^t_{a,b} ← F^t_{a,b} + 1;
            fin
            para (a, b) en E^t hacer
                si F^t_{a,b} ≤ ξε entonces
                    mt_{a,b} [r1,r2];
                fin
                si F^t_{a,b} > ξε entonces
                    mt_{a,b} [r2,r3];
                fin
            fin
            para e en R^t hacer
                Retire el borde de E^t;
            fin
            Calcule las rutas factibles R a través de la ruta de conteo mínimo de saltos;
        fin
    fin
fin
```

Machine Translated by Google

4.2. Programación de tráfico de rutas múltiples

Según la finalización del descubrimiento de rutas multiruta, el segundo subproblema del enrutamiento multiruta para MCN es la programación del tráfico multiruta, que se puede expresar de la siguiente manera

$$\begin{aligned} &\text{P2: Uf máx . , } \quad \bar{d} \quad , \quad t \quad T \\ &\qquad l \\ &\text{calle} \quad \sum_{l=1t} {}^{(\alpha)t} M m_{,l} = 1, \cdots, \\ &\qquad f_{\varepsilon j} \le BW, \quad \varepsilon j \quad p \quad {}^{t}_{m,l} \end{aligned} \tag{22}$$

Dado que la decisión de asignación de tráfico en redes satelitales depende del estado actual del nodo y de los nodos circundantes en la red, independientemente del estado histórico, el subproblema de programación de tráfico de múltiples rutas puede describirse como un proceso de decisión de Markov (MDP). La aparición de fallos en los ISL o en los nodos tiene el efecto de perjudicar la funcionalidad de la red de satélite, lo que da lugar a frecuentes alteraciones de la topología de la red. Dado que GNN tiene una capacidad de generalización superior para topologías de diferentes tamaños, este artículo propone la adopción de programación de tráfico de rutas múltiples (GMTS) basada en GNN, como se ilustra en la Figura 4. El agente DRL utiliza un algoritmo de optimización de políticas proximales (PPO). que es un algoritmo actor-crítico. En cada etapa del MDP, el modelo actor selecciona una decisión de programación de tráfico y el modelo crítico asigna una puntuación a esa decisión basándose en la retroalimentación de la recompensa ambiental. El proceso se repite continuamente, con el objetivo de optimizar la tarea de programación de flujo para maximizar la recompensa acumulada.

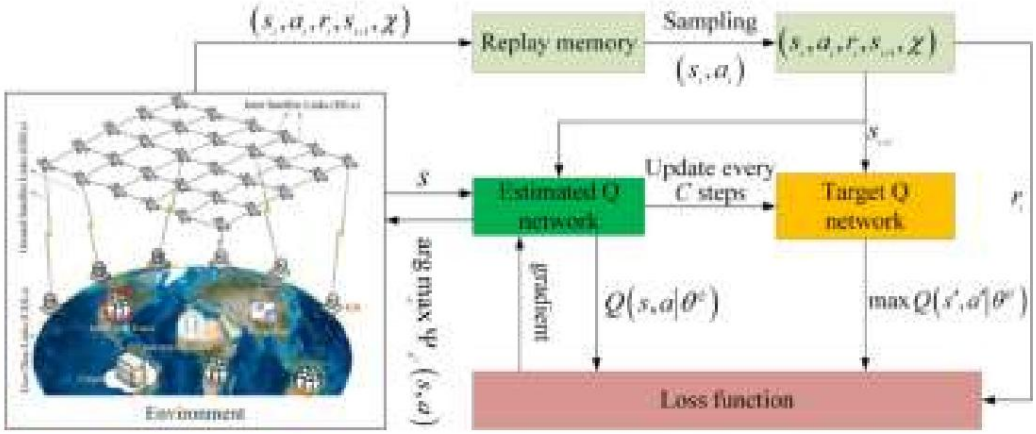


Figura 4. El marco del algoritmo de programación de tráfico multitrayecto (GMTS) basado en GNN propuesto.

4.2.1. Estado

Al dividir el tiempo en múltiples intervalos de tiempo, la matriz de demanda de tráfico dentro de cada intervalo de tiempo se puede indicar como TR = [b1, b2, · · ·, bM], donde bi denota el ancho de banda entre el i-ésimo par de nodos. Según la ecuación (5), el rendimiento del enlace j-ésimo es fj .
En consecuencia, el ancho de banda residual del enlace i, denotado por ci , se puede expresar en términos del ancho de banda del enlace BW:

$$\text{L] } ci = BW - fi , \quad \text{yo} \quad [1, \tag{23}$$

Dado que el número máximo de saltos entre pares de nodos es Hmax, la j-ésima ruta entre el i-ésimo par de nodos puede designarse como pi,j = {e1,e2, · · ·,eHmax }, y la matriz de ruta correspondiente puede ser designado como Pt = [p1,1, · · ·, p1,L, · · ·, pM,L]. Por lo tanto, el vector de estado en el intervalo de tiempo t se puede expresar de la siguiente manera:

$$st = [Ct , TRt , Gt , Pt], \; st \quad S \tag{24}$$

donde S es el espacio de estados de la red de satélites.

Machine Translated by Google

4.2.2. Acción

Según la información del espacio de estados, NCC divide el tráfico de red entre cada par de nodos en L rutas candidatas que se calculan previamente. Por lo tanto, la acción se define como un vector que consiste en la proporción de tráfico en las rutas candidatas, que se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{ttt en} = \omega \cdot \cdot \cdot, \omega \cdot \cdot \cdot, \omega \; {}^{1,1,}_{1,l\,,} \; {}_{M,L} \tag{25}$$

donde la proporción de flujo en cada camino debe satisfacer la Ecuación (2).

4.2.3. Premio

Después de ejecutar la acción en el estado st en el momento t, el agente obtendrá retroalimentación para evaluar la efectividad de la acción. En la programación del tráfico de trayectos múltiples, la recompensa es la función objetivo del subproblema P2, que se puede expresar de la siguiente manera:

$$rt = \sum_{\text{metro}=1}^{\text{METRO}} \sum_{l=1}^{l} \text{Ud.} \; \bar{}_{fm,l\,,} \; \bar{}_{dm,l} \tag{26}$$

donde $\bar{}_{fm,l}$ es el rendimiento promedio en la l-ésima ruta entre el m-ésimo par de nodos y $\bar{}_{dm,l}$ es el retraso promedio en la l-ésima ruta entre el m-ésimo par de nodos. El agente buscará completar la programación del tráfico multiruta con un mayor rendimiento y una menor latencia.

Dado que la toma de decisiones se divide en múltiples fases, la recompensa acumulada Rt , basada en una recompensa momentánea única definida, se puede expresar de la siguiente manera:

$$Rt = \sum_{k=0}^{\infty} k \, \rho \, rt+k+1 \tag{27}$$

donde ρ [0, 1] es el factor de descuento. Dado que hay múltiples acciones posibles en cada estado, la ganancia promedio para cada estado y la ganancia promedio para cada acción estatal se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\Gamma\mu(s) = E\mu(\, Gt|st = s) \tag{28}$$

$$\Psi\mu(s, a) = E\mu(\, Gt|st = s, at = a) \tag{29}$$

Aquí, Ψμ(s, a) se maximiza cuando el agente del DRL encuentra la política óptima μ , convirtiendo el proceso de actualización de Ψμ(s, a) con el número de iteraciones a la forma Bellman ; en otras palabras, tenemos

$$\Psi\mu(s, a) = E\mu \; rt + \rho\Psi\mu(st+1, at+1) \; st = s, at = a \tag{30}$$

Después de que el DRL converge a un nivel estable, la acción óptima correspondiente aμ se puede expresar de la siguiente manera:

$$a) \; a\mu = \arg \max_{a} \Psi\mu \; (s, \tag{31}$$

4.3. Proceso de formación de GMTS

El pseudocódigo para el proceso de entrenamiento GMTS se muestra en el Algoritmo 2 con la complejidad computacional de O(L). Primero se requiere la inicialización de μ(s|θ μ) y Q s, a|θ Q , donde θ μ y θ Q son hiperparámetros de la red de actores y la red crítica, respectivamente. Durante la fase de entrenamiento, el búfer de repetición de experiencias se emplea para almacenar datos de interacción ambiental, incluidos estados, acciones y recompensas. Para evitar el sobreajuste, las muestras generadas (st , at ,rt ,st+1, χ) se almacenan en el búfer de reproducción de la experiencia en cada paso de decisión. En este punto, se utiliza χ {0, 1} para determinar si el entrenamiento del modelo está completo en la fase actual. La muestra (si , ai , ri , si+1 , χ) se extraerá a intervalos específicos en

Machine Translated by Google

de acuerdo con el umbral del buffer de reproducción Bmax con el objetivo de entrenar la red. En este punto, el valor Q objetivo se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q\ yi = ri + \rho(1 - \chi)\ Q\ si+1\ ,\ ai+1|\theta \tag{32}$$

Algoritmo 2: Proceso de entrenamiento de la programación de tráfico multitrayecto (GMTS) basada en GNN.

```
Entrada: Bmax, red crítica, red de actores y red objetivo Salida: aμ    1 para i =
1: L do
Restablece el estado
inicial como s0 para t = 1: T do
Calcula la acción
    en , recompensa rt y nuevo estado st +1 Almacenar (st , at ,rt ,st+1,
    χ) en el búfer de reproducción Actualizar el estado st
    a st+1 mientras |B| ≤ Bmax do para j = 1 : NB do
        Calcule pi según la
            ecuación (34)
            Calcule ωi según la ecuación (36)
            Calcule el valor Q objetivo yi según la ecuación (32)
            Actualizar la probabilidad de transición de muestreo de acuerdo con el final
              de la Ecuación
        (35)
    end
    Calcule la pérdida de la red crítica y la red de actores según las Ecuaciones (38) y (39)
    Actualice el parámetro de la red de actores y la red crítica según el enfoque descendente
      de gradiente. 16 fin
17 fin
```

En el algoritmo GMTS, el error de diferencia temporal (error TD) se emplea como medio para medir la importancia de las transiciones. El error TD entre el valor Q objetivo y el valor Q actual se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q\ \delta i = yi - Q\ si\ ,\ ai\ |\theta \tag{33}$$

La priorización proporcional correspondiente es

$$pi = \delta i + \eta \tag{34}$$

donde η denota una cantidad extremadamente pequeña y η se suma para que las muestras puedan muestrearse incluso cuando el error TD sea cero. Se adopta el método de muestreo estocástico y la probabilidad de transición de muestreo i es

$$P(i\ ) = \frac{Pi^{\alpha}}{\sum kp^{\alpha}_{k}} \tag{35}$$

donde α determina cuánta priorización se utiliza. Cuando α = 0, entonces el método de muestreo se degrada a muestreo aleatorio. Los pesos de la muestra de importancia (IS) de (si , ai , ri , si+1 , χ) son

$$\omega i = \left(\frac{Pi)}{Pmín}\right)^{b} \tag{36}$$

Machine Translated by Google

donde β se utiliza para control sesgado e insesgado. Dada la tasa de aprendizaje Q, la red de actores θ Q se puede actualizar de la siguiente manera:

$$\theta Q \leftarrow \theta Q + \quad Q\delta i \quad \theta Q\, Q\, s, a|\theta \quad q \tag{37}$$

Por tanto, la función de pérdida de la red crítica y la red de actores se puede expresar de la siguiente manera:

$$Lq = \frac{1}{\text{NOTESEBIEN}} \sum_{yo=1}^{Bmáx} \omega i \delta_{yo}^{2} \tag{38}$$

$$L\mu = -Q\, s, a|\theta \quad q \tag{39}$$

donde NB es el tamaño del buffer de reproducción B.

4.4. Flujo de trabajo de

DMR El enrutamiento de rutas múltiples (DMR) basado en DRL propuesto en este documento se puede dividir en dos fases, descubrimiento de rutas de rutas múltiples basado en el recuento mínimo de saltos (MHMRD) y programación de tráfico de rutas múltiples basada en GNN (GMTS), como se muestra en la Figura 5. En la primera etapa, el centro de control de la red primero planifica múltiples rutas óptimas entre pares de nodos arbitrarios según el principio de recuento mínimo de saltos de acuerdo con la topología de la red. Específicamente, basándose en la periodicidad y previsibilidad de las órbitas de los satélites, la red se divide en múltiples intervalos de tiempo según los intervalos de intervalos de tiempo, y la topología de la red permanece estable en cada intervalo de tiempo discreto. Dentro de cada intervalo de tiempo, MHMRD calcula L rutas de recuento mínimo de saltos disponibles para cada servicio en función del orden de prioridad definido por MHMRD en función del volumen de servicio de extremo a extremo. Después de completar el cálculo para el intervalo de tiempo actual, pasa al siguiente intervalo de tiempo. En la segunda fase, el centro de control de la red genera los ratios de división para cada servicio en diferentes rutas en función del modelo obtenido del entrenamiento GMTS y los envía a los satélites correspondientes en el momento adecuado antes del inicio de cada franja horaria.

Por un lado, este artículo adopta la repetición de experiencia prioritaria para acelerar la convergencia del modelo al muestrear las muestras en el grupo de repetición de experiencia de acuerdo con una determinada prioridad. Por otro lado, debido a la naturaleza dinámica de las redes satelitales, la topología de la red y las matrices de tráfico varían en el tiempo, y las DNN tradicionales no pueden manejar eficazmente tales entradas cambiantes. Por lo tanto, en este artículo, adoptamos GNN para estructuras de gráficos de tamaño variable y configuraciones de ruta en consecuencia. Dado que los GNN tienen mejores capacidades de generalización para estructuras de redes dinámicas en diferentes escalas, se pueden usar para agregar características elementales sin especificar las dimensiones de entrada.

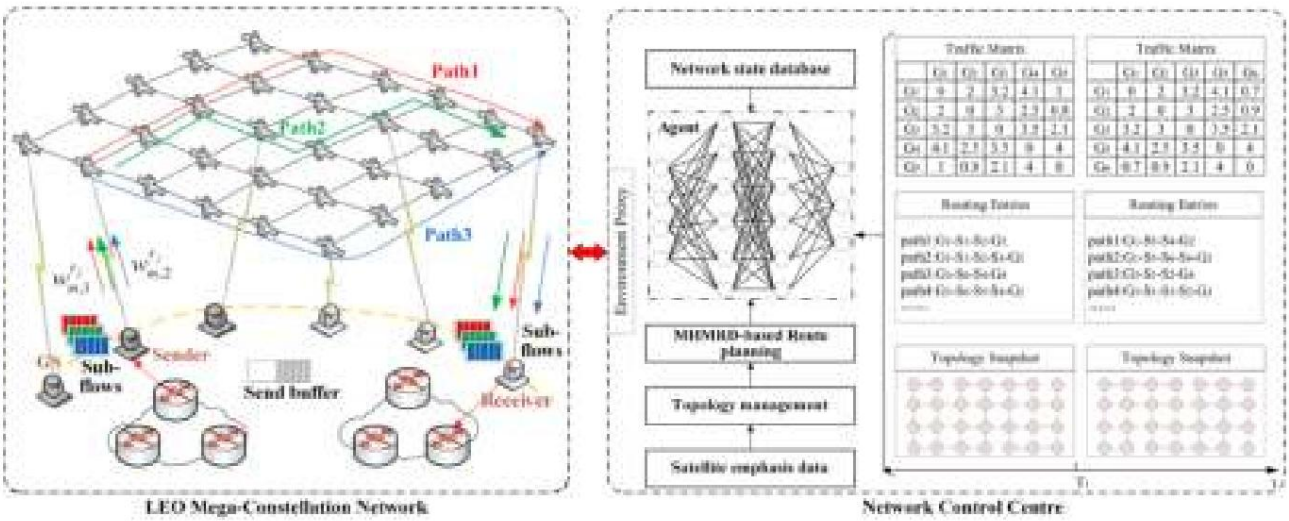


Figura 5. Enrutamiento multiruta basado en DRL para redes de megaconstelaciones LEO.

Machine Translated by Google

5. Evaluación del desempeño

5.1. Configuración de simulación

En este artículo, implementamos el cálculo de enrutamiento y la programación del tráfico de rutas múltiples para Megaconstelaciones LEO en NS3 para analizar el rendimiento del algoritmo DMR propuesto. Para analizar la escalabilidad del enrutamiento multitrayecto en diferentes constelaciones, este El artículo realiza pruebas en dos constelaciones de diferentes tamaños. La primera constelación fue la constelación Iridium [35] con 66 satélites en órbita polar, y el segundo fue el Constelación OneWeb [36] con 648 satélites, que contiene un total de 18 planos orbitales con 36 satélites distribuidos uniformemente en cada plano orbital. Los parámetros de los dos. Las constelaciones se muestran en la Tabla 1. Para validar el rendimiento de rutas múltiples enrutamiento bajo diferentes tamaños de demanda de tráfico, se generó un conjunto de datos de tráfico basado en la densidad del tráfico terrestre, donde el número de pares de nodos de origen-destino era 50. El algoritmo GMTS propuesto se implementó en base a Python 3.9 y Pytorch 1.14, y los parámetros correspondientes se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Parámetros de la constelación.

Constelación	notario público	NS	NG	ε	h	mi
Iridio	6	11	diecisiete	90◦	780 kilometros	20◦
OneWeb	18	36	diecisiete	53◦	550 kilometros	20◦

Tabla 2. Parámetros de entrenamiento.

	Parámetro	Valor
Parámetro de red	ng	24
	Lq	100
	pak	1 KB
Parámetro de aprendizaje	NOTESE BIEN	32
	Bmáx	100
	α	0,6
	β	0,5
	ρ	0,8

El rendimiento del algoritmo basado en descubrimiento de rutas multiruta (MHMRD) de recuento mínimo de saltos propuesto, que distribuye el tráfico de un extremo a otro en proporciones iguales. para rutas múltiples precalculadas, se probó primero. En base a esto, el algoritmo GMTS fue entrenado utilizando topología de constelación de órbita inclinada y matrices de tráfico [37], que fueron desplegados en el NCC después de la capacitación y probados para métricas clave como el promedio rendimiento, latencia y tasa de finalización del flujo de la red satelital. La siguiente En este artículo se utilizaron algoritmos de comparación:

- Primero el algoritmo de ruta más corta (SPF): SPF emplea el retardo de transmisión promedio como un métrica de enlace con el objetivo de minimizar el retraso total.
- Enrutamiento cooperativo multiruta basado en codificación de red (NCMCR) [24]: NCMCR es Diseñado para abordar los desafíos de enrutamiento planteados por una topología que cambia con frecuencia. y una conectividad potencialmente escasa e intermitente. El algoritmo NCMCR toma ventaja de la previsibilidad del movimiento relativo de los satélites, con la topología variable en el tiempo modelada como un mapa espaciotemporal.
- Enrutamiento troncal multiruta basado en Ant para equilibrio de carga (AMBRLB) [38]: en orden Para superar los problemas de desbordamiento de tráfico y gastos generales, un equilibrio de carga basado en hormigas Se propuso un algoritmo de enrutamiento troncal multiruta en MANET. Tras la iniciación de transmisión por un nodo de origen a un nodo de destino, la optimización de la colonia de hormigas (ACO) se emplea para identificar múltiples rutas con la mayor probabilidad del éxito.

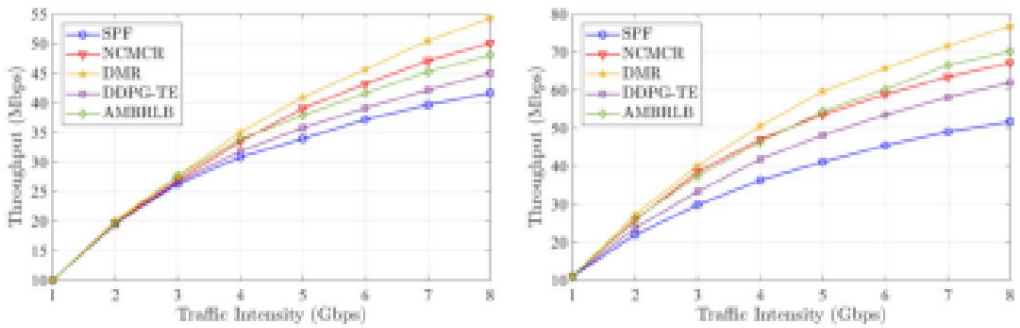
Machine Translated by Google

- Ingeniería de tráfico de gradiente de política determinista profunda (DDPG-TE) [39]: este método emplea el algoritmo DDPG para asignar dinámicamente las proporciones de tráfico de diferentes rutas de transmisión. Cabe señalar que el modelo no es aplicable a constelaciones de satélites arbitrarias, ya que las dimensiones del estado y los espacios de acción están limitadas por el tamaño de la topología de entrada y las matrices de tráfico.

5.2. Resultados y Análisis

5.2.1. Rendimiento

El rendimiento promedio de MCN en la constelación Iridium y la constelación OneWeb se ilustra en la Figura 6, y cada punto de datos representa el valor promedio del rendimiento en cinco instantáneas topológicas consecutivas. Se puede observar que, en el contexto del enrutamiento multiruta, a medida que aumentaba el volumen de tráfico de entrada, una mayor proporción del tráfico se asignaba a múltiples rutas para su reenvío, en función de diferentes políticas. Esto resultó en un aumento general en el rendimiento promedio de la red. Sin embargo, el aumento del rendimiento se fue desacelerando gradualmente. El algoritmo DMR propuesto mostró un rendimiento superior en diferentes tamaños de usuarios. DMR mejoró el rendimiento promedio en un 30,26 % y un 8,45 % en comparación con SPF y NCMCR, respectivamente, cuando el volumen total de servicio alcanzó su límite superior. La Figura 6b ilustra el rendimiento del enrutamiento multiruta en la constelación OneWeb. Se puede observar que DMR empleó el mismo modelo que el utilizado para la constelación Iridium, mientras que los otros algoritmos fueron reentrenados en función de las características de la nueva red. Se puede observar que el algoritmo DMR continuó demostrando un rendimiento superior en relación con otros algoritmos de referencia en el contexto de cambios en la topología y el tamaño de la constelación, lo que refleja la mayor capacidad de generalización de DMR. Cuando la intensidad del tráfico fue de 8 Gbps, DMR demostró una mejora en el rendimiento promedio del 42,64 % y 9,55 % en comparación con SPF y NCMCR, respectivamente.



(a) (b)

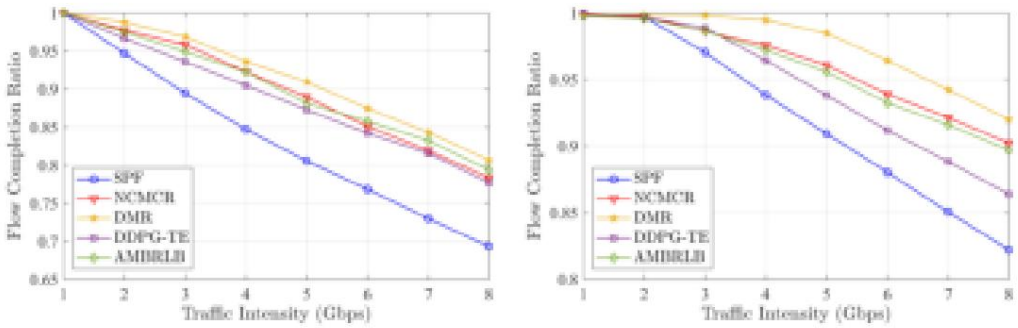
Figura 6. Rendimiento promedio en diferentes constelaciones con distinta intensidad de tráfico. (a) Rendimiento promedio de Iridium. (b) Rendimiento promedio de OneWeb.

5.2.2. Índice de finalización de flujo promedio

La Figura 7 ilustra el índice promedio de finalización del flujo para diferentes intensidades de tráfico en las constelaciones Iridium y OneWeb. A medida que aumentó la intensidad del tráfico, algunos nodos de la red se congestionaron gradualmente. Esto se evidencia en una tendencia decreciente en los índices promedio de finalización del flujo de los cinco esquemas de enrutamiento. Con una intensidad de tráfico de 8 Gbps, el índice de finalización de flujo promedio del esquema DMR propuesto mejoró en un 17,39 % y un 11,52 % en las constelaciones Iridium y OneWeb, respectivamente, en comparación con SPF. Mientras tanto, en la constelación OneWeb, la tasa promedio de finalización de transmisión del algoritmo DMR mejoró en un 1,98 %, 2,58 % y 6,49 % en comparación con NCMCR, AMBRLB y DDPG-TE, respectivamente. En consecuencia, se puede ver que el índice de finalización de flujo promedio en la constelación OneWeb más grande fue consistentemente mayor que el de la constelación Iridium más pequeña, incluso bajo intensidades de tráfico variables. Esto demuestra la ventaja de las constelaciones de gran escala a la hora de manejar cargas elevadas. Por lo tanto, se puede co

Machine Translated by Google

El esquema DMR propuesto demuestra una capacidad de generalización superior en diferentes constelaciones de escala, con una tasa de finalización de flujo más alta que el esquema de referencia.



(a) (b)

Figura 7. Tasa promedio de finalización del flujo de diferentes constelaciones con distinta intensidad de tráfico. (a) Índice de finalización de flujo promedio para la constelación de Iridium. (b) Índice de finalización de flujo promedio para la constelación OneWeb.

5.2.3. Retraso promedio de extremo a

extremo La Figura 8 ilustra el retraso promedio de extremo a extremo en función de la intensidad del tráfico en las constelaciones Iridium y OneWeb. A medida que aumentó la carga de la red, el retraso en la cola también aumentó, con más flujos transmitidos a lo largo de las rutas candidatas con mayor número de saltos. En consecuencia, el retraso medio de un extremo a otro aumentó gradualmente para todos los esquemas comparados. En la constelación de Iridium, SPF logró el retraso de extremo a extremo más bajo cuando la carga de la red era baja. Esto se debe al hecho de que el esquema siempre transmite los paquetes por la ruta más corta cuando todos los enlaces de la red están en estado normal. A medida que aumenta la carga de la red, cuando el volumen total de servicio alcanza el límite superior, SPF no puede cambiar dinámicamente la ruta para evitar rutas congestionadas causadas por el aumento de la carga. En consecuencia, en la constelación Iridium, el esquema DMR redujo el retraso promedio de extremo a extremo en un 3,67 %, 1,78 %, 1,86 % y 0,86 % en comparación con SPF, NCMCR, DDPG- TE y AMBRLB, respectivamente. Al extender el enrutamiento de rutas múltiples a constelaciones OneWeb más grandes, el retraso para DMR se acercó al de NCMCR, AMBRLB y DDPG-TE cuando la intensidad del tráfico alcanzó su límite superior. Esto se debe al hecho de que tanto el esquema DMR como el esquema DDPG-TE tienen en cuenta la distribución dinámica del tráfico en diferentes rutas. En general, el retardo medio de extremo a extremo de DMR con una carga alta se situó entre los de SPF y DDPG-TE. El objetivo principal del enrutamiento multiruta es mejorar el rendimiento y la resiliencia de la red cuando se interrumpe la topología. En constelaciones de pequeña escala, el enrutamiento multitrayecto ofrece opciones de enrutamiento adicionales que pueden emplearse para sortear los nodos congestionados de mar Sin embargo, en constelaciones a gran escala, siempre hay suficientes rutas alternativas y la mejora en las métricas de retraso de un extremo a otro no es sustancial.

Los resultados experimentales demuestran que el esquema SPF con el camino más corto exhibió un retraso promedio más bajo en escenarios de baja carga. Sin embargo, SPF exhibió el rendimiento promedio y el índice de finalización de flujo promedio más bajos, y el rendimiento de SPF se deterioró rápidamente en condiciones de carga alta. Por el contrario, el esquema DMR propuesto exhibió un mejor rendimiento promedio y una tasa de finalización de flujo bajo diferentes cargas, y exhibió una mejor capacidad de generalización en constelaciones de diferentes tamaños y topologías sin entrenamiento repetido.

Machine Translated by Google

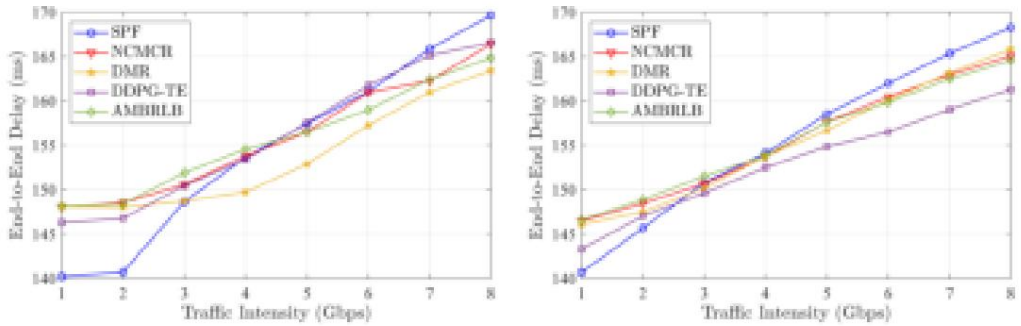


Figura 8. Retraso promedio de un extremo a otro para diferentes constelaciones con diversas intensidades de tráfico. (a) Retraso promedio de extremo a extremo para la constelación de Iridium. (b) Retraso promedio de un extremo a otro para la constelación OneWeb.

6. Conclusiones

Este artículo propone una solución de enrutamiento multiruta (DMR) basada en aprendizaje por refuerzo profundo (DRL) para redes satelitales. El objetivo era abordar el problema de la transmisión por trayectos múltiples en las redes de megaconstelaciones LEO. El enfoque DMR propuesto divide el enrutamiento multitrayecto en dos subproblemas: selección de ruta multitrayecto y programación del tráfico multitrayecto. En el contexto del subproblema de selección de rutas de múltiples rutas, este artículo propuso un esquema de enrutamiento centralizado, MHMRD, que genera un conjunto de rutas disponibles para nodos de un extremo a otro. Esto se logra recopilando información del estado del nodo en función del recuento mínimo de saltos actual de un extremo a otro y la utilización del enlace. En el subproblema de programación del tráfico multitrayecto, se propone la programación del tráfico multitrayecto (GMTS) basada en G Cada nodo de enrutamiento está controlado por un agente DQN, y el GNN se utiliza para abordar el problema de las topologías de redes satelitales que varían topológicamente. El modelo óptimo de programación del tráfico de trayectos múltiples se obtuvo mediante entrenamiento iterativo. El esquema DMR propuesto finalmente se validó en dos tamaños diferentes de megaconstelaciones en el entorno de simulación Los resultados de la simulación demuestran que el esquema DMR propuesto exhibió un rendimiento superior en términos de rendimiento promedio de la red y tasa promedio de finalización del flujo en comparación con el esquema de referencia. Además, el esquema DMR abordó eficazmente el enrutamiento de la red satelital bajo equilibrio de carga manteniendo al mismo tiempo aumentos mínimos en los costos de demora. Además, el esquema DMR ideado en este artículo mostró una escalabilidad y adaptabilidad favorables en el contexto de la evolución de las topologías de constelaciones. También es capaz de extenderse a redes satelitales con topologías cambiantes sin necesidad de capacitación adicional.

Cabe señalar que a medida que el tamaño de la constelación continúa expandiéndose, también aumentan los requisitos computacionales del enrutamiento en línea basado en DQN. En el futuro, pretendemos explorar el potencial de adoptar soluciones como la implementación de múltiples controladores para mejorar la capacidad de respuesta de la red y validar aún más su eficacia en escenarios del mur

Contribuciones de los autores: Conceptualización, CH; metodología, CH; software, RY; validación, WX; análisis formal, CH; investigación, WX; recursos, WX; curación de datos, CH; redacción: preparación del borrador original, CH; redacción: revisión y edición, CH; visualización, CH; supervisión, WX; administración de proyectos, WX y RY; adquisición de financiación, WX y RY Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por el Proyecto del Fondo Nacional de Laboratorios Clave con el número de subvención 614201003022207 y el Proyecto de Nueva Ingeniería de Educación en Disciplina Aeroespacial con el número de subvención 145AXL250004000X.

Declaración de disponibilidad de datos: Se puede acceder a los datos relevantes y al código fuente de este documento comunicándose con hanchi@hgd.edu.cn.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Machine Translated by Google

Abreviaturas

En este manuscrito se utilizan las siguientes abreviaturas:

DRL	Aprendizaje por refuerzo profundo
Enrutamiento multiruta basado en DMR DRL	
MHMRD Algoritmo de descubrimiento de enrutamiento multiruta basado en un número mínimo de saltos	
Red neuronal gráfica GNN	
Programación de tráfico multiruta basada en GMTS GNN	
Red de megaconstelaciones MCN	
SAGIN Red integrada espacio-aire-tierra	
ISL	Enlaces entre satélites
SDN	Red definida por software
RAAN Ascensión recta del nodo ascendente	
ICONA	centro de control de red
LEÓN	Orbita terrestre baja
Red DQN Deep Q	

Referencias

1. Jiang, X.; Huang, Y.; Li, J.; Él, H.; Chen, S.; Yang, F.; Yang, J. Enrutamiento espacio-temporal, codificación redundante y programación de rutas múltiples para la transmisión determinista de redes satelitales. Traducción IEEE. Comunitario. 2023, 71, 2860–2875. [Referencia cruzada]
2. Kodheli, O.; Lagunas, E.; Maturo, N.; Sharma, SK; Shankar, B.; Montoya, JFM; Duncan, JCM; Spano, D.; Chatzinotas, S.; Kisseleff, S.; et al. Comunicaciones por satélite en la nueva era espacial: un estudio y desafíos futuros. Comunicaciones IEEE. Sobrevivir. Tutor. 2021, 23, 70–109. [Referencia cruzada]
3. Rakhmanov, A.; Wiseman, Y. Compresión de datos GNSS con el objetivo de acelerar la comunicación con vehículos autónomos. Sensores remotos 2023, 15, 2165. [CrossRef]
4. Correia, SD; Pérez, R.; Matos-Carvalho, J.; Leithardt, VRQ µJSON, un esquema de compresión ligero para la transmisión de datos GNSS integrados en nodos de IoT. En Actas de la Quinta Conferencia sobre la Nube y el Internet de las Cosas (CIoT) de 2022, Marrakech (Marruecos), 28 a 30 de marzo de 2022; págs. 232-238.
5. Xue, C.; Li, W.; Yu, L.; Shang, J.; Chen, X.; Lu, S. SERO: un marco de itinerancia continuo basado en modelos para malla inalámbrica Red con TCP de múltiples rutas. Traducción IEEE. Comunitario. 2019, 67, 1284–1296. [Referencia cruzada]
6. Liu, X.; Mamá, T.; Qin, X.; Zhou, H.; Zhao, L. Un enrutamiento cooperativo de rutas múltiples potenciado por DRL para redes de satélite LEO ultradensas . En Actas de GLOBECOM 2023, Kuala Lumpur, Malasia, 4 a 8 de diciembre de 2023; págs. 5961–5966.
7. Li, R.; Zhang, J.; Zheng, S.; Wang, K.; Wang, P.; Zhang, X. Algoritmo de enrutamiento de megaconstelaciones LEO basado en segmentación de área. En Actas de la Conferencia de redes y comunicaciones inalámbricas (WCNC) del IEEE de 2023, Glasgow (Reino Unido), 26 a 29 de marzo de 2023; págs. 1–6.
8. Li, Y.; Zhang, Q.; Yao, H.; Gao, R.; Xin, X.; Yu, FR Stigmergy y aprendizaje jerárquico para la optimización de enrutamiento en redes de satélite colaborativas multidominio . IEEE J. Seleccionar. Áreas Comunes. 2024, 42, 1188–1203. [Referencia cruzada]
9. Perkins, CE; Royer, Enrutamiento por vector de distancia bajo demanda ad-hoc EM. En Actas de la WMCSA'99. Segundo taller del IEEE sobre sistemas y aplicaciones de computación móvil, Nueva Orleans, LA, EE.UU., 25 y 26 de febrero de 1999; págs. 90-100.
10. Jiang, F.; Zhang, Q.; Yang, Z.; Yuan, P. Un enrutamiento de rutas múltiples basado en gráficos espacio-temporales en la observación de la Tierra tolerante a las interrupciones Redes de satélites. Traducción IEEE. Aerosp. Electrón. Sistema. 2019, 55, 2592–2603. [Referencia cruzada]
11. Huang, Y.; Yang, D.; Feng, B.; Tian, A.; Dong, P.; Yu, S.; Zhang, H. Un algoritmo de enrutamiento de rutas múltiples habilitado para GNN para Redes de satélites LEO con variación temporal. Traducción IEEE. Veh. Tecnología. 2024, 73, 5454–5468. [Referencia cruzada]
12. Huang, Y.; Jiang, X.; Chen, S.; Yang, F.; Yang, J. Enfoque de programación de tráfico inteligente de rutas múltiples incentivado por feromonas para Redes de satélites LEO. Traducción IEEE. Alambre. Comunitario. 2022, 21, 5889–5902. [Referencia cruzada]
13. Tian, A.; Feng, B.; Zhou, H.; Huang, Y.; Bien, K.; Yu, S.; Zhang, H. Almacenamiento en caché cooperativo federado eficiente basado en DRL para dispositivos móviles Redes de borde. Traducción IEEE. Neto. Serv. Gestionar. 2023, 20, 246–260. [Referencia cruzada]
14. Huang, X.; Yuan, T.; Qiao, G.; Ren, Y. Aprendizaje por refuerzo profundo para el control del tráfico multimedia en software definido Redes. Red IEEE. 2018, 32, 35–41. [Referencia cruzada]
15. Lei, K.; Guo, P.; Wang, Y.; Wu, X.; Zhao, W. Resolver problemas de enrutamiento con una red neuronal de atención de gráficos de bordes residuales. Neurocomputación 2022, 508, 79–98. [Referencia cruzada]
16. Zheng, X.; Huang, W.; Li, H.; Li, G. Investigación sobre tecnología de enrutamiento inteligente generalizada basada en redes neuronales gráficas. Electrónica 2022, 11, 2952. [CrossRef]
17. Wei, H.; Zhao, Y.; Xu, K. G-Routing: enrutamiento en línea flexible basado en redes neuronales gráficas. Red IEEE. 2023, 37, 90–96. [Referencia cruzada]
18. Rusek, K.; Suárez-Varela, J.; Almasán, P.; Barlet-Ros, P.; Cabellos-Aparicio, A. RouteNet: Aprovechamiento de redes neuronales gráficas para modelado y optimización de redes en SDN. IEEE J. Seleccionar. Áreas Comunes. 2020, 38, 2260–2270. [Referencia cruzada]
19. Bi, Y.; Colgar.; Xu, S.; Wang, X.; Lin, C.; Yu, Z.; Sun, P. Redes integradas espacio-terrestres definidas por software: arquitectura, Desafíos y Soluciones. Red IEEE. 2019, 33, 22-28. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

20. Hu, M.; Xiao, M.; Hu, Y.; Cai, C.; Deng, T.; Peng, K. Multidifusión definida por software mediante enrutamiento de segmentos en redes de satélite LEO. Traducción IEEE. Multitud. Computadora. 2024, 23, 835–849. [Referencia cruzada]

21. Han, Z.; Xu, C.; Zhao, G.; Wang, S.; Cheng, K.; Yu, S. Modelo de topología variable en el tiempo para enrutamiento dinámico en redes de constelaciones de satélites LEO. Traducción IEEE. Veh. Tecnología. 2023, 72, 3440–3454. [Referencia cruzada]

22. Giambene, G.; Luong, DK; De Cola, T.; Le, VA; Muhammad, M. Análisis de un enfoque de codificación de bloques a nivel de paquetes para Sistemas Móviles Terrestres-Satélites. Traducción IEEE. Veh. Tecnología. 2019, 68, 8117–8132. [Referencia cruzada]

23. Chen, Z.; Zhou, W.; Wu, S.; Cheng, L. Un protocolo de enrutamiento adaptable de rutas múltiples bajo demanda con soporte QoS para MANET de alta velocidad. Acceso IEEE 2020, 8, 44760–44773. [Referencia cruzada]

24. Tang, F.; Zhang, H.; Yang, LT Enrutamiento cooperativo de rutas múltiples con reconocimiento eficiente para redes de satélite LEO. IEEE Trans. Multitud. Computadora. 2019, 18, 179–192. [Referencia cruzada]

25. Li, G.; Zhou, H.; Feng, B.; Zhang, Y.; Yu, S. Provisión eficiente de cadenas de funciones de servicio en redes superpuestas utilizando refuerzo-Aprendizaje mental. Traducción IEEE. Computación en la nube. 2022, 10, 383–395. [Referencia cruzada]

26. Kato, N.; Fadlullah, ZM; Mao, B.; Tang, F.; Akashi, O.; Inoue, T.; Mizutani, K. La visión del aprendizaje profundo para el control del tráfico de redes heterogéneas: propuesta, desafíos y perspectiva de futuro. Cable IEEE. Comunitario. 2017, 24, 146-153. [Referencia cruzada]

27. Mao, B.; Fadlullah, ZM; Tang, F.; Kato, N.; Akashi, O.; Inoue, T.; Mizutani, K. ¿Enrutamiento o informática? El cambio de paradigma hacia la transmisión de paquetes de redes informáticas inteligentes basada en el aprendizaje profundo. Traducción IEEE. Computadora. 2017, 66, 1946–1960. [Referencia cruzada]

28. Geyer, F.; Carle, G. Aprendizaje y generación de protocolos de enrutamiento distribuido mediante aprendizaje profundo basado en gráficos. En actas del taller de 2018 sobre análisis de big data y aprendizaje automático para redes de comunicación de datos, Budapest, Hungría, 20 de agosto de 2018; págs. 40–45.

29. Liu, C.; Xu, M.; Yang, Y.; Geng, N. DRL-OR: Enrutamiento en línea basado en aprendizaje por refuerzo profundo para requisitos de servicios de varios tipos . En actas de IEEE INFOCOM 2021: Conferencia IEEE sobre comunicaciones informáticas, Vancouver, BC, Canadá, 10 a 13 de mayo de 2021; págs. 1–10.

30. Almasán, P.; Suárez-Varela, J.; Rusek, K.; Barlet-Ros, P.; Cabellos-Aparicio, A. El aprendizaje por refuerzo profundo se une a las redes neuronales gráficas: exploración de un caso de uso de optimización de enrutamiento. Computadora. Comunitario. 2022, 196, 184–194. [Referencia cruzada]

31. Sol, P.; Guo, Z.; Li, J.; Xu, Y.; Lan, J.; Hu, Y. Habilitación de enrutamiento escalable en redes definidas por software con aprendizaje por refuerzo profundo en nodos críticos. Trans. IEEE/ACM. Neto. 2022, 30, 629–640. [Referencia cruzada]

32. Kim, G.; Kim, Y.; Lim, H. Enrutamiento basado en aprendizaje por refuerzo profundo en redes definidas por software. Acceso IEEE 2022, 10, 18121–18133. [Referencia cruzada]

33. Jiang, Z.; Wu, Q.; Li, H.; Wu, J. scMPTCP: Transferencia multitrayecto cooperada por SDN para redes de satélite con conocimiento de carga. Acceso IEEE 2018, 6, 19823–19832. [Referencia cruzada]

34. De Santis, E.; Giuseppi, A.; Pietrabissa, A.; Capponi, M.; Delli Priscoli, F. Integración de satélites en 5G: refuerzo profundo Aprendizaje para la selección de redes. Mach. Intel. Res. 2022, 19, 127-137. [Referencia cruzada]

35. Constelación de Iridio. Disponible en línea: https://celestrak.org/NORAD/elements/table.php?GROUP=iridium (consultado el 30 julio de 2024).

36. Constelación Oneweb. Disponible en línea: https://celestrak.org/NORAD/elements/table.php?GROUP=oneweb (consultado el 30 julio de 2024).

37. Archivo de tráfico del grupo de trabajo MAWI. Disponible en línea: https://mawi.wide.ad.jp/mawi/ (consultado el 30 de julio de 2024).

38. Francisco Antonio Selvi, P.; Manikandan, enrutamiento troncal multiruta basado en Ant de MSK para equilibrio de carga en MANET. Comun IET . 2017, 11, 136-141. [Referencia cruzada]

39. Chen, B.; Sol, P.; Zhang, P.; Lan, J.; Comprar.; Shen, J. Ingeniería de tráfico basada en el aprendizaje por refuerzo profundo en una red híbrida IP/SR. Comuna China. 2021, 18, 204–213. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Diseño de compensador de perturbaciones basado en LMI dilatado para Sistemas lineales de variación de parámetros

Mustafa ˙ Inci 1 y Yusuf Altun 2,*

1 Centro de diseño Volta Motor Industry and Trade Inc., Cumayeri Factory, 81700 Düzce, Türkiye; mustafa@volta.com.tr

2 Departamento de Ingeniería Informática, Universidad de Düzce, 81620 Düzce, Türkiye *
Correspondencia: yusufaltun@duzce.edu.tr

Resumen: Este artículo presenta una nueva representación de desigualdad de matriz lineal dilatada (LMI) para diseñar un controlador de retroalimentación de estado y un compensador dinámico de perturbaciones anticipadas para sistemas lineales de variación de parámetros (LPV). Los LMI mejorados son convexos y de dimensión finita sin ningún enfoque iterativo. Los diseños se basan en un nuevo lema real acotado equivalente (BRL) propuesto mediante dilatación matricial para sistemas LPV y sistemas lineales inciertos bajo incertidumbres paramétricas variables en el tiempo (TVPU). Este BRL dilatado proporciona resultados conservadores más bajos que los métodos existentes en términos de estabilidad sólida. Por consiguiente, además de un controlador de realimentación de estado está diseñado un compensador de perturbaciones dinámicas. Este artículo se centra principalmente en el diseño de compensadores contra perturbaciones además del diseño de controladores de retroalimentación de estado. Las matrices dinámicas del compensador cambian con los parámetros variables en el tiempo del LPV o sistema incierto durante la operación, asumiendo que las perturbaciones y los parámetros son medibles u observables. El compensador puede diseñarse para atenuar las perturbaciones/ruidos o para mejorar el seg Finalmente, se presentan resultados numéricos y de simulación para demostrar tanto la efectividad como el menor conservadorismo de los LMI propuestos.

Palabras clave: LPV feedforward; compensador de perturbaciones; control H∞; BRL dilatado; control robusto

check for updates

Cita: ˙ Inci, M.; Altún, Y. Diseño de compensador de perturbaciones Basado en LMI dilatada para lineal Sistemas de variación de parámetros. Electrónica 2024, 13, 3055. https://doi.org/10.3390/electrónica13153055

Editor académico: Luca Patanè

Recibido: 5 de julio de 2024
Revisado: 26 de julio de 2024
Aceptado: 29 de julio de 2024
Publicado: 1 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Los sólidos análisis de rendimiento de los sistemas LPV, que son una clase especial de sistemas no lineales, y de sistemas lineales con incertidumbres paramétricas variables en el tiempo (TVPU, por sus siglas en inglés) han llamado considerable atención. Durante las últimas dos décadas, se han propuesto muchos LMI basados en los criterios de estabilidad de Lya-punov para estos sistemas, ya que la eficiencia de los métodos basados en LMI es bien conocida, como en [1–4]. La mayoría de ellos se basan en la función de Lyapunov cuadrática estándar conocida como estabilidad cuadrática, donde se utiliza una única función de Lyapunov cuadrática como en [5]. Por ejemplo, en [6] se realiza una comparación numérica en términos del carácter conservador de las condiciones de estabilidad cuadrática . Sin embargo, muchos estudios han demostrado que una matriz de Lyapunov dependiente de parámetros (PDLM) supera el carácter conservador derivado de una única función de Lyapunov cuadrática para sistemas como los de [6-13]. Sin embargo, no es apropiado para sistemas LPV o el sistema de tiempo continuo (CTS) bajo TVPU sin un método adicional, ya que el PDLM o LMI parametrizado (PLMI) causa un problema de optimización no convexa. Sin embargo, el PDLM disminuye el conservadurismo que surge de las condiciones de estabilidad cuadrática. Para abordar este problema, se han propuesto algunos enfoques, como el método de cuadrícula [14], el procedimiento s [15], el método de convexidad múltiple [15,16] y los métodos en [17,18]. Sin embargo, el método de la cuadrícula es válido sólo para condiciones de operación locales contrarias a las trayectorias de Además, los otros enfoques implican condiciones LMI adicionales, algunas restricciones o complejidad aparte de las LMI existentes para obtener una solución convexa cuando se utiliza el PDLM. Además, estos enfoques no permiten el diseño de sistemas de control multipropósito.

Machine Translated by Google

en [12]. Además, un controlador de retroalimentación de estado diseñado utilizando los métodos depende de una función de Lyapunov que está restringida por la propiedad simétrica.

Recientemente, para proporcionar un menor conservadorismo para sistemas inciertos y LPV, se han investigado matrices de Lyapunov dependiendo de los parámetros o PLMI sin condiciones LMI adicionales. En consecuencia, se ha sugerido que los LMI "dilatados" o "extendidos" para abordar problemas no convexos y han sido muy populares en las últimas dos décadas. Las variables S y los LMI con variables de holgura (SV-LMI) también se conocen ya que las variables de holgura se utilizan generalmente para los LMI [19]. El beneficio de los LMI dilatados es que se obtienen resultados conservadores más bajos para conjuntos de parámetros muy grandes, ya que no contienen la multiplicación de la matriz de Lyapunov con las matrices de espacio de estados del sistema en contraste con los LMI comunes como en [5]. Este caso también nos permite comprobar el rendimiento robusto o la estabilidad, y se obtiene una formulación LMI convexa para los sistemas debido a la separación. Además, los LMI dilatados han sido herramientas valiosas para diseñar controladores multiobjetivo con menor conservadorismo, como en [20]. En resumen, el enfoque LMI dilatado presenta una solución convexa y resultados conservadores más bajos para el LPV o sistemas lineales inciertos sin condiciones adicionales a pesar del PDLM, lo que conduce a LMI no convexos o infinitos en diseños comunes. Por ejemplo, en [8,21] se propone una condición de estabilidad , pero no se aborda un diseño de control H∞ . En [20], se presenta un beneficio obvio de los LMI dilatados sobre los LMI clásicos para diseñar controladores de estabilidad H2/D multiobjetivo , pero esta formulación no puede extenderse a la síntesis de control H∞ . En [22], se propone el control de H2 mediante una variable de holgura, pero no se aborda el control de H∞ . En [23], se proponen condiciones de LMI dilatadas conservadoras más bajas bajo parámetros que varían racionalmente, pero no son apropiadas para un CTS con sistemas TVPU y LPV. Aparte de estos estudios, las mejoras para el control de retroalimentación del estado en [24-31] mediante el uso de LMI dilatados son más notables en la literatura en términos de conservadurismo y/o simplicidad. Estos estudios son menos conservadores que el diseño del controlador de retroalimentación de estado estándar en [1]. Sin embargo, ninguno de ellos es completamente apropiado para sistemas LPV y CTS bajo TVPU, mientras que están mejorados para CTS bajo incertidumbres paramétricas invariantes en el tiempo (TIPU). Además, el LMI dilatado propuesto supera al TIPU en términos de conservadorismo. En consecuencia, este tema específico todavía está abierto en la literatura, especialmente para los CTS con sistemas TVPU y LPV. Por lo tanto, la primera contribución de este trabajo es que se propone un nuevo BRL dilatado para sistemas LPV y CTS con TVPU. Posteriormente, esto se amplía para res Por tanto, se obtienen resultados menos conservadores para los sistemas LPV o el CTS con TVPU según los resultados existentes en la literatura.

Los compensadores o controladores de avance se utilizan para rastrear la señal de referencia o atenuar las perturbaciones externas o internas, que en su mayoría son predecibles o medibles como en [32,33]. El rendimiento del sistema mejora gracias a una señal de control adicional generada de acuerdo con las perturbaciones medidas o los valores de referencia. En particular, se han realizado compensadores de perturbaciones para muchos sistemas, como en [34]. Se utiliza un compensador de perturbaciones junto con un controlador de retroalimentación como en [35,36], porque el diseño de retroalimentación garantiza la estabilidad de la planta. Sin embargo, el compensador no proporciona estabilidad al sistema inestable. Hay dos métodos principales. La primera es que están diseñados simultáneamente como en [37,38]. Para el segundo, previamente se logra un cierto rendimiento con el controlador de retroalimentación, y luego se diseña la parte de feedforward como en [39]. Este artículo se basa en el segundo enfoque. Se han presentado muchos compensadores o controladores anticipados para sistemas LTI como los de los estudios anteriores. Hay algunos trabajos mediante el método H∞ , especialmente para sistemas LPV, como en [40-45]. En [40], se ha diseñado un controlador H∞ , de orden reducido, para abordar las perturbaciones del sistema de vibración.
En [41], se ha abordado el diseño de un controlador dinámico H∞ feedforward obteniendo el sistema inverso. En [42], se ha presentado un control anticipativo robusto conmutado para una clase de sistemas lineales inciertos definidos en una forma clásica de transformación lineal fraccionaria.
Sin embargo, ninguno de ellos es apropiado para sistemas LPV. En [43,44], se utilizan diseños de alimentación anticipada LPV estáticos , pero no son controladores dinámicos. Se ha diseñado un controlador dinámico de avance para sistemas LPV en [45], pero existen muchos LMI porque algunos LMI adiciona

Machine Translated by Google

Se necesitan condiciones debido a la no convexidad del uso del PDLM. además, el
Los LMI se basan en un BRL común, por lo que son algo conservadores debido a la
multiplicación de la matriz de Lyapunov. Por lo tanto, rara vez se ha discutido el controlador anticipado o
compensador basado en la ganancia L2 , especialmente para sistemas LPV. Además,
En lo anterior no se ha utilizado un diseño de controlador dinámico anticipado o compensador.
estudios, logrando las ventajas del LMI dilatado. Por lo tanto, la segunda contribución
de este artículo es el uso de un compensador de alimentación anticipada LPV dinámico basado en una ganancia L2
diseño del controlador para lograr las ventajas del enfoque LMI extendido, que según
hasta el momento no se ha informado en la literatura. En [45], que está más cerca
Según este artículo, el estudio es bastante complejo debido a la aparición de infinitos LMI. En
Además, el diseño se basa en el estándar BRL, lo que produce resultados más conservadores.

En resumen, en este estudio se proponen soluciones basadas en LMI no iterativos para diseñar
un controlador de retroalimentación de estado LPV y un compensador dinámico de retroalimentación LPV. Ellos son
conveniente tanto para LPV como para CTS con TVPU (sistemas lineales con incertidumbre paramétrica).
Las principales contribuciones del artículo son las siguientes:

(1) Se propone un BRL dilatado basado en un LMI no iterativo para el CTS con TVPU y
Sistema LPV al proporcionar las ventajas de un LMI dilatado y variable flojo. Entonces un
El nuevo controlador de retroalimentación de estado está diseñado sobre la base de un nuevo BRL equivalente. Con
respecto a su superioridad, tiene el mejor resultado entre estudios recientes en [5,24–30] en
vista de que es menos conservador como se muestra en la Tabla 1, y aproximadamente un 10%
Se ha logrado una mejora a partir del mejor resultado entre ellos.

(2) Todas las soluciones propuestas no necesitan condiciones LMI adicionales como en [45] debido
al BRL dilatado propuesto incluso si se utiliza el PDLM, lo que conduce a LMI no convexos o infinitos. Son
más simples y menos conservadores que los comunes.
enfoques en la literatura y menos conservadores que estudios similares en la literatura como se demuestra
mediante pruebas numéricas. Por lo tanto, los LMI proporcionan simplicidad y
menor conservadorismo.

(3) Se propone un compensador dinámico LPV feedforward basado en el BRL dilatado
para sistemas LPV con perturbaciones o ruidos medibles u observables. Por lo tanto,
el compensador trabaja en línea con las incertidumbres paramétricas variables en el tiempo de
sistemas inciertos o los parámetros que varían en el tiempo para los sistemas LPV.

Tabla 1. Comparaciones de los γmin alcanzados.

	[5]	[24]	[25]	[26]	[27]	[28]	[29]	[30]	Teorema propuesto 1
γmín	1,557	1,498	1,478	1,476	1,251	1,241	1,240	1,241	1.118

2. Preliminares

En esta sección se dan algunas definiciones y lemas para arrojar luz sobre la propuesta
Lema y teoremas.

Definición 1. El sistema descrito en (1) se denomina sistema LPV. Aquí, x(t) nw representa
los estados, u(t) nu representa las señales de entrada de control, z(t) nz representa las señales controladas
salidas, y(t) ny representa las salidas medidas, ω(t) nw representa las perturbaciones
y todas las matrices tienen un tamaño apropiado y dependen de que los parámetros α cambien con el tiempo.
Los conjuntos de parámetros están definidos por (2) donde ΔR y ΔD denotan los conjuntos de parámetros para α y
su derivada, respectivamente. Además, la matriz A(α) es la matriz de estados que define la
relación entre el estado actual y su tasa de cambio, B1(α) es la matriz de entrada de perturbación ,
B2(α) es la matriz de entrada de control, C1(α) es la matriz que relaciona el vector de estado x(t) con el
salidas controladas z(t), D11(α) es la matriz de avance para la entrada de perturbación ω(t) directamente
Al vincular la entrada de perturbación ω(t) a la salida controlada z(t), D12(α) es la matriz de avance
para la entrada de control u(t) que vincula directamente la entrada de control a la salida controlada z(t), C2(α) es
la matriz de salida medida que define la relación entre el estado y la salida medida.

Machine Translated by Google

En otras palabras, D21(α) es la matriz anticipada para la entrada de perturbación que vincula directamente la entrada de perturbación ω(t) con la salida medida y(t) y D22(α) es la matriz anticipativa para la entrada de control u(t) que vincula directamente la entrada de control a la salida medida y(t).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\alpha(t))x(t) + B1(\alpha(t))\omega(t) + B2(\alpha(t))u(t) \\ z(t) &= C1(\alpha(t))x(t) + D11(\alpha(t))\omega(t) + D12(\alpha(t))u(t) \\ y(t) &= C2(\alpha(t))x(t) + D21(\alpha(t))\omega(t) + D22(\alpha(t))u(t) \end{aligned} \tag{1}$$

$$\Delta R = \{\alpha : \alpha_i \le \alpha_i \le \overline{\alpha}_i, \quad i = 1, \ldots, n\}, \quad \Delta D = \{\alpha : \dot{\alpha}_i \le \dot{\alpha}_i \le \overline{\dot{\alpha}}_i, \quad i = 1, \ldots, n\} \tag{2}$$

Además, la forma de circuito cerrado del sistema se puede escribir como en (3) donde Z indica las salidas z e y. Además, las matrices A, B, C y D se consideran matrices de bucle cerrado.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\alpha(t))x(t) + B(\alpha(t))\omega(t) \\ Z(t) &= C(\alpha(t))x(t) + D(\alpha(t))\omega(t) \end{aligned} \tag{3}$$

Se supone que los parámetros están disponibles en línea (medibles o computables). Además, los parámetros se derivan de los estados del sistema no lineal, aunque normalmente parece un sistema incierto. Si los parámetros no se derivan de estados, a diferencia de los del sistema LPV, (1) es el sistema lineal bajo incertidumbres variables en el tiempo como en el Ejemplo 1.

La norma H∞ para el sistema en (3) se puede calcular mediante la formulación LMI común dada por el Lema 1, que se conoce bien como BRL en la literatura. En consecuencia, para a (0 ∞ es un escalar positivo índice de desempeño mediante (4), donde ω(t) L perturbación exógena. $\frac{q}{2}\gamma$, definimos el

$$J(\omega, z) = \int_0^t z^T z - \gamma^2 \omega^T \omega \, d\tau \tag{4}$$

Lema 1. Sea G(α) la matriz de transferencia estable del sistema LPV en (3) para todos los I − DT (α)D(α) trayectorias de parámetros. Si y sólo si las $\dot{\alpha}^2 \le 0$ admisibles, $\|G(s)\|_\infty$ γ y los siguientes α Δ D. declaraciones γ son equivalentes para todos (α) ΔR y

(i) Si existe una matriz simétrica diferenciable definida positiva P(α) n×n , entonces

$$\begin{aligned} &A^T(\alpha)P(\alpha) + P(\alpha)A(\alpha) + \dot{P}(\alpha) + C^T(\alpha)C(\alpha) \\ &+ B^T(\alpha)P(\alpha) + D^T(\alpha)C(\alpha) \quad {}^T\!\left(\gamma^2 I - D^T(\alpha)D(\alpha)\right)^{-1} B^T(\alpha)P(\alpha) + D^T(\alpha)C(\alpha) \le 0 \end{aligned} \tag{5}$$

(ii) Si existe una matriz simétrica diferenciable definida positiva P(α) n×n , entonces

$$\begin{bmatrix} A^T(\alpha)P(\alpha) + P(\alpha)A(\alpha) + \dot{P}(\alpha) & P(\alpha)B(\alpha) & C^T(\alpha) \\ B^T(\alpha)P(\alpha) & -\gamma^2 I & D^T(\alpha) \\ C(\alpha) & D(\alpha) & -I \end{bmatrix} \le 0 \tag{6}$$

Observación 1. Los LMI como los de (6) no son convenientes para diseñar controladores para sistemas lineales con parámetros inciertos politópicos o de tipo afín o sistemas LPV ya que la desigualdad implica la multiplicación de la matriz de Lyapunov por las matrices de la planta. Por lo tanto, este asunto da como resultado una optimización no convexa y LMI infinitos. Sin embargo, se han sugerido algunos métodos para eliminar esta dificultad, como el método de cuadrícula [14], el procedimiento s [15], el método de multiconvexidad [11] y los métodos en [17,18]. Sin embargo, el método de multiconvexidad y el procedimiento s dan como resultado muchos LMI, y el método de cuadrícula solo es válido para condiciones de operación locales a diferencia de trayectorias de todos los parámetros admisibles. Además, tales técnicas no permiten el diseño de un controlador multipropósito en [12]. El uso de la función de Lyapunov independiente de los parámetros (f

Machine Translated by Google

en (7) como en [5,41,46] es común, pero esto provoca resultados muy conservadores. Por el contrario, cuando la función de Lyapunov se aísla de las matrices de la planta mediante el uso de una variable de holgura, que generalmente se denomina enfoque LMI dilatado o extendido debido a la dimensión cada vez mayor del LMI, esto permite disminuir el conservadurismo para el análisis y el diseño, como en [23,24,27,31]. Por lo tanto, lograr una condición dilatada equivalente al BRL es un enfoque eficaz para superar esta complejidad en diseños de control robustos como H2 y H∞. En consecuencia, en el Lema 3 se propone una nueva notación para el cálculo de H∞ que incluye el TVPU para el diseño de controladores.

El LMI estándar en (7) derivado del Lema 1 se emplea generalmente para la ganancia L2 para sistemas o diseño H∞ ($K(\alpha) = R(\alpha)P^{-1}$ LPV en la literatura [5].

$$\begin{matrix} A^{t}(\alpha)P + B2R(\alpha) + (\quad)^{t} & B1(\alpha) & PCT_{1}(\alpha) + R^{T}(\alpha)DT_{12} \\ & yo - \gamma^{2} & DT\,11(\alpha) \\ & & -yo \end{matrix} \quad 0 \tag{7}$$

El siguiente Lema 2, que se basa en el lema de proyección, es útil para derivar los LMI dilatados.

Lema 2. [21]: Si existe una matriz simétrica Ω y matrices dimensionales compatibles Θ1, Θ2, entonces, las siguientes condiciones son equivalentes:

i. Ω < 0 y $\Omega + \Theta 1\Theta T + \Theta 2\Theta T$ ii. El siguiente $_{2}{}_{1} < 0$ problema LMI es factible de acuerdo con Q.

$$\begin{matrix} \Omega & \Theta 2 + \Theta 1Q \\ \Theta T_{2} + QT\Theta T_{1} & -Q - QT \end{matrix} \quad 0$$

3. Un nuevo lema real acotado y dilatado

En esta sección se propone un BRL dilatado para los sistemas LPV y incierto. En consecuencia, se mejora una solución basada en LMI para diseñar el controlador de retroalimentación de estado H∞ . El lema 3 muestra el BRL dilatado.

Lema 3. Sea G(α) la matriz de transferencia del sistema LPV en (3), entonces las siguientes dos afirmaciones son equivalentes.

i. Si y sólo si la matriz A(α) es estable para todas las trayectorias de parámetros admisibles y $D^{T}(\alpha)D(\alpha)$ $_{2\gamma} - I \quad 0$, el desempeño H∞ para el sistema en (3) está acotado de manera que el índice γ > 0. Por tanto, $G_{z\omega} \quad \infty \quad \gamma$.

ii. Si existe una matriz simétrica diferenciable positiva definida dependiente de parámetros $P(\alpha) \quad n\times n$, una constante positiva real μ que satisface $\dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \quad 0$ y una matriz dimensional compatible Q, entonces el problema LMI en (8) es válido para todos $\alpha \quad \Delta R$ y $\alpha \quad \Delta D$.

$$\begin{matrix} \dot{P}(\alpha) - 2\,\mu P(\alpha) & 0 & P(\alpha) + A^{t}(\alpha)Q + \mu Q & C^{t}(\alpha) \\ & yo - \gamma^{2} & B^{t}(a)Q & DT(\alpha) \\ & & -Q - QT & 0 \\ & & & -yo \end{matrix} \quad {}_{0} \tag{8}$$

Prueba del Lema 3. La forma LPV de la desigualdad en el enunciado i del Lema 1 es la siguiente.

$$\begin{matrix} A^{t}(\alpha)P(\alpha) + P(\alpha)A(\alpha) + \dot{P}(\alpha) + C^{t}(\alpha)C(\alpha) \\ + B^{t}(\alpha)P(\alpha) + D^{T}(\alpha)C(\alpha) \end{matrix} \quad {}^{t}{}_{2\gamma}\, Yo - D^{T}(\alpha)D(\alpha)^{-1} B^{t}(\alpha)P(\alpha) + D^{T}(\alpha)C(\alpha) \quad 0 \tag{9}$$

Machine Translated by Google

La desigualdad en (9) se modifica de la siguiente manera, cuando se incluye una variable real constante μ en la desigualdad.

$$\begin{matrix} A^{t}(\alpha) + \mu I\, P(\alpha) + P(\alpha)(A(\alpha) + \mu I) + C^{t}(\alpha)C(\alpha) + \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \\ + B^{t}(\alpha)P(\alpha) + DT(\alpha)C(\alpha) \quad \gamma^{2} Yo - DT(\alpha)D(\alpha) \quad B^{t}(\alpha)P(\alpha) + DT(\alpha)C(\alpha) \end{matrix} \quad 0$$

Utilizando el lema de Schur, se obtiene una nueva desigualdad matricial de la siguiente manera.

$$\begin{matrix} \Gamma 11(\alpha) & \Gamma 12(\alpha) \\ \Gamma 13(\alpha) & \Gamma 14(\alpha) \end{matrix} \quad 0$$

dónde

$$\begin{aligned} \Gamma 11(\alpha) &= A^{t}(\alpha) + \mu I\, P(\alpha) + P(\alpha)(A(\alpha) + \mu I) + C^{t}(\alpha)C(\alpha) + \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \\ \Gamma 12(\alpha) &= P(\alpha)B(\alpha) + C^{t}(\alpha)D(\alpha), \\ \Gamma 13(\alpha) &= B^{t}(\alpha)P(\alpha) + DT(\alpha)C(\alpha) \\ \Gamma 14(\alpha) &= DT(\alpha)D(\alpha) - \gamma^{2} I \end{aligned}$$

Podemos reescribir la desigualdad de la siguiente manera.

$$\begin{matrix} A^{t}(\alpha) + \mu I\, P(\alpha) + \begin{pmatrix} \end{pmatrix}^{t} & P(\alpha)B(\alpha) \\ B^{t}(\alpha)P(\alpha) \end{matrix} \quad 0 + \begin{matrix} C^{t}(\alpha)C(\alpha) + \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) & C^{t}(\alpha)D(\alpha) \\ DT(\alpha)C(\alpha) & DT(\alpha)D(\alpha) - \gamma^{2} I \end{matrix} \quad 0 \qquad (10)$$

Esto se reescribe de la siguiente manera.

$$\begin{matrix} C^{t}(\alpha)C(\alpha) + \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) & C(\alpha)\, TD(\alpha) \\ DT(\alpha)C(\alpha) & DT(\alpha)D(\alpha) - \gamma^{2} I \end{matrix} + \begin{matrix} A^{t}(\alpha) + \mu I & P(\alpha) \\ B^{t}(\alpha) & 0 \end{matrix} + \begin{matrix} P(\alpha) & 0 \\ A(\alpha) + \mu I & B(\alpha) \end{matrix} \quad 0 \qquad (11)$$

Luego podemos obtener la desigualdad (12) si aplicamos el Lema 2 a (11).

$$\begin{matrix} 11(\alpha) & 12(\alpha) & 13(\alpha) \\ & 22(\alpha) & 23(\alpha) \\ & & 33 \end{matrix} \quad 0 \qquad (12)$$

dónde

$$\begin{aligned} 11(\alpha) &= C^{t}(\alpha)C(\alpha) + \dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha), \\ 12(\alpha) &= C^{t}(\alpha)D(\alpha) \\ 13(\alpha) &= P(\alpha) + A^{t}(\alpha) + \mu I\, Q, \\ 22(\alpha) &= DT(\alpha)D(\alpha) - \gamma^{2} I \\ 23(\alpha) &= B^{t}(\alpha)Q, \quad 33 = -Q - QT \end{aligned}$$

Sin embargo, la expresión en el lado izquierdo de (11) debe ser definida negativa según el Lema 2. En consecuencia, reescribimos la expresión incluyendo $\dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \quad 0$ de la siguiente manera.

$$\dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \quad \begin{matrix} 0 \\ yo\ -\gamma^{2} \end{matrix} + \begin{matrix} C^{t}(\alpha) \\ DT(\alpha) \end{matrix} \quad Yo\ C(\alpha)\ D(\alpha) \quad 0$$

Por tanto, obtenemos la desigualdad (13) mediante el lema de Schur.

$$\dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \quad \begin{matrix} 0 & C^{t}(\alpha) \\ \gamma^{2} - & Yo\ DT(\alpha) \\ & -yo \end{matrix} \quad 0 \qquad (13)$$

Machine Translated by Google

Finalmente, obtenemos (8) si aplicamos el lema de Schur después de reescribir la desigualdad (12) como el siguiente formulario. Además, la condición (8) cubre también la condición (13).

$$\dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \quad 0 \qquad P(\alpha) + A^{t}(\alpha)Q + \mu Q \quad C^{t}(\alpha) \quad \gamma^{-2} \quad B^{t}(a)Q \quad + \quad D^{T}(\alpha) \quad C(\alpha)\ D(\alpha) \quad 0 \quad 0 \quad -Q - Q^{T} \quad 0 \quad I$$

Por tanto, la prueba está completa. □

Todos los diseños se pueden utilizar para parámetros de tipo politópico o de tipo afín mediante algunas regulaciones. Sin embargo, en los ejemplos de este artículo se utilizan parámetros variables de tipo afín y, por lo tanto, todas las matrices que varían en el tiempo cambian afínmente, como la matriz de Lyapunov en (14). Por lo tanto, se obtiene estabilidad cuadrática afín en todo el artículo como en [11].

$$P(\alpha) = P0 + \sum_{i=1}^{nolo} \alpha_i P_i \,, \quad \dot{P}(\alpha) = \sum_{i=1}^{nolo} \dot{\alpha}_i P_i \tag{14}$$

Teorema 1. Sea el sistema LPV en (1) con el parámetro variable en el tiempo establecido en (2). Si existe un escalar real positivo μ que satisface $\dot{L}(\alpha) - 2\mu L(\alpha) \quad 0$, la matriz diferenciable definida positiva simétrica $L(\alpha)$ con las matrices de dimensiones compatibles R, $F(\alpha)$, entonces el LMI en (15) es válido para $\dot{\alpha} \quad \Delta R$ y $\dot{\alpha} \quad \Delta D$. Por lo tanto, existe un controlador H_∞ de realimentación de estado $K(\alpha) = F(\alpha)R^{-1}$

$$\dot{L}(\alpha) - 2\,\mu L(\alpha) \quad 0 \qquad L(\alpha) + A(\alpha)R + B2F(\alpha) + \mu R \quad B1(\alpha) \quad -R - R^{t} \quad \gamma^{-2} \quad C1(\alpha)R + D12F(\alpha) \quad D11(\alpha) \quad 0 \quad -I \quad 0 \tag{15}$$

Prueba del Teorema 1. Obtuvimos las matrices en lazo cerrado en (16) como en (17) cuando se sustituye el controlador u = K(α)x en el sistema (1) donde se elimina la salida y(t) ya que se considera retroalimentación estatal.

$$\begin{aligned} \dot{x}cl(t) &= Acl(\alpha(t))xcl(t) + Bcl(\alpha(t))\omega(t), \\ zcl(t) &= Ccl(\alpha(t))xcl(t) + Dcl(\alpha(t))\omega(t) \end{aligned} \tag{dieciséis}$$

$$\begin{aligned} Acl(\alpha) &= A(\alpha) + B2K(\alpha),\ Bcl(\alpha) = B1(\alpha), \\ Ccl(\alpha) &= C(\alpha) + D12K(\alpha),\ Dcl(\alpha) = D11(\alpha) \end{aligned} \tag{17}$$

Si las matrices del espacio de estados en (17) se reemplazan en (8), obtenemos la siguiente desigualdad.

$$\dot{P}(\alpha) - 2\mu P(\alpha) \quad 0 \qquad P(\alpha) + Q^{T}(A(\alpha) + B2K(\alpha)) + \mu Q^{T} \quad QTB1(\alpha) \quad -Q - Q^{T} \quad \gamma^{-2} \quad C(\alpha) + D12K(\alpha) \quad D11(\alpha) \quad 0 \quad -I \quad 0$$

Sin embargo, existen multiplicaciones de matrices desconocidas. Para obtener el LMI, aplicamos la transformación de congruencia a la desigualdad multiplicando la transpuesta de (18) y (18), respectivamente . Así, se obtiene (15), donde $L(\alpha) = Q^{-T}P(\alpha)Q^{-1}$, $\dot{L}(\alpha) = Q^{-T}\dot{P}(\alpha)Q^{-1}$, $\dot{Q}^{-1}$, $F(\alpha) = K(\alpha)R$. Por tanto, la $\dot{R} = \text{diagnóstico}\ Q^{-1}$ prueba está completa. □

$$\dot{Q}^{-1}, \quad \dot{q}^{-1}, \quad I \tag{18}$$

Observación 2. La solución propuesta ofrece tres ventajas importantes. Primero, contrariamente a (7), la matriz de Lyapunov puede tener la forma de una matriz dependiente de parámetros sin enfoques adicionales como

Machine Translated by Google

como el procedimiento s, la cuadrícula y la multiconvexidad, lo que reduce el conservadurismo. En segundo lugar, contrariamente al diseño común como en (7) en [5], la ganancia del controlador es independiente de la matriz de Lyapunov, que está restringida por la propiedad simétrica. En cambio, cambia con una matriz no simétrica R para el LMI propuesto en el Teorema 1. En tercer lugar, la variable de holgura real μ produce resultados factibles incluso para rangos grandes de parámetros porque un gran aumento en el rango afecta menos el valor de rendimiento de γ que valores similares en términos de viabilidad y rendimiento, como se demuestra en los resultados numéricos.

Si consideramos CTS con TVPU, podemos cambiar fácilmente el LMI para el diseño de controlador independiente de parámetros (estático o fijo) como en el Teorema 1, suponiendo que los parámetros inciertos son desconocidos en el momento del diseño y no se conocen mediante medición en línea, pero se sabe que son encerrado. Por lo tanto, algunas matrices se convierten en matrices dependientes de parámetros, mientras que otras matrices se convierten en matrices independientes de parámetros para obtener la forma del LMI. Además, el teorema se puede utilizar para parámetros o incertidumbres variables en el tiempo de tipo afín o politópico mediante la elaboración de algunas regulaciones. Sin embargo, a lo largo de este artículo se consideran parámetros de tipo afín que varían en el tiempo para los diseños. Se han realizado dos ejemplos numéricos para el controlador de retroalimentación de estado propuesto. Todos los cálculos numéricos se realizaron mediante el analizador Yalmip [47] y el solucionador Sedumi [48], que se utilizaron en una PC (CPU de 2 núcleos a 2,8 GHz con 4 GB de RAM). El ejemplo 1 presenta un diseño de controlador para el CTS con TIPU, mientras que el ejemplo 2 presenta un control de ganancia programada para el CTS con TVPU.

Ejemplo 1. Se aborda el controlador de retroalimentación de estado para el satélite en [25,49] . El sistema surge de dos cuerpos rígidos unidos por un vínculo flexible. El sistema es como en (19). Los parámetros inciertos se modelan como amortiguación f y resorte k. El rango de k es [0,09 0,4] mientras que el rango de f es [0,0038 0,04]. Los desempeños de los métodos en [5,24-30] y la solución propuesta en el Teorema 1 se comparan en términos de nivel γ , que está directamente relacionado con la conservatividad. Las derivadas de los parámetros son cero; es decir, las incertidumbres no son diferenciables.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k & k & -f & f \\ k & -k & f & -f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \omega + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, \quad z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega + \begin{bmatrix} 0 \\ 0{,}01 \end{bmatrix} u \tag{19}$$

La Tabla 1 muestra los valores mínimos de γ para los resultados en [5,24–30] y la solución propuesta en el Teorema 1 para este ejemplo. Los resultados indican que la solución propuesta tiene resultados mucho mejores que los de los otros métodos. La ganancia de retroalimentación de la solución común es K = −105 [6.1116 44.042 1.1054 81.096], mientras que la de la solución propuesta es K = −[205.82 2224.6 58.393 2850.9]. La superioridad de la solución propuesta es que es menos conservadora que [5,24–30], como en la Tabla 1. Además, la Figura 1a muestra la relación entre μ y γ. El nivel γ casi nunca se ve afectado por cambios en μ después de un cierto valor para este sistema. Además, el Teorema 1 propuesto tiene el mejor resultado incluso si μ está entre 2,5 y 35, como se muestra en la Figura 1a.

Observación 3. La solución propuesta para el control robusto H∞ se puede usar para el CTS con TVPU obteniendo ventajas de las variables LMI dilatadas/holgura, pero las otras soluciones en [5,24–30] solo se pueden usar para el CTS con TIPU . Además, el LMI no es iterativo. Por lo tanto, la solución LMI dilatada no iterativa incluye tanto TIPU como TVPU al proporcionar las ventajas de la LMI dilatada Su existencia no ha sido reportada en la literatura. En consecuencia, el Ejemplo 1 presenta un diseño de controlador para el CTS con TIPU, mientras que el Ejemplo 2 presenta un diseño de controlador para el CTS con

Machine Translated by Google

la TVPU. Finalmente, el Ejemplo 2 presenta sólo una comparación entre este documento y el estándar. método en [5] ya que los estudios en la Tabla 1, excepto el diseño estándar en [1], no son completamente válidos para la TVPU. Los rendimientos se prueban ampliando el conjunto incierto para el TVPU en el Ejemplo 2.

Ejemplo 2. En este ejemplo, el control LPV de programación de ganancia se diseña utilizando el teorema 1 para el sistema LPV generado aleatoriamente en (20) donde los rangos de los parámetros variables en el tiempo α_1 y α_2 son [0,01, 2] y [0,5, 1,5], respectivamente. Además, las tasas de variación de los parámetros $\dot{\alpha}_1$ y $\dot{\alpha}_2$ son [0, 3] y [0, 1], respectivamente.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & \alpha_1 & 0{,}8 \\ 0 & 0{,}2 & -\alpha_2 - 1 \\ 0{,}5 & \alpha_2 & 0{,}1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0{,}2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} \omega \text{ tú,}$$
$$z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \omega + \begin{bmatrix} 0 \\ 0{,}8 \end{bmatrix} \text{tu} \quad (20)$$

Como en la Tabla 2, la mejora aumenta sustancialmente a medida que aumenta el conjunto incierto. comparado con el conjunto común. Por ejemplo, el método disminuye el nivel γ a una velocidad de 78,59% para $\alpha_1 = [0{,}01 \cdot 50]$, $\alpha_2 = [0{,}1 \cdot 190]$.

Tabla 2. Valores de rendimiento γmin para TVPU.

	Valores γ								
	α1= [0,01 2], α2= [0,5 1,5]			α1= [0,01 5], α2= [0,1 19]			α1= [0,01 50], α2= [0,1 190]		
[5]	1.0280			6.3151			22.745		
Teorema 1	0,890 (μ = 3) 14,42% disminuyó			2,2466 (μ = 2,5) 64,42% disminuyó			4,869 (μ = 3,5) 78,59% disminuyó		
	Conjuntos de variables de holgura para mayor viabilidad								
Teorema 1	μ = (0, 9 × 105]			μ = (0, 8 × 105]			μ = (0, 8 × 105]		
	Número de iteraciones—Número de variables—Tiempo de resolución								
[5]	15	18	0,0174 s	28	18	0,126 s	49	18	0,215 s
Teorema 1	39	41	9,556 segundos	41	41	9,904 segundos	56	41	13.503 segundos

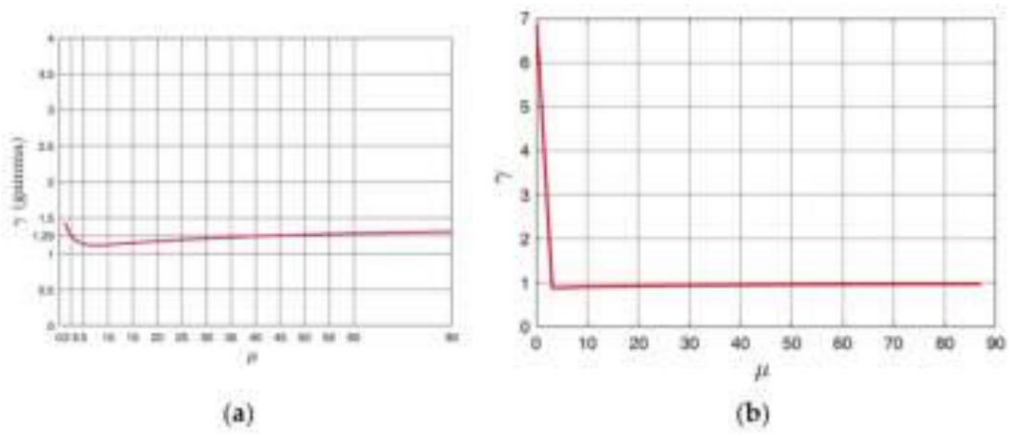


Figura 1. Relaciones entre el nivel γ y la variable de holgura: (a) Ejemplo 1; (b) Ejemplo 2.

Además, la relación entre μ y γ se muestra en la Figura 1b. Por lo tanto, el γ El nivel casi nunca cambia cambiando μ después de un cierto valor, por lo que su determinación es fácil de modo que la solución propuesta tenga mejor rendimiento que la solución común incluso si μ está entre 1 y 85.

Machine Translated by Google

Con referencia a esto, los resultados se obtienen para la solución propuesta en el Teorema 1 y el diseño común en [5], donde la matriz de Lyapunov es fija. Para α1 = [0,01 2], α2 = [0,5 1,5], el diseño común produce un nivel γ de 1,028, mientras que el método propuesto produce 0,890 para μ = 3. En consecuencia, las ganancias de retroalimentación del diseño estándar y del diseño en el Teorema 1 son K0 = 103 [−23.383 170.568 −269.482], K1 = [0.30251 −2.2045 3.4833], K2 = [0.11503 −0.84184 1.33] y K0 = [−12.17 74.915 −102.05], = [0,9135 −3,0938 3,5387], K2 = [5,306 −40,69 47,744], respectivamente. La relación entre μ y γ se muestra en la Figura 1b.

De los resultados, la solución LMI dilatada propuesta es menos conservadora que la LMI común en [5] para el diseño de programación de ganancias, aunque tiene desventajas que son un mayor número de iteraciones, número de variables y tiempo de resolución. La viabilidad se obtiene para el conjunto grande e incierto en la Tabla 2, y la variable de holgura μ proporciona resultados factibles para un conjunto grande (0, 8 × 105). Aunque el número de variables LMI aumentó de 18 a 41 según el estándar en [5], se ha logrado una mejora de hasta el 78,59%. Finalmente, se logra una buena mejora y resultados menos conservadores para la TVPU incluso si las LMI dilatadas son más costosas que las LMI estándar. hecho para la matriz de Lyapunov independiente de parámetros en [5]. Como se enfatiza en la Observación 1, si se usa PLDF, se usan métodos como el método de convexidad múltiple [11] y los métodos en [17,18] . Las variables de LMI y la complejidad de [5] aumentan sustancialmente. Por ejemplo, es necesario agregar otra condición de LMI del mismo tamaño. Por lo tanto, la condición de LMI propuesta se considera menos costosa ya que tiene una única condición de LMI.

Dos ejemplos han demostrado que la solución propuesta presenta resultados menos conservadores. Además, se puede utilizar completamente para el sistema LPV y el sistema incierto bajo TVPU, pero los demás no se pueden utilizar excepto para el LMI común en [5]. Por otro lado, los límites crecientes para las incertidumbres o parámetros que varían en el tiempo aumentan el carácter conservador de los LMI. Sin embargo, el diseño basado en el LMI propuesto logra resultados menos conservadores y más exitosos además de una estructura más simple.

4. Diseño de compensador de perturbaciones dinámicas para sistemas LPV

El diagrama de bloques del diseño del compensador de perturbaciones se muestra en la Figura 2 , donde NCF es el coeficiente o filtro de normalización. Aquí, el compensador dinámico de avance es como en (21).

$$\begin{aligned} . \; xc(t) &= Ac(\alpha)xc(t) + Bc(\alpha)\omega(t) \\ uc(t) &= Cc(\alpha)xc(t) + Dc(\alpha)\omega(t) \end{aligned} \tag{21}$$

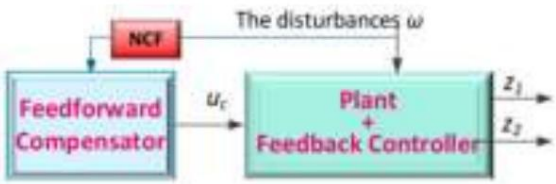


Figura 2. Diagrama de bloques del compensador de perturbaciones.

En consecuencia, el Teorema 2 presenta un diseño de compensador de perturbaciones dinámico de acuerdo con el LMI dilatado en el Lema 3.

Teorema 2. Sea un sistema LPV estable en (1) para todas las trayectorias admisibles de parámetros cuyo conjunto sea como en (2). Si existe un escalar real μ > 0, la matriz simétrica diferenciable definida positiva Y(α) y las matrices compatibles M, N(α), entonces los LMI en (22) y (23) con las definiciones en (24) se cumplen para (α) ΔR y (α) ΔD. En tal caso, a partir de (25) se obtiene un compensador dinámico H∞ anticipado en (21).

Machine Translated by Google

$$\begin{matrix} \Psi 11(\alpha) & \Psi 12(\alpha) & \Psi 13(\alpha) & \Psi 14(\alpha) \\ & \Psi 22(\alpha) & \Psi 23(\alpha) & \Psi 24(\alpha) \\ & & \Psi 33(\alpha) & \Psi 34 \\ & & & \Psi 44 \end{matrix} \quad 0 \tag{22}$$

$$Y(\alpha) = \begin{matrix} Y1(\alpha) & Y2(\alpha) \\ & Y3(\alpha) \end{matrix} \quad 0 \tag{23}$$

$$\begin{aligned} \Psi 11(\alpha) &= \begin{matrix} \dot{Y}1(\alpha) - 2\mu Y1(\alpha) & \dot{Y}2(\alpha) - 2\mu Y2(\alpha) \\ & \dot{Y}3(\alpha) - 2\mu Y3(\alpha) \end{matrix}, \\ \Psi 12(\alpha) &= \begin{matrix} 0 & Y1(\alpha) + R_1^t A^t(\alpha) + NT(\alpha)B_2^t + \mu R_1^t \\ 0 & Y1(\alpha) + R_1^t A^t(\alpha) + NT(\alpha)B_2^t + \mu R_2^t(\alpha) \end{matrix}, \\ \Psi 13(\alpha) &= \begin{matrix} Y2(\alpha) + MT(\alpha)R_1^t C_1^t(\alpha) + NT(\alpha)DT_{12} \\ Y3(\alpha) + MT(\alpha)R(\alpha)_1^t C_1^t(\alpha) + NT(\alpha)DT_{12} \end{matrix}, \\ \Psi 14(\alpha) &= \begin{matrix} R_1^t C_2^t + NT(\alpha)DT(\alpha) + \\ R_{12}^t C^t NT(\alpha)DT \end{matrix}_{22}, \Psi 22(\alpha) = \begin{matrix} Yo\ B1(\alpha) + DT_F(\alpha)B_2^t \\ -R1 - R_1^t \end{matrix}_{2-\gamma}, \\ \Psi 23(\alpha) &= \begin{matrix} B_F^t(\alpha) & DT\ 11(\alpha) + D_F^T(\alpha)DT_{12} \\ -R1 - R_2^t(a) & 0 \end{matrix}, \Psi 24(\alpha) = \begin{matrix} DT\ 21(\alpha) + D_F^T(\alpha)DT_{22} \\ 0 \end{matrix}, \\ \Psi 33(\alpha) &= \begin{matrix} -R2(\alpha) - R_2^t(\alpha), & 0 \\ -yo & \end{matrix}, \Psi 34 = \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix}, \Psi 44 = -I \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned} Ac &= M(\alpha)R_2^{-1}(\alpha),\ Bc(\alpha) = BF(\alpha), \\ Cc &= N(\alpha)R_2^{2-1}(\alpha),\ Dc = DF(\alpha) \end{aligned} \tag{25}$$

Prueba del teorema 2. El LMI en (8) se multiplica por la siguiente matriz y la transpuesta de la matriz del lado izquierdo-derecho, respectivamente, cuando aplicamos la transformación de congruencia.

$$\begin{matrix} Q\text{-}1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & yo & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q\text{-}1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & yo \end{matrix}$$

Por lo tanto, el siguiente LMI se adquiere según las definiciones de (27).

$$\begin{matrix} \dot{Y}(\alpha) - 2\mu Y(\alpha) & 0 & yo - \gamma^2 \\ Y(\alpha) + A(\alpha)R + \mu R & B(\alpha) & -R - R^t \\ C(\alpha)R & D(\alpha) & 0 \end{matrix} \quad -yo \quad 0 \tag{26}$$

$$Y(\alpha) = Q - TP(\alpha)Q^{-1},\ \dot{Y}(\alpha) = Q^{-T}\dot{P}(\alpha)Q^{-1},\ R = Q^{-1} \tag{27}$$

La forma del espacio de estados de ω(t) a Z(t) es como en (28) cuando el compensador en (21) se realiza en (1). Aquí, el vector Z representa las salidas z e y, el vector X representa los estados x en (1) y xc en (21) y ω es la señal de perturbación.

$$\begin{matrix} \dot{X}(t) \\ Z(t) \end{matrix} = \begin{matrix} Acl(\alpha) & Bcl(\alpha) \\ Ccl(\alpha) & Dcl(\alpha) \end{matrix} \begin{matrix} x(t) \\ \omega(t) \end{matrix} \tag{28}$$

En consecuencia, las matrices del espacio de estados en (28) se obtienen como en (29) con la realización. Por lo tanto, el controlador óptimo se logra minimizando la ganancia L2 de ω a Z.

$$\begin{aligned} Acl(\alpha) &= \begin{matrix} A(\alpha) & B2Cc(\alpha) \\ C.A & \end{matrix}, Bcl(\alpha) = \begin{matrix} B1(\alpha) + B2Dc(\alpha) \\ \text{Antes de Cristo} \end{matrix}, \\ Ccl(\alpha) &= \begin{matrix} C1(\alpha) & D12Cc(\alpha) \\ C2(\alpha) & D22Cc(\alpha) \end{matrix}, Dcl(\alpha) = \begin{matrix} D11(\alpha) + D12Dc(\alpha) \\ D21 + D22Dc(\alpha) \end{matrix} \end{aligned} \tag{29}$$

Machine Translated by Google

Definamos la matriz de Lyapunov como en (23), y la matriz R(ξ) se define como sigue.

$$R(\alpha) = \begin{matrix} R1 & R1 \\ R2(\alpha) & R2(\alpha) \end{matrix}$$

En consecuencia, si la matriz de Lyapunov Y(α) en (23), su derivada, la matriz R(α) y las matrices del espacio de estados en (29) se colocan en (26) en lugar de A(α), B(α) , C(α) y D(α), obtenemos una desigualdad matricial. Si algunas expresiones se definen como en (30), obtenemos el LMI en (22) con las definiciones en (24) y la demostración está completa. □

$$M(\alpha) = Ac(\alpha)R2(\alpha),\ N = Cc(\alpha)R2(\alpha),\ BF(\alpha) = Bc(\alpha),\ DF(\alpha) = Dc(\alpha) \quad (30)$$

Observación 4. Los LMI propuestos ofrecen cuatro ventajas significativas. Algunos se mencionan en la Observación 2. Principalmente, la matriz de Lyapunov se puede designar en la forma LPV, lo que reduce el conservadurismo, sin enfoques adicionales como cuadrícula, procedimiento s, multiconvexidad y las condiciones en [17,18]. Por ejemplo, existen muchos LMI en [45] ya que se utilizan condiciones de convexidad múltiple debido a estos productos. Además, los LMI se basan en el BRL común en (6), por lo que los LMI son algo conservadores debido a la multiplicación de la matriz de Lyapunov. Sin embargo, el BRL extendido propuesto es el mejor entre los disponibles, como se muestra en la Tabla 1. En segundo lugar, debido a los productos de matrices del sistema con una matriz de Lyapunov como en (6), se producen LMI infinitos y optimización no convexa, si la matriz de Lyapunov puede estar en formato LPV. Sin embargo, tal caso no ocurre con la formulación LMI propuesta en (8). Por tanto, queda claro que la solución propuesta es más sencilla.
En tercer lugar, los controladores LPV diseñados por PDLF como en [45,50] generalmente dependen de la derivada de la matriz de Lyapunov (matriz Ac(α) del controlador). Sin embargo, la operación derivativa causa problemas de ruido en aplicaciones prácticas en tiempo real. Los diseños propuestos no dependen de la derivada de la matriz de Lyapunov. Finalmente, las matrices controladoras no dependen de la matriz de Lyapunov, la cual está restringida por la condición simétrica en diseños comunes. En cambio, las matrices dependen de una matriz completa en los diseños propuestos. Además, tiene una estructura sencilla.

Observación 5. El compensador propuesto no incluye un controlador de retroalimentación. Es bien sabido que se aplica un método de retroalimentación para mejorar el rendimiento del seguimiento de referencia o eliminar la perturbación o el ruido, y no afecta la estabilidad, por lo que se necesita un controlador de retroalimentación. Sin embargo, algunas plantas, como muchos sistemas mecánicos y eléctricos, no necesitan un diseño de retroalimentación, ya que son sistemas estables. Por lo tanto, el compensador también se puede utilizar para sistemas estables con perturbaciones, además de sistemas estabilizados con un controlador de retroalimentación. Además, se puede utilizar para mejorar el seguimiento de referencia intercambiando señales de referencia en lugar de entradas de perturbación para los sistemas estabilizados con un controlador de retroalimentación. En consecuencia, se supone que los sistemas son estables o estabilizados con un controlador de retroalimentación para todos lo
Sin embargo, la estabilidad interna del controlador/compensador anticipativo LPV debe proporcionarse para todos los parámetros variables en el tiempo, como en los teoremas anteriores. De lo contrario, el sistema estable se vuelve inestable. Esta estabilidad se logra descomponiendo la matriz de Lyapunov sin necesidad de ningún método de estabilidad adicional para todos los teoremas propuestos.

5. Estudios de simulación

En este apartado se ha realizado un ejemplo numérico sobre el diseño del compensador. Todos los cálculos de optimización numérica se han realizado con Yalmip versión R20210331 [47] y Sedumi versión 1.30 [48], que se han utilizado en un PC (CPU de 2 núcleos a 2,8 GHz con 4 GB de Ram).

Ejemplo 3. Este ejemplo muestra el diseño del compensador LPV para el sistema LPV generado aleatoriamente en (31). Los parámetros variables en el tiempo α1(t) y α2(t) están acotados por (32). Aunque normalmente aparece como un sistema lineal indeterminado, se considera un sistema LPV asumiendo

Machine Translated by Google

que los parámetros medibles o computables son estados del sistema no lineal. Un sistema LPV se deriva de un sistema no lineal, a diferencia de un sistema lineal incierto.

$$x(t) = x(t) + \frac{1}{6}\begin{matrix} 1 + \alpha 1(t) & -3 - \alpha 1(t) \\ -4 - \alpha 2(t) & z(t) = 1\ 0{,}1\ x(t) + \end{matrix} \begin{matrix} 0{,}5 + \alpha 1(t) \\ 0{,}8 \end{matrix} \omega(t) + \begin{matrix} 0{,}2 \\ 0{,}1 \end{matrix} \text{Utah)}$$
$$y(t) = 1\ 0\ x(t) \quad (0{,}01)\omega(t) \tag{31}$$

$$0{,}1 \le \alpha 1(t) \le 0{,}7 \text{ con } -0{,}445 \le . \ \alpha 1(t) \le 1{,}82\ 1$$
$$\le \alpha 2(t) \le 5 \text{ con } -11{,}7 \le . \ \alpha 2(t) \le 2{,}295 \tag{32}$$

Cuando se analiza el sistema en vista de parámetros que varían en el tiempo, se obtienen los resultados de las Figuras 3 y 4 . Los diferentes parámetros que varían en el tiempo se prueban para el análisis en la Figura 3. Sin embargo, uno de ellos se usa para la simulación, que se encuentra en la Figura 3b. La Figura 3a solo se utiliza para análisis (diagrama de Bode y mapeo de polos) porque se supone que el cambio de parámetro es lineal. Normalmente, es poco probable que ambos parámetros varíen linealmente. El cambio de parámetro en la Figura 3b ocurre durante la simulación. El objetivo es observar las reacciones ante diferentes cambios paramétricos. Para el análisis, el diagrama de Bode del sistema se muestra en la Figura 4 con un tiempo de muestreo de 50 ms y un tiempo de muestreo de simulación de
La Figura 4a muestra el diagrama de Bode del sistema asumiendo los parámetros variables en el tiempo en la Figura 3a, mientras que la Figura 4b muestra el diagrama de Bode asumiendo los parámetros variables en el tiempo en la Figura 3b. La figura muestra que los parámetros que varían en el tiempo afectan fuertemente la no linealidad del sistema según los diagramas de Bode de las salidas de las entr
Según los diagramas de Bode, la perturbación es más efectiva a aproximadamente 3 a 6 rad/s.
Por lo tanto, las señales de prueba de perturbaciones tienen una frecuencia baja.

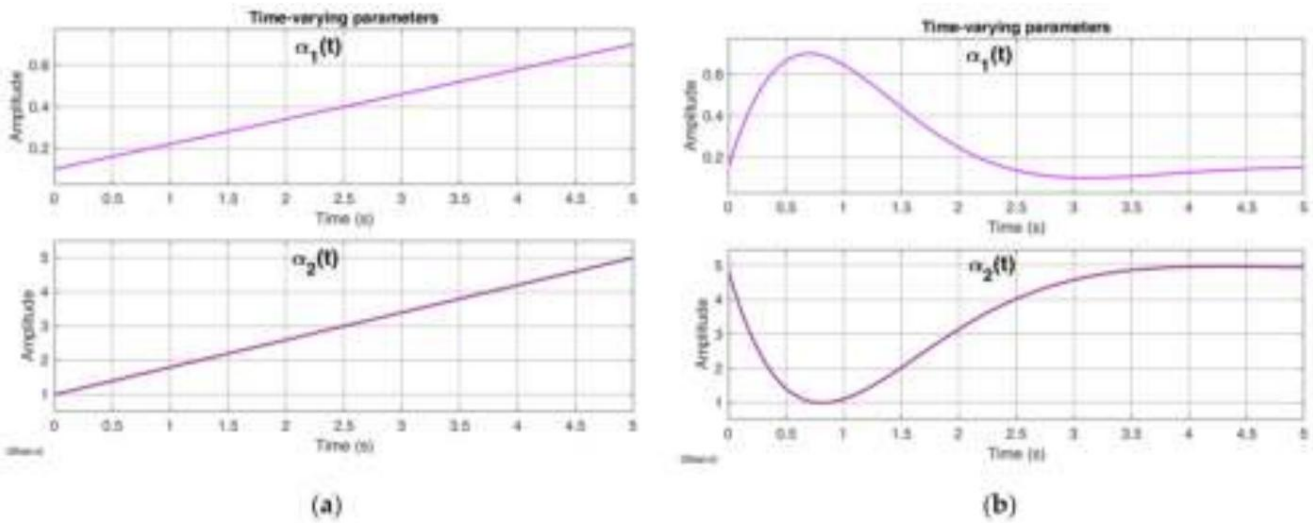


Figura 3. Los parámetros que varían en el tiempo para: (a) Análisis; (b) Análisis y simulación.

De manera similar, la Figura 5 presenta el mapa de polos del sistema para los diversos parámetros variables en el tiempo en la Figura 3b, donde el tiempo de muestreo es de 50 ms. Del mapa de polos se pueden deducir dos casos. Los polos de todas las matrices de transferencia del sistema se encuentran en la mitad izquierda del plano. Este caso confirma la estabilidad del sistema de acuerdo con todos los parámetros variables en el tiempo mencionados en la Observación 5. De lo contrario, el compensador no se puede aplicar ya que no afecta la estabilidad. La otra es que los parámetros afectan fuertemente al sistema.

Machine Translated by Google

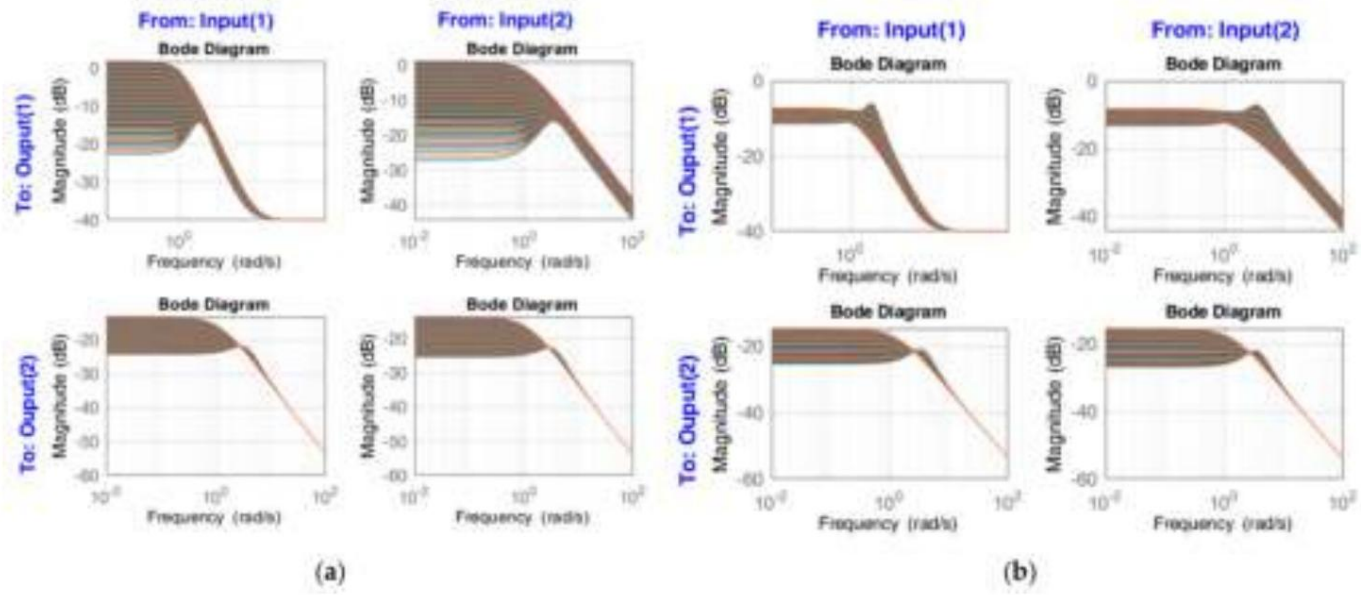


Figura 4. Diagramas de Bode del sistema para parámetros variables en el tiempo en: (a) Figura 3a; (b) Figura 3b.

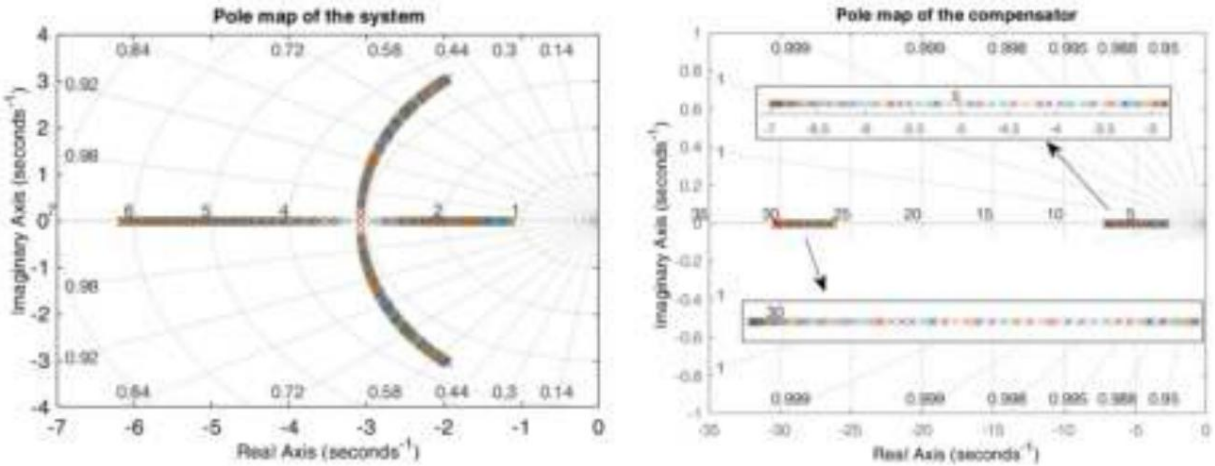


Figura 5. Mapas de polos del sistema y compensador.

Para el diseño, la Figura 6 muestra un diagrama de bloques esquemático para el diseño del compensador LPV donde Wu y Wz representan los filtros de ponderación de entrada y salida, respectivamente. Sin embargo, para este ejemplo se diseña un compensador apropiado sin estos filtros. Sin embargo, los filtros se pueden utilizar por motivos tales como limitaciones estructurales, como se menciona en la Observación 6.

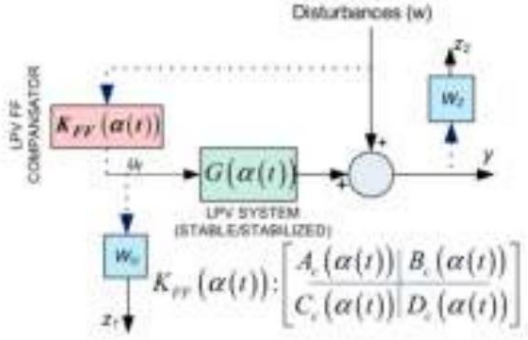


Figura 6. Diagrama de bloques del diseño del compensador LPV.

Machine Translated by Google

Observación 6. Las entradas y salidas están limitadas debido a la estructura mecánica/eléctrica. Por lo tanto, las restricciones deben considerarse según el problema del campo relacionado. Por ejemplo, la deflexión de la suspensión no debe exceder el límite superior, mientras que la deflexión de los neumáticos debe minimizarse tanto como sea posible para los sistemas de suspensión activa de vehículos. Existen algunos estudios basados en LMI sobre las restricciones de entrada y salida, como [51]. Estos se regulan con el NCF, como se muestra en la Figura 2. El NCF puede ser un coeficiente o un filtro, como un filtro de paso bajo, que se determina según el comportamiento del sistema considerando los límites de frecuencia y ganancia de las entradas y salidas. La otra forma son las funciones de ponderación de entrada y salida para el diseño del controlador H∞ como se muestra en la Figura 6 y el diagrama de bloques en [45]. Por lo tanto, se puede decidir por NCF considerando la estructura del sistema. En particular, puede ser necesario un filtro para NCF a alta frecuencia en lugar de un NC fijo. Esto se debe a que el compensador lo necesita para regular el límite del actuador a alta

Las matrices se obtienen en (33) cuando los LMI en el Teorema 2 se resuelven para minimizar el valor de γ según las variables dependientes de parámetros Yi , BFi, DFi, Mi , Ni para i = 0, 1, 2 y las variables independientes de parámetros. variables R1 y R2. Por lo tanto, las matrices en el espacio de estados del compensador LPV Aci, Bci, Cci y Dci en (21) para i = 0, 1 y 2 se obtienen afines a partir de las matrices en (33) de acuerdo con los parámetros variables en el tiempo α1(t) y α2(t) en (32) para todo t durante la operación en línea. Por lo tanto, (34) muestra las matrices del controlador LPV en el espacio de estados

$$
\begin{aligned}
&M0 = \begin{matrix} -163{,}81 & 12{,}724 \\ -1{,}7999 & -202{,}82 \end{matrix}, \quad M1 = \begin{matrix} 5{,}1074 & -22{,}914 \\ -11{,}194 & 36{,}474 \end{matrix},\\
&M2 = \begin{matrix} -10{,}704 & 16{,}627 \\ 15{,}009 & -84{,}506 \end{matrix}, \quad R1 = \begin{matrix} 7{,}1371 & -3{,}0487 \\ -20{,}361 & 92{,}818 \end{matrix},\\
&R2 = \begin{matrix} 7{,}139 & -3{,}0494 & -20{,}361 \\ 92{,}826 & N1 = -111{,}95 \end{matrix}, \quad N0 = -1175{,}1\ 1477{,}5,\\
&364{,}76\ -0{,}07727\ 0{,}51139, \quad N2 = -53{,}522\ 83{,}135\ 0{,}070224,\\
&BC0 = \begin{matrix} 0 & -0{,}46491 & 0 \end{matrix}, \quad BC1 = \begin{matrix} \end{matrix}, \quad BC2 = \begin{matrix} \end{matrix},\\
&DC0 = -3{,}3213,\ DC1 = -4{,}6489,\ DC2 = -0{,}0003355
\end{aligned}
\tag{33}
$$

$$
\begin{aligned}
Ac(\alpha1, \alpha2) &= \begin{matrix} -24{,}886 + 0{,}012541\alpha1 - 1{,}0907\alpha2 & -0{,}68047 - 0{,}24644\alpha1 + 0{,}14329\alpha2 \\ -7{,}1544 - 0{,}49361\alpha1 - 0{,}54525\alpha2 & -2{,}42 + 0{,}37671\alpha1 - 0{,}92828\alpha2 \end{matrix}\\
Bc(\alpha1) &= \begin{matrix} -0{,}07727 + 0{,}070224\alpha1 \\ 0{,}51139 - 0{,}46491\alpha1 \end{matrix}\\
Cc(\alpha1, \alpha2) &= -131{,}53 - 4{,}9366\alpha1 - 5{,}4537\alpha2\ \ 11{,}596 + 3{,}7674\alpha1 + 0{,}71644\alpha2\\
Dc(\alpha1, \alpha2) &= -2{,}8863 - 4{,}6489\alpha1 - 0{,}0003355\alpha2
\end{aligned}
\tag{34}
$$

En consecuencia, la Figura 7a muestra el diagrama de Bode del compensador para los parámetros variables en el tiempo en la Figura 3a, mientras que la Figura 7b lo muestra para los parámetros variables en el tiempo en la Figura 3b para un tiempo de muestreo de 50 ms. Según los mapas de polos y los diagramas de Bode, el compensador LPV cambia significativamente con los parámetros que varían en el tiempo.

Se determina que el valor de μ es 0,42 mediante línea en busca de una buena respuesta. En consecuencia , el valor del índice de desempeño γ es 0,037268. Este valor cambia claramente según el sistema y los filtros de entrada-salida. Proporciona viabilidad para parámetros muy grandes que varían en el tiempo, como se demuestra en ejemplos de diseño de controladores de retroalimentación de estado. La Figura 8a también muestra el diagrama de Bode del sistema combinado con el compensador desde la entrada de perturbación a las salidas z e y asumiendo los parámetros variables en el tiempo en la Figura 3a, mientras que la Figura 8b muestra el diagrama de Bode asumiendo los parámetros variables en el tiempo en la Fi

La Figura 9 muestra las señales de prueba de perturbación aplicadas para las simulaciones. Éstas son una señal de choque como se muestra en la Figura 9a; señal sinusoidal de 5 rad/s mostrada en la Figura 9b; y señal de ruido blanco que se muestra en la Figura 9c.

Machine Translated by Google

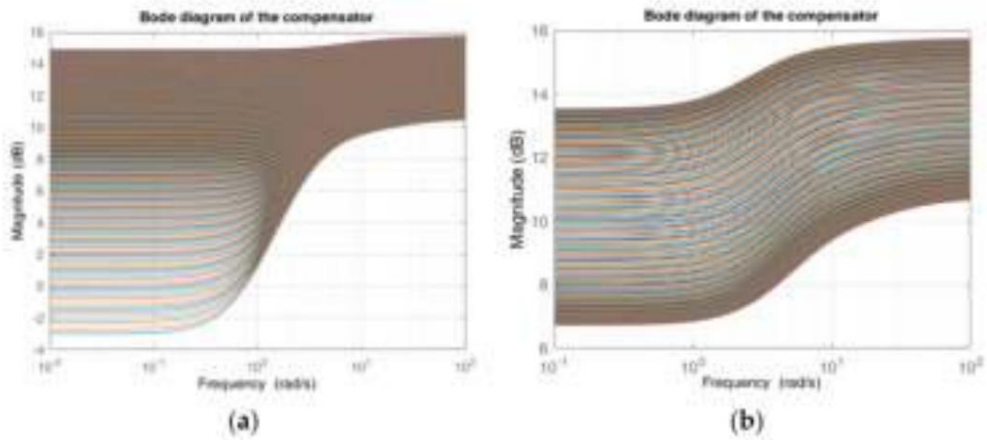


Figura 7. Diagramas de Bode del compensador para parámetros variables en el tiempo en: (a) Figura 3a; (b) Figura 3b.

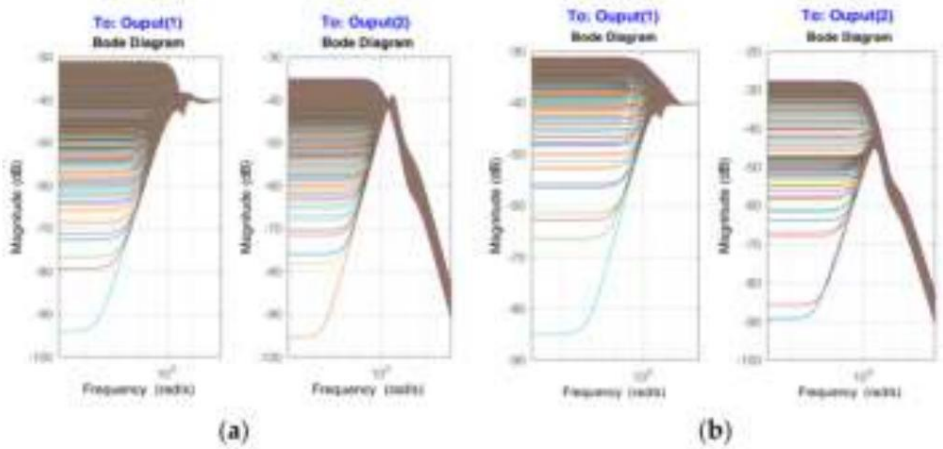


Figura 8. Diagramas de Bode del sistema con el compensador para parámetros variables en el tiempo en: (a) Figura 3a; (b) Figura 3b.

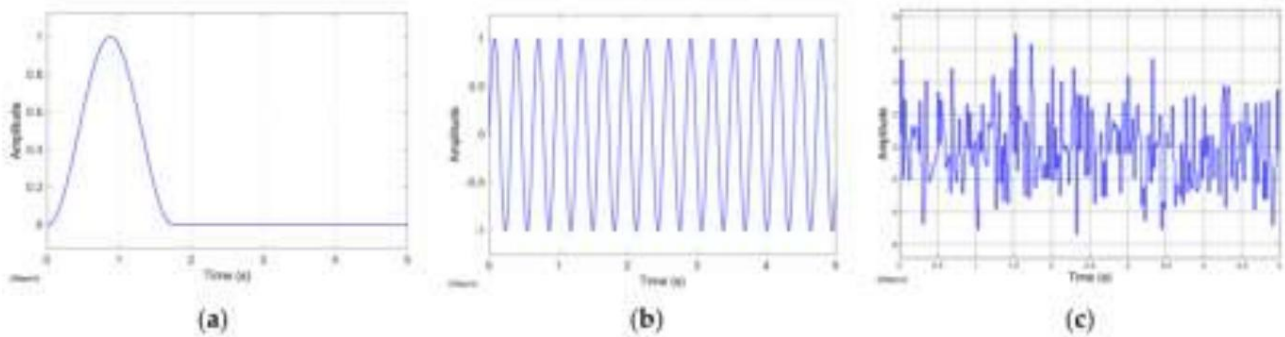


Figura 9. Perturbaciones de prueba aplicadas: (a) un golpe; (b) una señal sinusoidal de 5 rad/s; (c) una señal de ruido blanco.

En cuanto a los resultados, la Figura 10 muestra las salidas zey para la señal de perturbación externa en la Figura 9a . Como se ve en las salidas, el compensador LPV diseñado atenúa efectivamente la perturbación a una tasa de aproximadamente el 100 % en comparación con el caso sin el compensador.

Machine Translated by Google

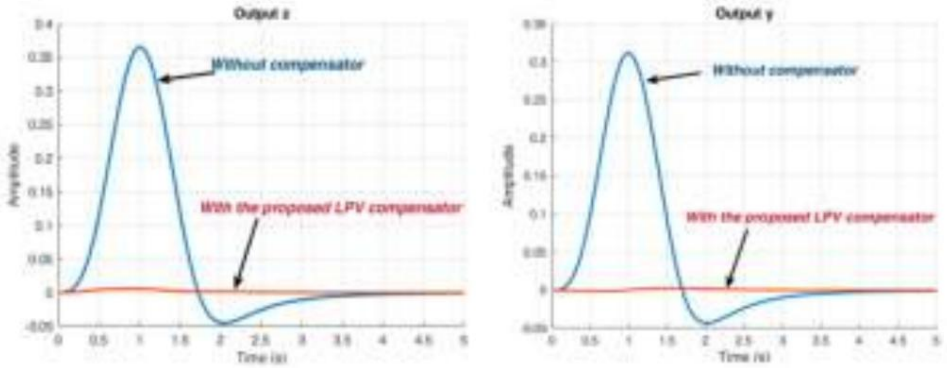


Figura 10. Las salidas zey para una señal de perturbación por golpe.

De manera similar, las Figuras 11 y 12 muestran las salidas z e y para las señales de prueba de perturbación en las Figuras 9b y 9c, respectivamente. Las señales generadas por el compensador dependiente de parámetros contra tres perturbaciones se muestran en la Figura 13.

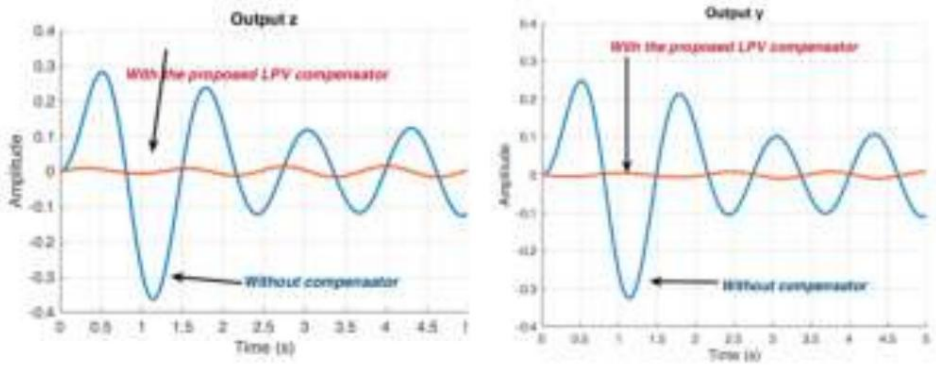


Figura 11. Las salidas zey para una perturbación sinusal de 5 rad/s.

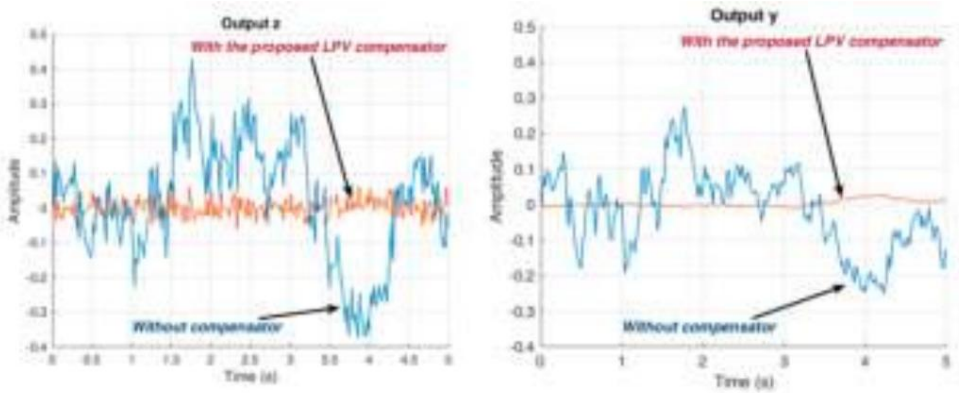


Figura 12. Las salidas zey para perturbación de ruido blanco.

El sistema con compensador anticipado LPV se compara con el sistema sin compensador. Cabe señalar que el sistema debe ser un sistema estable o estabilizado mediante un controlador de retroalimentación. Como se ve en los resultados de las Figuras 11 y 12, el compensador dependiente de parámetros es bastante exitoso, similar a los resultados de la Figura 10. Por lo tanto, los efectos de las perturbaciones externas se reducen casi al 100%. Por lo tanto, el compensador de alimentación LPV diseñado tiene un rendimiento significativo contra las perturbaciones. Finalmente, el diseño del compensador es bastante exitoso para el sistema LPV. Como resultado, el compensador propuesto tiene bastante éxito en el rechazo de perturbaciones medibles

Machine Translated by Google

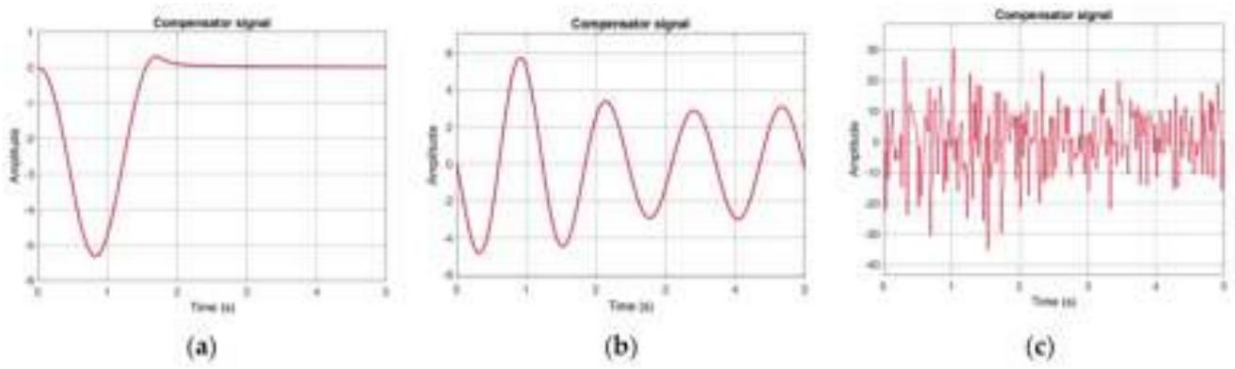


Figura 13. Las señales de fuerza generadas para: (a) una señal de choque; (b) una señal sinusoidal de 5 rad/s; (c) una señal de ruido blanco.

En el diseño del compensador LPV propuesto basado en el LMI dilatado, la matriz de Lya-punov se puede designar en la forma LPV, lo que reduce el conservadurismo, sin enfoques adicionales como cuadrícula, procedimiento s, multiconvexidad en [11] y las condiciones en [18,19]. Por ejemplo, existen muchas condiciones LMI para el diseño del controlador LPV en [45] ya que se utilizan condiciones de multiconvexidad debido a los productos A(α) × P(α) en (6). Por tanto, la solución propuesta es más sencilla y menos conservadora. De lo contrario, se necesitan solucionadores de desigualdad matricial bilineal (IMC) ineficientes o algoritmos LMI iterativos.
Las soluciones no requieren ningún algoritmo iterativo LMI o BMI.

6. Conclusiones y trabajos futuros

Este artículo se centra en un compensador anticipado contra perturbaciones además de un controlador de retroalimentación de estado para el sistema LPV. La matriz de Lyapunov se divide de las matrices del sistema inyectando una variable real holgada en los diseños basados en LMI; así se designa al PDLM. Por lo tanto, las formulaciones LMI propuestas tanto para el controlador de retroalimentación de estado como para el compensador anticipado son de dimensión finita y no necesitan condiciones adicionales como el procedimiento s, la cuadrícula y la multiconvexidad, incluso si se utiliza el PDLM. Por lo tanto, tienen una estructura más simple y un menor carácter conservador que los diseños similares de retroalimentación estatal y avance. Los resultados numéricos del controlador de retroalimentación de estado muestran que la solución es menos conservadora y más sencilla incluso para rangos de parámetros muy grandes. Especialmente para el compensador, los resultados de la simulación muestran que tanto los compensadores feedforward dependientes como los independientes de los parámetros tienen un rendimiento significativo contra las perturbaciones porque los efectos de las perturbaciones externas se eliminan casi por completo . Por lo tanto, la validez y las ventajas de los LMI propuestos se obtienen efectivamente con ejemplos numéricos y de simulación. Como resultado, las soluciones LMI propuestas son mejores para los sistemas en términos de simplicidad y conservación.

Para estudios posteriores, se puede considerar que el primero de ellos es la obtención del μ escalar real óptimo mediante métodos de optimización metaheurística. El segundo puede diseñar tanto un control de retroalimentación como un compensador anticipado al mismo tiempo para sistemas inestables. El tercero es el diseño de cambiar el compensador anticipado LPV a través del LMI dilatado. Además, este compensador de alimentación anticipada propuesto con un compensador de alimentación anticipada LPV conmutado se puede comparar con respecto a criterios como el rendimiento y la complejidad.

Contribuciones del autor: Conceptualización, M.˙ I. y YA; metodología, M.˙ I. y YA; software, M.˙ I. y YA; validación, YA; análisis formal, YA; investigación, M.˙ I. y YA; recursos, M.˙ I.; curación de datos, M.˙ I.; escritura—preparación del borrador original, M.˙ I.; redacción: revisión y edición, YA; visualización, M.˙ I. y YA; supervisión, YA Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de disponibilidad de datos: las contribuciones originales presentadas en el estudio se incluyen en el artículo; más consultas pueden dirigirse al autor correspondiente.

Machine Translated by Google

Conflictos de intereses: El autor Mustafa ˙ Inci fue empleado de la empresa Volta Motor Industry and Trade Inc. Los autores restantes declaran que la investigación se realizó en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un posible conflicto de intereses.

Referencias

1. Kim, C. Control robusto de retroalimentación de salida estática H∞ para enrutadores TCP/AQM basado en optimización LMI. Electrónica 2024, 13, 2165. [Referencia cruzada]
2. Kim, Y.; Tran, TV; Kim, K.-H. Robusto control sin sensores de voltaje de red adaptable a frecuencia basado en EMPC para un inversor conectado a la red con filtro LCL. Electrónica 2024, 13, 998. [CrossRef]
3. Németh, Z.; Kuczmann, M. Diseño de observador y controlador basado en desigualdades de matriz lineal para máquinas de inducción. Electrónica 2022, 11, 3894. [Referencia cruzada]
4. Ndabarushimana, E.; Qin, N.; Ma, L. Desacoplamiento de perturbaciones para un rectificador de modulación de ancho de pulso monofásico basado en un Filtro H-Infinity extendido. Electrónica 2023, 12, 2765. [CrossRef]
5. Boyd, S.; El Ghaoui, L.; Ferón, E.; Balakrishnan, V. Desigualdades de matrices lineales en la teoría de sistemas y control; Sociedad de Industria y Publicación de Matemáticas Aplicadas (SIAM): Filadelfia, PA, EE. UU., 1994; Volumen 15, ISBN 0898714850.
6. De Oliveira, MC; Geromel, JC; Bernussou, J. Caracterizaciones extendidas de normas H2 y H y parametrizaciones de controladores para Sistemas de tiempo discreto. En t. J. Control 2002, 75, 666–679. [Referencia cruzada]
7. Bara, Análisis robusto de GI y control de sistemas de descriptores inciertos dependientes de parámetros. Sistema. Control Lett. 2011, 60, 356–364. [Referencia cruzada]
8. Cao, Y.-Y.; Lin, Z. Un enfoque de sistema de descriptores para el análisis de estabilidad robusto y la síntesis de controladores. Traducción IEEE. Automático. Control 2004, 49, 2081–2084. [Referencia cruzada]
9. De Caigny, J.; Camino, JF; Oliveira, RCLF; Peres, PLD; Swevers, J. Control de tiempo discreto H2 y H∞ con ganancia programada Sistemas politópicos variables en el tiempo. Aplicación de la teoría del control IET. 2010, 4, 362–380. [Referencia cruzada]
10. Oliveira, MCD; Geromel, JC; Bernussou, J. Un enfoque de optimización LMI para el diseño de controladores multiobjetivo para sistemas de tiempo discreto . En Actas de la 38.ª Conferencia del IEEE sobre Decisión y Control (Nº de catálogo 99CH36304), Phoenix, AZ, EE. UU., 7 a 10 de diciembre de 1999; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE.UU., 1999; Volumen 4, págs. 3611–3616.
11. Gahinet, P.; Apkarian, P.; Chilali, M. Funciones de Lyapunov afines dependientes de parámetros e incertidumbre paramétrica real. IEEE Trans. Aparato mecánico. Control 1996, 41, 436–442. [Referencia cruzada]
12. Pipeleers, G.; Demeulenaere, B.; Swevers, J.; Vandenberghe, L. Caracterizaciones LMI extendidas de sistemas y letras de control para Estabilidad y Rendimiento de Sistemas Lineales. Sistema. Control Lett. 2009, 58, 510–518. [Referencia cruzada]
13. Ku, C.-C.; Chen, G.-W. Diseño de controlador con ganancia programada para sistemas de variación de parámetros lineales en tiempo discreto con multiplicativo Ruidos. En t. J. Control automático. Sistema. 2015, 13, 1382–1390. [Referencia cruzada]
14. Becker, G.; Packard, A. Rendimiento robusto de sistemas lineales que varían paramétricamente utilizando retroalimentación lineal dependiente paramétricamente . Sistema. Control Lett. 1994, 23, 205–215. [Referencia cruzada]
15. Ferón, E.; Apkarian, P.; Gahinet, P. S-Procedimiento para el análisis de sistemas de control con incertidumbres paramétricas mediante funciones de Lyapunov dependientes de parámetros. En Actas de la Conferencia Americana de Control de 1995, Seattle, WA, EE.UU., 21 a 23 de junio de 1995; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE.UU., 1995; Volumen 1, págs. 968–972.
16. Wei, X.; Verhaegen, M. Soluciones LMI para el diseño de observador de detección de fallas mixtas H-/H∞ para variación de parámetros lineales Sistemas. En t. J. Adaptarse. Proceso de señal de control. 2011, 25, 114-136. [Referencia cruzada]
17. Lim, S. Análisis y control de sistemas de variación de parámetros lineales; Universidad de Stanford: Stanford, CA, EE.UU., 1999; ISBN 0599241535.
18. Oliveira, RCLF; Peres, PLD LMI dependientes de parámetros en análisis robusto: caracterización de soluciones polinomiales homogéneas dependientes de parámetros mediante relajaciones de LMI. Traducción IEEE. Automático. Control 2007, 52, 1334–1340. [Referencia cruzada]
19. Ebihara, Y.; Peaucelle, D.; Arzelier, D. Enfoque S-Variable para el control robusto basado en LMI; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2015; ISBN 978-1-4471-6605-4.
20. Ebihara, Y.; Hagiwara, T. Nuevas caracterizaciones de LMI dilatadas para la síntesis de controladores multiobjetivo de tiempo continuo. Automática 2004, 40, 2003–2009. [Referencia cruzada]
21. Canción, L.; Yang, J. Un enfoque mejorado para el análisis robusto de estabilidad y la síntesis de controladores para sistemas LPV. En t. J. Robusto Control no lineal 2010, 21, 1574–1586. [Referencia cruzada]
22. Apkarian, P.; Tuan, HD; Bernussou, J. Análisis de tiempo continuo, asignación de estructura propia y síntesis de H2 con caracterizaciones mejoradas de desigualdades de matrices lineales (LMI). Traducción IEEE. Automático. Control 2001, 46, 1941–1946. [Referencia cruzada]
23. Ebihara, Y.; Hagiwara, T. Un enfoque LMI dilatado para el análisis de rendimiento robusto de sistemas inciertos lineales invariantes en el tiempo. Automática 2005, 41, 1933-1941. [Referencia cruzada]
24. Trofino, A.; Coutinho, DF; Barbosa, KA Condiciones mejoradas de H2 y H∞ para un análisis robusto y síntesis de control de sistemas lineales. Control automático. 2005, 16, 427–434. [Referencia cruzada]
25. Shaked, U. Representaciones LMI mejoradas para el análisis y diseño de sistemas de tiempo continuo con tipo politópico Incertidumbre. Traducción IEEE. Automático. Control 2001, 46, 652–656. [Referencia cruzada]
26. Wei, J.; Lee, L. Mejora adicional de las representaciones LMI para el análisis y diseño de sistemas de tiempo continuo con incertidumbre de tipo politópico 1. En Actas de la Quinta Conferencia Asiática de Control de 2004 (IEEE Cat. No. 04EX904), Melbourne, VIC, Australia, 20 –23 de julio de 2004; Volumen 2, págs. 1–7.

Machine Translated by Google

27. Sajjadi-Kia, S.; Jabbari, F. Sobre la dilatación de la desigualdad de la matriz real acotada. En t. J. Control 2012, 85, 1593–1601. [Referencia cruzada]
28. Xie, W. Una representación LMI equivalente de un lema real acotado para sistemas de tiempo continuo. J. Desigualdades Apl. 2008, 2008, 672905. [Referencia cruzada]
29. Dabboussi, K.; Zrida, J. Un enfoque LMI dilatado para la síntesis robusta del controlador de retroalimentación de estado estático H∞ . En Actas de la 16ª Conferencia Internacional IEEE sobre Electrónica, Circuitos y Sistemas de 2009 (ICECS 2009), Yasmine Hammamet, Túnez, 13 a 16 de diciembre de 2009; págs. 491–494.
30. Rodrigues, LA; Oliveira, RCLF; Camino, JF LMI parametrizados para un control robusto y de retroalimentación de estado de sistemas politópicos de tiempo continuo . En t. J. Control no lineal robusto 2018, 28, 940–952. [Referencia cruzada]
31. Hu, C.; Jaimoukha, IM Nuevo procedimiento iterativo basado en desigualdades de matrices lineales para el control de retroalimentación de estado H2 y H∞ de sistemas politópicos de tiempo continuo. En t. J. Control no lineal robusto 2021, 31, 51–68. [Referencia cruzada]
32. Guzmán, JL; Hägglund, T. Reglas de ajuste para el control anticipativo a partir de perturbaciones medibles combinadas con el control PID: Una revisión. En t. J. Control 2021, 97, 2–15. [Referencia cruzada]
33. Zhu, W.; Zhang, Z.; Chen, J.; Zhao, S.; Huang, S. Reconciliación dinámica de datos para mejorar el rendimiento de los sistemas de control de retroalimentación/retroalimentación con ruido de medición. J. Control de procesos 2021, 108, 12–24. [Referencia cruzada]
34. García-Mañas, F.; Guzmán, JL; Rodríguez, F.; Berenguel, M.; Hägglund, T. Evaluación experimental de reglas de ajuste anticipado. Ing. de Control. Practica. 2021, 114, 104877. [Referencia cruzada]
35. Du, Y.; Cao, W.; Ella, J.; Wu, M.; Fang, M. Rechazo de perturbaciones mediante compensación anticipada utilizando un enfoque mejorado de perturbación de entrada equivalente. J. Frankl. Inst. 2020, 357, 10977–10996. [Referencia cruzada]
36. Huang, M.; Deng, Y.; Li, H.; Wang, J. Atenuación de la ondulación del par de PMSM utilizando dos grados de libertad robustos y mejorados Controlador a través del observador de parámetros de modo deslizante extendido. ISA Trans. 2022, 129, 558–571. [Referencia cruzada]
37. Adán, EJ; Marchetti, JL Diseño y ajuste de controladores feedforward robustos. Computadora. Química. Ing. 2004, 28, 1899–1911. [Referencia cruzada]
38. Peng, C.; Xu, H.; Zhang, J. Diseño de control de dos grados de libertad con representación H∞ LMI mejorada. J. Desigualdades Apl. 2012, 2012, 147. [Referencia cruzada]
39. Köse, IE; Scherer, CW Control anticipativo robusto de ganancia L2 de sistemas inciertos utilizando IQC dinámicos. En t. J. Control no lineal robusto 2009, 19, 1224–1247. [Referencia cruzada]
40. Alma, M.; Martínez, JJ; Landau, ID; Buche, G. Diseño y ajuste de compensadores feedforward H-Infinity de orden reducido para Control activo de vibraciones. Traducción IEEE. Sistema de control Tecnología. 2012, 20, 554–561. [Referencia cruzada]
41. Peng, C.; Zhang, Z.; Zou, J.; Li, K.; Zhang, J. Control 2DOF de retroalimentación y retroalimentación robusta basado en modelos internos para sistemas LPV con perturbaciones. J. Control de procesos 2013, 23, 1415–1425. [Referencia cruzada]
42. Yuan, C.; Wu, F. Control anticipativo conmutado robusto H2 y H∞ de sistemas LFT inciertos. En t. J. Control no lineal robusto 2016, 26, 1841–1856. [Referencia cruzada]
43. Fleps-Dezasse, M.; Bunte, T.; Svariček, F.; Brembeck, J. Control anticipativo LPV de suspensiones semiactivas para mejorar la estabilidad del balanceo. Ing. de Control. Practica. 2018, 78, 1–11. [Referencia cruzada]
44. Altun, Y.; Gulez, K.; Mumcu, Síntesis de controlador de alimentación anticipada LPV estático de TV para sistemas de variación de parámetros lineales. En Actas de la 9.ª Conferencia Asiática de Control (ASCC) de 2013, Estambul (Turquía), 23 a 26 de junio de 2013; IEEE: Piscataway, Nueva Jersey, EE. UU., 2013; págs. 1–4.
45. Altun, Y.; Gulez, K. Síntesis de control anticipativo de variación de parámetros lineales utilizando la función de Lyapunov dependiente de parámetros. Dyn no lineal. 2014, 78, 2293–2307. [Referencia cruzada]
46. Venkataraman, R.; Seiler, P. Síntesis LPV convexa de estimadores y feedforwards utilizando dualidad e integral cuadrática Restricciones. En t. J. Control no lineal robusto 2018, 28, 953–975. [Referencia cruzada]
47. Löfberg, J. Programación automática robusta convexa. Óptimo. Métodos Softw. 2012, 27, 115-129. [Referencia cruzada]
48. Labit, Y.; Peaucelle, D.; Henrion, D. SEDUMI INTERFACE 1.02: Una herramienta para resolver problemas de LMI con SEDUMI. En Actas del Simposio Internacional IEEE de 2002 sobre Diseño de Sistemas de Control Asistido por Computadora, CACSD 2002 — Actas, Glasgow, Reino Unido, 20 de septiembre de 2002; págs. 272-277.
49. Gahinet, P.; Nemirovskii, A.; Laub, AJ; Chilali, M. Caja de herramientas de control de LMI. En Actas de la 33.ª Conferencia del IEEE sobre Decisión y Control de 1994, Lake Buena Vista, FL, EE.UU., 14 a 16 de diciembre de 1994; The Mathworks, Inc.: Natick, MA, EE.UU., 1995; págs. 4-13.
50. Apkarian, P.; Adams, RJ Técnicas avanzadas de programación de ganancias para sistemas inciertos. Traducción IEEE. Sistema de control Tecnología. 1998, 6, 21–32. [Referencia cruzada]
51. Chen, H.; Guo, KH Control H∞ restringido de suspensiones activas: un enfoque LMI. Traducción IEEE. Control. Sistema. Tecnología. 2005, 13, 412–421. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Un controlador de retroiluminación LED adaptable de alta eficiencia

Xinyu Xu, Qiyue Zhuo, Chunhui Jiang, Zichao Zhou, Junlong Tang y Wanghui Zou *

Facultad de Ciencias Físicas y Electrónicas, Universidad de Ciencia y Tecnología de Changsha, Changsha 410114, China *
Correspondencia: zouwh@csust.edu.cn

Resumen: Se ha propuesto un esquema de controlador de retroiluminación de diodo emisor de luz (LED) adaptativo de alta eficiencia para abordar el problema de la pérdida de energía adicional causada por la variación del voltaje directo del LED. En este esquema, la corriente máxima y el ciclo de trabajo de cada canal de LED se ajustan por separado a través de un algoritmo de control adaptativo para minimizar la caída de voltaje en el regulador de corriente lineal (LCR) de cada canal de LED para reducir la pérdida excesiva de energía en cada canal de LED. y mejorar la eficiencia energética total . Un regulador de corriente lineal, adecuado para control adaptativo, está diseñado en un proceso de semiconductor de óxido metálico complementario (CMOS) de 0,18 µm y 5 V. Los resultados de la simulación demuestran que el regulador de corriente lineal puede lograr una corriente de canal linealmente ajustable que oscila entre 0 y 48 mA con una resolución de corriente de 0,2 mA. En diferentes esquinas del proceso y temperaturas, el error máximo para todo el rango de corriente es inferior al 0,1%. El área central del diseño del chip es de aproximadamente 0,1 mm2. El prototipo del controlador completo comprende los chips · LCR, los transistores MOS de alimentación externos, el módulo digital y las cadenas de LED. Los resultados de la prueba muestran que la pérdida de energía del regulador de corriente lineal se ha reducido significativamente y la eficiencia energética de cada canal LED se ha medido en alrededor del 98,1%.

Palabras clave: controlador de retroiluminación LED; control adaptativo; regulación de corriente lineal; alta eficiencia

check for updates

Cita: Xu, X.; Zhuo, Q.; Jiang, C.; Zhou, Z.; Tang, J.; Zou, W. Un controlador de retroiluminación LED adaptable de alta eficiencia. Electrónica 2024, 13, 3057. https://doi.org/10.3390/electrónica13153057

Editor académico: Francesco Driussi

Recibido: 22 de junio de 2024
Revisado: 25 de julio de 2024
Aceptado: 30 de julio de 2024
Publicado: 2 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.
Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Los diodos emisores de luz (LED) se han adoptado ampliamente como fuentes de retroiluminación para dispositivos de pantalla de cristal líquido (LCD) y otras aplicaciones. En comparación con las fuentes de luz tradicionales, los LED ofrecen ventajas significativas como alta eficiencia, excelente estabilidad del color, alta confiabilidad, larga vida útil, tamaño compacto y seguridad ambiental [1–4]. Dado que el brillo del LED es proporcional a su corriente, un circuito controlador eficiente y preciso es esencial en aplicaciones de retroiluminación LED para lograr un control preciso del brillo. Además, siempre se emplean canales LED paralelos (cadenas de LED) para garantizar una cobertura suficiente [5,6]. Un controlador de retroiluminación LED tradicional se compone principalmente de un convertidor elevador, canales LED paralelos y los correspondientes reguladores de corriente lineal (LCR). El convertidor elevador proporciona suficiente voltaje para encender todos los LED en cada canal, y el LCR regula la corriente de cada canal para controlar el brillo [7–9]. Como área importante de la aplicación de administración de energía, el diseño de controladores de retroiluminación LED siempre ha sido un foco de investigación popular para numerosas universidades e instituciones de investigación en todo el mundo. El objetivo es optimizar el rendimiento del sistema a través de diseños de circuitos y arquitecturas de sistemas innovadores, con énfasis en métricas como la eficiencia del sistema [10-15], la relación de atenuación [16-20] y la precisión de la corriente [21-25].

Debido a variaciones del proceso, efectos del envejecimiento y cambios de temperatura, los LED del mismo tipo pueden exhibir diferentes voltajes directos, lo que resulta en discrepancias de voltaje significativas entre diferentes canales de LED. En consecuencia, es necesario introducir una cierta cantidad de margen de voltaje para garantizar el correcto funcionamiento en diversas condiciones de trabajo. Sin embargo, esto también conduce a una mayor pérdida de energía y a un deterioro de la eficiencia energética [26,27]. En [28] se propuso un mecanismo de control digital basado en un R-DAC para abordar el problema del aumento de la pérdida de energía debido al voltaje excesivo. Una comparación entre el voltaje

Machine Translated by Google

en el LCR y se conduce un voltaje de referencia preestablecido, que impulsa el ajuste del voltaje de retroalimentación del convertidor elevador CC-CC a través de un convertidor digital a analógico (DAC). Luego, la salida del convertidor elevador se ajusta para mantener el voltaje LCR en un nivel fijo. En [29], se propuso una técnica de seguimiento de referencia adaptativa, utilizando un circuito de "voltaje mínimo" y una resistencia ajustable de 3 bits como resistencia de retroalimentación para ajustar la salida del convertidor elevador. La precisión del voltaje de salida está influenciada por la precisión y el rango de ajuste de la resistencia. En [30–34], a través del "Selector de voltaje mínimo" o el "Selector de canal más bajo", el voltaje LCR mínimo entre los canales se detecta y se usa para ajustar dinámicamente el ciclo de trabajo de la señal del interruptor del convertidor elevador y cambiar la salida del convertidor elevador. En [35,36], se utilizan diodos para seleccionar el voltaje LCR mínimo, un método que no se implementa fácilmente en procesos CMOS estándar. En [2], se analizaron las ventajas y desventajas de varias topologías de controladores LED y se identificaron futuras direcciones de investigación.

En general, para la mayoría de las soluciones existentes, la estrategia principal es ajustar el voltaje de salida del convertidor elevador para reducir el voltaje excesivo en el LCR, reduciendo así las pérdidas y mejorando la eficiencia. Sin embargo, para la configuración multicanal, debido a las diferencias entre canales, es más eficaz optimizar cada canal por separado para reducir aún más las pérdidas y mejorar la eficiencia. En este artículo, proponemos un esquema de conducción de retroiluminación LED adaptativa de alta eficiencia que aborda el problema de las diferencias entre canales. Para cada canal se emplean tanto regulación de corriente lineal como modulación de ancho de pulso (PWM).
A través de la regulación de corriente lineal, se ajusta la corriente del canal y el voltaje en el LCR en cada canal se minimiza a un valor fijo predefinido. Posteriormente, mediante modulación de ancho de pulso, se ajusta el ciclo de trabajo de la corriente del canal, calibrando la corriente promedio de cada canal al mismo nivel. Esta estrategia garantiza que cada canal LED funcione con una pérdida mínima, maximizando así la eficiencia.

La estructura de las partes restantes de este artículo es la siguiente: La Sección 2 detalla la tecnología de control adaptativo diseñada en este documento. La Sección 3 analiza y analiza los resultados de la simulación y los resultados de las pruebas del controlador de retroiluminación LED adaptativo de alta eficiencia propuesto . La sección 4 concluye el artículo.

2. Técnica de Control Adaptativo

2.1. Principio de control adaptativo

La Figura 1 ilustra la estructura del controlador de retroiluminación LED adaptativo de alta eficiencia propuesto, que comprende un controlador de brillo, un convertidor elevador y varios canales de LED. Cada canal de LED consta de una cadena de LED, un LCR y un transistor MOS de alto voltaje que actúa como interruptor para el control del ciclo de trabajo. El controlador de brillo incluye un R-DAC de 9 bits para producir VC, que sirve como referencia de voltaje y determina la salida del convertidor elevador Vboost. La señal SENSE indica si el LCR está en el estado co
El controlador de brillo monitorea el SENTIDO de cada canal y genera señales VC, PWM y CM_SW siguiendo un algoritmo y pasos específicos. CM_SW y PWM son señales digitales de múltiples bits que controlan la corriente máxima y el ciclo de trabajo del canal, respectivamente. Este proceso garantiza que cada canal LED funcione en un estado de alta eficiencia.

De la figura, para el canal n, existe una relación de voltaje como

$$Vboost = VLED,n + VMP,n + VLCR,n \quad (1)$$

donde VLED es el voltaje a través de la cadena de LED o la suma del voltaje directo de cada LED. VMP es el voltaje fuente-drenaje del transistor MOS MP de alto voltaje, y VLCR denota el voltaje LCR. La "n" en el subíndice indica el canal n, que se aplica a todos los símbolos de este documento. Si el control adaptativo está deshabilitado y el canal LED no está en el estado óptimo, habrá una porción excesiva en el voltaje LCR, que se puede expresar de la siguiente manera:

$$VLCR,n = VLCR_mín + VLCR_exc,n \quad (2)$$

Machine Translated by Google

$$= + \quad (2)$$

donde VLCR_min es el voltaje LCR mínimo requerido para garantizar un funcionamiento adecuado, es decir,
VLCR_min es el voltaje LCR mínimo requerido para garantizar un funcionamiento adecuado, es decir
es decir, el transistor de salida en el LCR funciona correctamente y mantiene una salida precisa
salida en el LCR funciona correctamente y mantiene una salida precisa
actual. VLCR_exc representa la porción excesiva del voltaje LCR. Para un canal, el
excesiva del voltaje LCR. Para un canal, el
La pérdida de potencia se puede calcular mediante
la pérdida de potencia se puede calcular mediante

$$\text{Ploss,n} = \text{Iave,n} \times \text{Vloss,n} = \text{Iave,n} \times (\text{VLCR,n} + \text{VMP,n}) \quad (3)$$

donde Iave,n es la corriente promedio, que está determinada por la corriente pico Ipico,n y donde Iave,n es la corriente promedio, que está determinada por la corriente pico Ipico,n y la
ciclo de trabajo actual δn. Vloss,n es la suma de VLCR,n y VMP,n. Si las resistencias del ciclo de trabajo actual δn. Vloss,n
es la suma de VLCR,n y VMP,n. Si las resistencias de
Los transistores MOS de alto voltaje son lo suficientemente bajos, VMP tiene un impacto limitado en Ploss. Porque
Los transistores MOS de alto voltaje son lo suficientemente bajos, VMP tiene un impacto limitado en Ploss. Porque
VMP y VLCR_min son requisitos previos para mantener el MOS y LCR funcionando adecuadamente, VMP y VLCR_min son
requisitos previos para mantener el MOS y LCR funcionando adecuadamente,
La pérdida excesiva de energía se define como
La pérdida excesiva de potencia se define como

$$\text{Ploss_exc,n} = \text{Iave,n} \times \text{VLCR_exc,n} \quad (4)$$

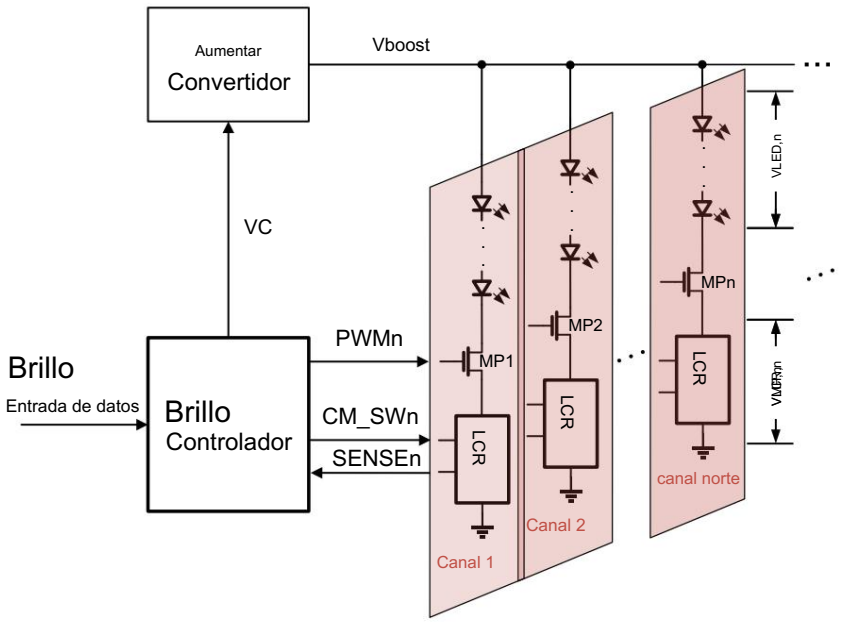


Figura 1. Estructura del controlador de retroiluminación LED adaptativo de alta eficiencia propuesto.
Figura 1. Estructura del controlador de retroiluminación LED adaptativo de alta eficiencia propuesto.

2.2. Proceso de control adaptativo
2.2. Proceso de control adaptativo

Un proceso de control adaptativo adecuado para controladores LED multicanal está diseñado para
Un proceso de control adaptativo adecuado para controladores LED multicanal está diseñado para reducir la pérdida
Reduce la pérdida excesiva de energía causada por el voltaje excesivo. Al iniciar el sistema, el
excesiva de energía causada por el voltaje excesivo. Al iniciar el sistema, el controlador de brillo inicia un
proceso de inicialización, durante el cual la corriente máxima y
El controlador ness inicia un proceso de inicialización, durante el cual la corriente máxima y el ciclo de trabajo de cada canal
LED se configuran individualmente para lograr un brillo uniforme y
El ciclo de cada canal LED se configura individualmente para lograr un brillo uniforme y al mismo tiempo minimizar la
pérdida excesiva de energía. Después de la fase de inicialización, el brillo
minimizar simultáneamente la pérdida excesiva de energía. Después de la fase de inicialización, el controlador de brillo pasa
a la fase de seguimiento, donde monitorea continuamente el estado.
El controlador pasa a la fase de seguimiento, donde monitorea continuamente el estado del LCR. Las configuraciones de
corriente máxima y ciclo de trabajo se ajustan en consecuencia para
la LCR. Luego, las configuraciones de corriente máxima y ciclo de trabajo se ajustan en consecuencia para adaptarse a las
fluctuaciones en el suministro de energía, la temperatura y otros factores.
Modificar las fluctuaciones en el suministro de energía, la temperatura y otros factores.

La Figura 2 muestra el diagrama de flujo de la fase de inicialización. En primer lugar, la entrada de brillo.
La Figura 2 muestra el diagrama de flujo de la fase de inicialización. En primer lugar, los datos de
entrada de brillo, incluida la corriente máxima nominal Iset y el ciclo de trabajo δset, se cargan en el
Los datos, incluida la corriente máxima nominal Iset y el ciclo de trabajo δset, se cargan en el controlador de brillo.
Posteriormente, la corriente LCR de cada canal se establece en Iset mediante el
controlador de brillo. Posteriormente, la corriente LCR de cada canal se establece en Iset mediante la
señal CM_SW. Luego, el controlador de brillo comienza a aumentar VC, lo que hace que Vboost aumente.
Señal CM_SW. Luego, el controlador de brillo comienza a aumentar VC, lo que hace que Vboost disminuya en consecuencia.
Mientras tanto, el controlador de brillo monitorea simultáneamente la
pliegue en consecuencia. Mientras tanto, el controlador de brillo monitorea simultáneamente la señal de estado SENSE de
cada canal. Una vez que todas las señales SENSE cambian de 0 a 1, el
tus señal SENSE de cada canal. Una vez que todas las señales SENSE cambian de 0 a 1, se detiene el aumento
de VC . En este punto, las corrientes máximas de todos los canales han alcanzado el valor preestablecido.
pliegue en las paradas de VC . En este punto, las corrientes máximas de todos los canales han alcanzado el valor
preestablecido de Iset, y siempre hay un canal, que se supone que es el canal k, cuyo SENTIDO

La señal es la última en cambiar.

Machine Translated by Google

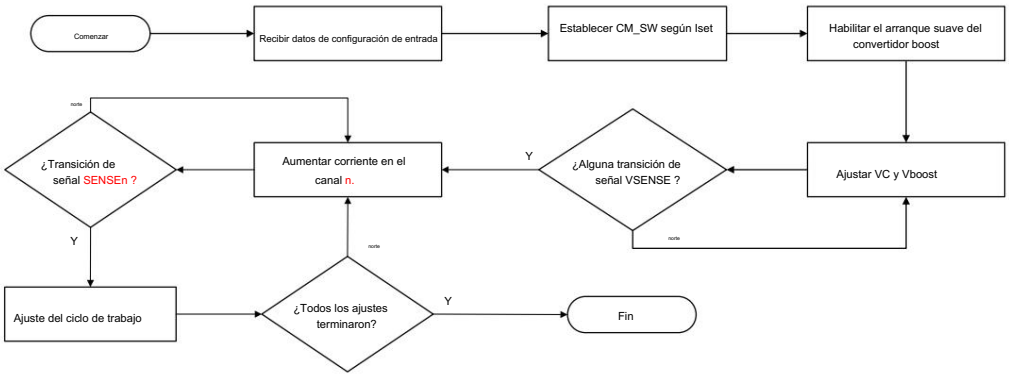


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de control adaptativo en la fase de inicialización.

A continuación, se lleva a cabo secuencialmente un paso de ajuste de corriente máxima en todos los canales excepto el canal k. El controlador de brillo intenta aumentar la corriente del canal proporcionando una nueva configuración CM_SW. Si SENSE permanece en 1, el controlador de brillo continúa este proceso. Sin embargo, si SENSE cambia de 1 a 0, el controlador de brillo vuelve a la configuración CM_SW anterior, concluyendo el proceso de ajuste para ese canal. El canal correspondiente tiene entonces una nueva corriente máxima. El controlador de brillo procede a realizar el proceso de ajuste para el canal siguiente. Una vez que se completan todos los ajustes de corriente , el voltaje en cada LCR se acerca a VLCR_min y el exceso de componente se minimiza.

Finalmente, para garantizar el mismo brillo, cada canal LED debe tener la misma corriente promedio. Por lo tanto, el controlador de brillo ajusta el ciclo de trabajo del canal n (δn) de la siguiente manera:

$$\delta n = \delta set \times \frac{Iset}{Ipico,n} \quad (5)$$

donde Ipico, n es la corriente máxima del n-ésimo canal LED después del proceso de ajuste como se describe anteriormente. δset e Iset representan el ciclo de trabajo inicial y la corriente máxima, respectivamente. Vale la pena señalar que, según la Ecuación (4), la corriente promedio permanece sin cambios.

A través del proceso antes mencionado, se ajustan la corriente máxima Ipico,n y el ciclo de trabajo δn para cada canal LED, minimizando así el consumo de energía adicional resultante del voltaje excesivo. La corriente promedio ajustada se alinea estrechamente con la corriente promedio establecida inicialmente. Dado que la salida de brillo de los LED se correlaciona directamente con su corriente, el método de control adaptativo garantiza que los niveles de brillo en todos los canales de LED permanezcan consistentes. Al entrar en la fase de seguimiento, el principio fundamental se asemeja al de la fase de inicialización. Ambos combinan el ajuste de la corriente máxima y el ciclo de trabajo y no se describirán en detalle en este artículo.

2.3. Regulador de corriente lineal

Debido a que el brillo del LED está directamente influenciado por su corriente, un control preciso del brillo requiere una regulación actual precisa. En muchas soluciones de controladores de retroiluminación LED, normalmente se emplea un LCR para generar y controlar la corriente del LED. La Figura 3 ilustra dos configuraciones típicas de circuitos LCR [37]. Un objetivo clave del diseño de los circuitos LCR es lograr una alta precisión de corriente. En la Figura 3a, el amplificador operacional y el transistor M1 forman una retroalimentación negativa, asegurando que VS sea igual a VREF. En consecuencia, la corriente de salida ILED es VREF/RS. Claramente, la precisión de RS afecta directamente a la precisión de ILED . Es importante señalar que las corrientes impulsoras para los LED de retroiluminación son generalmente sustanciales. En este documento, la corriente de conducción máxima está diseñada para ser de 48 mA. Además, para minimizar la pérdida de energía, VS o VREF deben mantenerse lo más bajos posible, lo que requiere un RS pequeño para lograr corrientes altas. Sin embargo, un RS excesivamente pequeño puede aumentar significativamente el impacto negativo de los parásitos del circuito en la precisión de la corriente de salida.

Machine Translated by Google

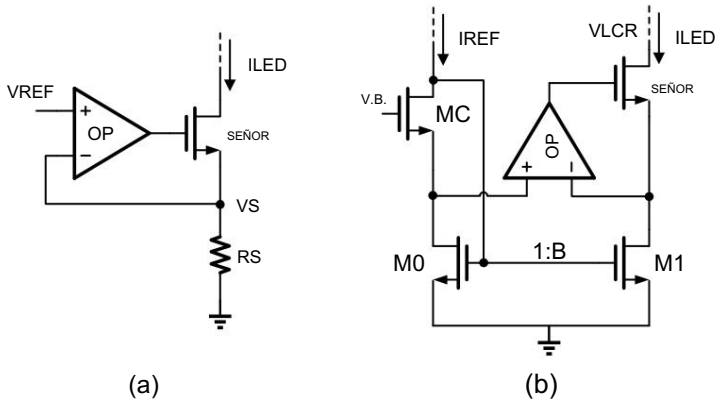


Figura 3. Circuitos reguladores de corriente lineal típicos. (a) Estructura de regulación de fuentes; (b) Espejo estructura actual.

La Figura 3b muestra otro tipo de LCR. En esta configuración, la corriente de salida ILED no se genera directamente como en la Figura 3a, sino a través de la duplicación de corriente. En esta estructura, ILED está determinada por B × IREF, donde IREF es una corriente de referencia y B es la relación de espejo actual, que se define por la relación de tamaño del transistor M1 a M0. El amplificador operacional (OP) desempeña un papel crucial al garantizar que los transistores M1 y M0 tengan el mismo VDS, garantizando así una duplicación de corriente precisa.

En realidad, M0 y M1 pueden funcionar en la región lineal en lugar de en la región de saturación al reducir VB, reduciendo así VDS, lo que ayuda a disminuir VLCR y reducir la potencia excesiva [38]. La expresión clásica de corriente de drenaje para transistores MOS que trabajan en la región lineal es

$$I_D = \frac{1}{2}\mu_{COX}\frac{W}{L}[2(V_{GS} - V_{TH}) - V_{DS}]V_{DS} \quad (6)$$

El transistor ahora puede ser aproximadamente equivalente a una resistencia lineal. Como se mencionó anteriormente, debido al efecto de OP, los VDS de M0 y M1 se mantienen iguales. Entonces la corriente de drenaje de M0 y M1 tiene una relación como ff

$$\frac{I_{D,M0}}{I_{D,M1}} = \frac{(W/L)_{M0}}{(W/L)_{M1}} = \frac{1}{B} \quad (7)$$

Claramente, se garantiza una duplicación de corriente precisa.

Con base en la estructura del circuito que se muestra en la Figura 3b, se diseñó un LCR mejorado para control adaptativo como se muestra en la Figura 4. La principal diferencia con el circuito de la Figura 3b es la introducción del amplificador operacional OP2. OP2, junto con el transistor M0, forma un bucle de retroalimentación negativa que garantiza que el voltaje fuente-drenaje VDS de M0, indicado como VA en la figura, permanezca igual a VREF. Al ajustar VREF, se puede controlar con precisión el voltaje fuente-drenaje VDS de M0. La ventaja del diseño es que mitiga el impacto de las variaciones del proceso y facilita un control preciso de los parámetros. Cuando VREF es bajo, el transistor M0 opera en la región lineal. Transistores M1, M2, . . ., MN sirven como transistores espejo de corriente correspondientes a M0, cada uno del mismo tamaño. El decodificador determina si cada transistor espejo se activa o desactiva basándose en la palabra de control binario CM_SW, ajustando así la corriente de salida total. Cuando la puerta de un transistor espejo se conecta a VCOM, se enciende; cuando se conecta a tierra, se apaga.

OP1 funciona de manera similar a OP en la Figura 3b, asegurando que el voltaje en el nodo D (indicado como VD) coincida con VA, manteniendo así una duplicación de corriente precisa. El comparador COMP funciona como un detector de estado de circuito simple con VCOM configurado en 2,5 V en este diseño. OP1 es un amplificador operacional de alta ganancia con una estructura de salida que aumenta la ganancia [39], mientras que OP2 es un amplificador operacional con una etapa de salida clase AB de riel a cola [40].

Machine Translated by Google

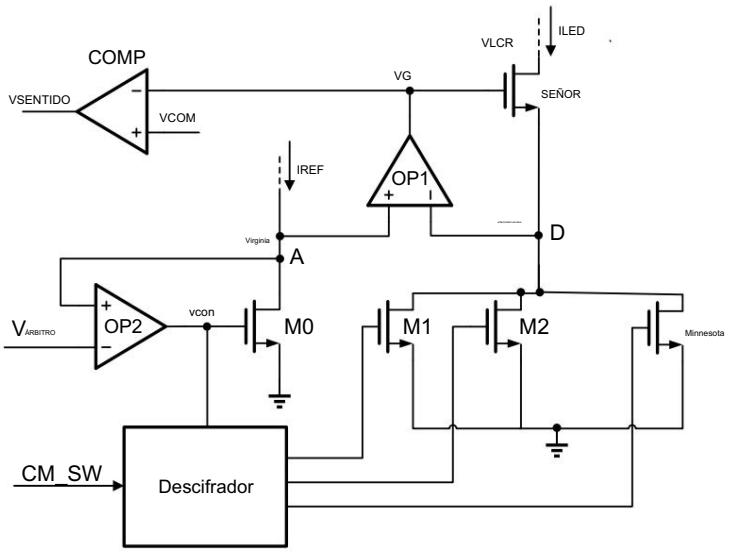


Figura 4. Circuito LCR para control adaptativo.

Cuando Vboost es suficientemente alto, incluso después de tener en cuenta la caída de voltaje en la cadena de LED, queda suficiente VLCR para garantizar el funcionamiento adecuado del LCR, lo que permite que ILED alcance o mantenga su valor establecido. En esta condición, el voltaje de puerta del transistor MR es aproximadamente 1,86 V (VGS,MR + VREF) según los resultados de la simulación en la esquina del proceso típico, y SENSE permanece en 1. Si Vboost disminuye o si ILED aumenta y avanza El voltaje de la cadena de LED aumenta, VLCR disminuirá correspondientemente. Sin embargo, mientras el transistor MR siga siendo efectivo, el LCR puede seguir funcionando normalmente. Si el VLCR disminuye aún más y empuja al transistor MR a una región lineal profunda, se debe aumentar VG para contrarrestar los impactos del VLCR decreciente. Cuando VG excede VCOM, la salida del comparador cambia de estado y SENSE cambia a 0. Esto indica que es posible que el LCR ya no pueda mantener o alcanzar el ILED establecido.

Todos los transistores espejo tienen el mismo tamaño y cada transistor tiene una relación de tamaño de B:1. con M0. La corriente del LED se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$ILED = N \times B \times IREF \tag{8}$$

donde N es el número de transistores espejo activados y está determinado por CM_SW. IREF es la corriente de referencia generada por el circuito de polarización externo. Cabe señalar que el ff
La corriente de salida ILED del LCR forma en realidad la corriente pico Ipeak antes mencionada.

Incluso en el mismo chip, existe un cierto grado de variación del proceso, que afecta principalmente al tamaño del dispositivo y a los parámetros característicos, lo que provoca imprecisiones o desajustes en la duplicación actual. Considerando la influencia de la relación ancho-largo (W/L) y el voltaje umbral (Vth), el cambio de corriente causado por la variación del proceso se puede expresar (WL) de la siguiente manera:

$$\Delta I = \frac{\partial I}{\partial (W/L)} \Delta(W/L) + \frac{\partial I}{\partial V_{th}} \Delta V_{th} \tag{9}$$

El desajuste actual generalmente se define como la tasa de cambio de la corriente. Asumiendo No hay correlación entre los diferentes factores que influyen, se puede expresar como:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{1}{I} \frac{\partial I}{\partial (W/L)} \Delta(W/L) + \Delta V_{th} \frac{\partial I}{\partial (W/L)} \frac{\partial}{\partial V_{th}} \tag{10}$$

Si el transistor opera en la región de saturación, según el drenaje correspondiente fórmula actual, la discrepancia actual es

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta(W/L)}{(P/L)} + \frac{2\Delta V_{th}}{(VGS - Vth)} \tag{11}$$

Machine Translated by Google

Mientras que si el transistor opera en la región lineal, de acuerdo con la fórmula de corriente de drenaje correspondiente, la falta de coincidencia actual se vuelve

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta(W/L)}{(P/L)} + \frac{2\Delta Vth}{2(VGS - Vth) - VDS} \quad (12)$$

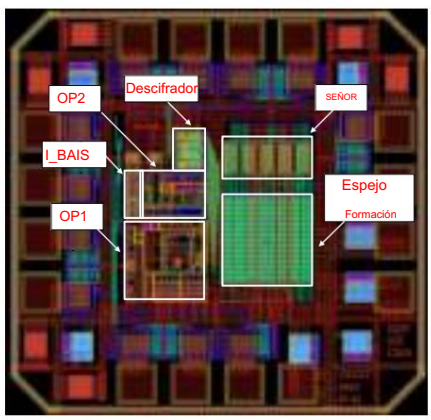
Al comparar las dos fórmulas anteriores, se puede ver que el impacto de la variación de tamaño en el desajuste actual es el mismo tanto en la región lineal como en la de saturación. Sin embargo, el impacto de la variación del voltaje umbral es menor en la región lineal, lo que indica que es posible lograr un menor desajuste de corriente en la región lineal.

3. Resultados de simulación y medición

3.1. Diseño de sistema y chip

Basado en la Figura 2, este documento construye y valida un controlador LED adaptativo de tres canales , cada canal comprende 6 LED. Se utiliza un chip convertidor boost, específicamente el TPS61046 de Texas Instruments. El LCR está diseñado utilizando un proceso de 5 V de semiconductor de óxido metálico complementario (CMOS) de 0,18 µm . Dado que este proceso no admite dispositivos de alto voltaje, se emplean transistores MP externos. Idealmente, si se dispone de un proceso BCD, estos transistores MP podrían integrarse directamente en el chip. Además, se prevé una mayor integración del controlador de brillo para lograr un chip controlador integrado monolítico, lo cual es un trabajo futuro planificado. En la simulación de circuitos, se emplean modelos PSPICE para el convertidor elevador, los LED y los transistores MP. El parámetro de voltaje en el modelo PSPICE para LED está ajustado intencionalmente para introducir diferencias entre canales. Específicamente, para el canal 3, el voltaje de encendido del LED se establece en 3,20 V, lo que representa un valor típico. Para los canales 1 y 2, los parámetros se ajustan a 2,73 V y 2,76 V, respectivamente. Como se describió anteriormente, el valor mínimo de Vboost lo dicta el VLED del canal 3. El controlador de brillo se implementa utilizando Verilog HDL y funciona a la frecuencia de 100 MHz. La frecuencia de la señal PWM es de 10 KHz. Todo el circuito funciona en un modo de simulación de señal mixta para verificar el proceso de control adaptativo y evaluar el rendimiento del LCR.

Teniendo en cuenta el rango de control actual y la resolución, el tamaño de M0 en el LCR se elige para que sea 1 µm/1 µm, y su relación con el transistor espejo se establece en 1:4. Hay 240 transistores espejo actuales en total. La corriente de referencia IREF se establece en 50 µA, lo que da como resultado una corriente de salida unitaria de 200 µA y una corriente de salida máxima de 48 mA. El tamaño de MR se elige para que sea 40 µm/2 µm × 50. El diseño general del circuito LCR se muestra en la Figura 5. Todos los transistores espejo y sus correspondientes interruptores de control están dispuestos en forma de una matriz de 15 × 16. El área central es de sólo 325 µm × 310 µm, mientras que el área completa, incluidas las almohadillas, es de 700 µm × 720 µm. Los tamaños clave de transistores también se resumen en la Figura 5.



Transistor	W/L
MR	40µm/2µm×50
M0	1µm/1µm
M1-MN	4µm/1µm

Figura 5. Diseño de LCR, diseñado en un proceso CMOS de 0,18 µm y el área del núcleo es de 325 × 310 µm2 . También se resumen los tamaños clave de transistores.

Figura 5. Diseño de LCR, diseñado en un proceso CMOS de 0,18 µm y el área del núcleo es de 325 × 310 µm2 .
También se resumen los tamaños clave de transistores.

3.2. Resultados de la simulación

La Figura 6 muestra las características de salida simuladas del LCR en diferentes ángulos y temperaturas del proceso. Se puede ver que cuando la corriente de salida LCR oscila entre 0 mA y 48 mA, demuestra una buena linealidad en diferentes condiciones de funcionamiento.

Específicamente, con una configuración de corriente de salida de 20 mA, la desviación máxima de corriente es 13

Machine Translated by Google

3.2. Resultados de la simulación

La Figura 6 muestra las características de salida simuladas del LCR en diferentes ángulos y temperaturas del proceso. Se puede ver que cuando la corriente de salida LCR oscila entre 0 mA y 48 mA, demuestra una buena linealidad en diferentes condiciones de funcionamiento. Específicamente, con una configuración de corriente de salida de 20 mA, la desviación de corriente máxima es de 13 µA, lo que resulta en un error de corriente de menos del 0,1 %. En general, el LCR muestra buena linealidad y precisión de corriente dentro del rango de corriente especificado.

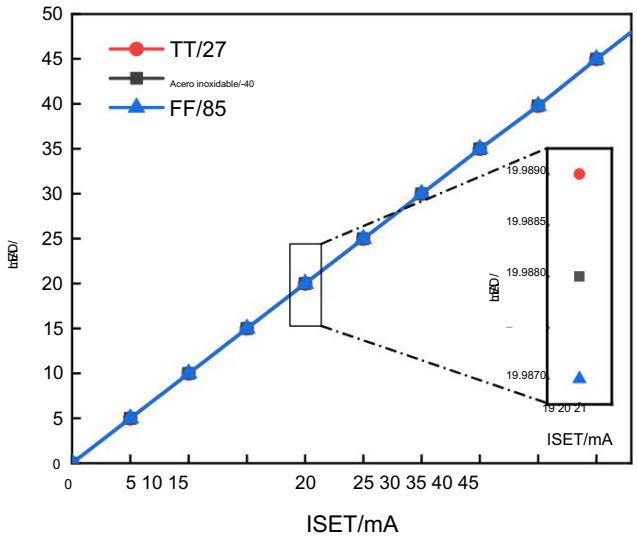


Figura 6. Corriente de salida del LCR versus configuración actual en diversas condiciones de trabajo.

La Figura 7 muestra la forma de onda de voltaje en varios nodos esenciales durante el proceso adaptativo. SENSE1, SENSE2 y SENSE3 representan las señales SENSE de los canales correspondientes. T0 denota la fase de arranque suave del convertidor elevador. Al encenderlo, la salida del convertidor elevador Vboost alcanza gradualmente un valor preestablecido después de un período de tiempo. Este valor preestablecido es el voltaje mínimo para que el circuito funcione correctamente en diversas condiciones de trabajo y está establecido en 25,19 V en este diseño. A medida que aumenta Vboost , las señales SENSE de cada canal pasan secuencialmente a 0. T1 marca la fase de ajuste de Vboost . Durante este tiempo, el controlador de brillo aumenta gradualmente VC, lo que lleva a una disminución correspondiente en Vboost. Se puede observar que cuando Vboost alcanza 21,52 V, SENSE3 pasa a 1, indicando un cambio en el estado del canal 3. Finalmente, VC permanece en 0,33 V y Vboost se estabiliza en 21,62 V. T2 marca la fase de regulación actual, durante que aumenta la corriente del canal 1 (canal 2). Cuando SENSE1 (SENSE2) pasa a 1, indica que el estado del canal 1 (canal 2) ha cambiado. Se cesa la regulación actual del canal 1 (canal 2) y el ciclo de trabajo del canal 1 (canal 2) se establece de acuerdo con la Ecuación (4). T3 representa la fase de trabajo normal, que también se denomina fase de seguimiento continuo, y las señales SENSE se mantienen dinámicamente en 0.

La Figura 8 ilustra la forma de onda actual en cada canal. Inicialmente, el valor de corriente máxima de cada canal se establece en 20 mA, con un ciclo de trabajo predeterminado del 100 %. Durante la etapa inicial de T0, Vboost no se ha establecido completamente y todos los LED están apagados, lo que resulta en una corriente cero en cada canal. Debido a que los LED en el canal 3 tienen el voltaje directo más grande, la corriente en el canal 3 es la última que aumenta al valor establecido, consistente con la sincronización de las señales SENSE en la Figura 7. Una vez completada la fase de ajuste de Vboost , la fase de regulación de corriente empieza. Se puede ver que las corrientes máximas en el canal 1 y el canal 2 aumentan a 24,2 mA y 23,2 mA, respectivamente, con los ciclos de trabajo correspondientes ajustados al 82,6 % y 86,2 %, asegurando corrientes promedio uniformes en los tres canales. Cuando comience la fase de trabajo normal, el controlador de brillo monitoreará continuamente el estado del LCR. Si el estado cambia, es decir, SENSE pasa a 1, la corriente máxima y el ciclo de trabajo se actualizarán en consecuenci

Machine Translated by Google

a 0. Según la forma de onda de corriente simulada, el tiempo máximo de subida y caída es de 173 ns y 74 ns, respectivamente, sin un exceso de corriente perceptible.

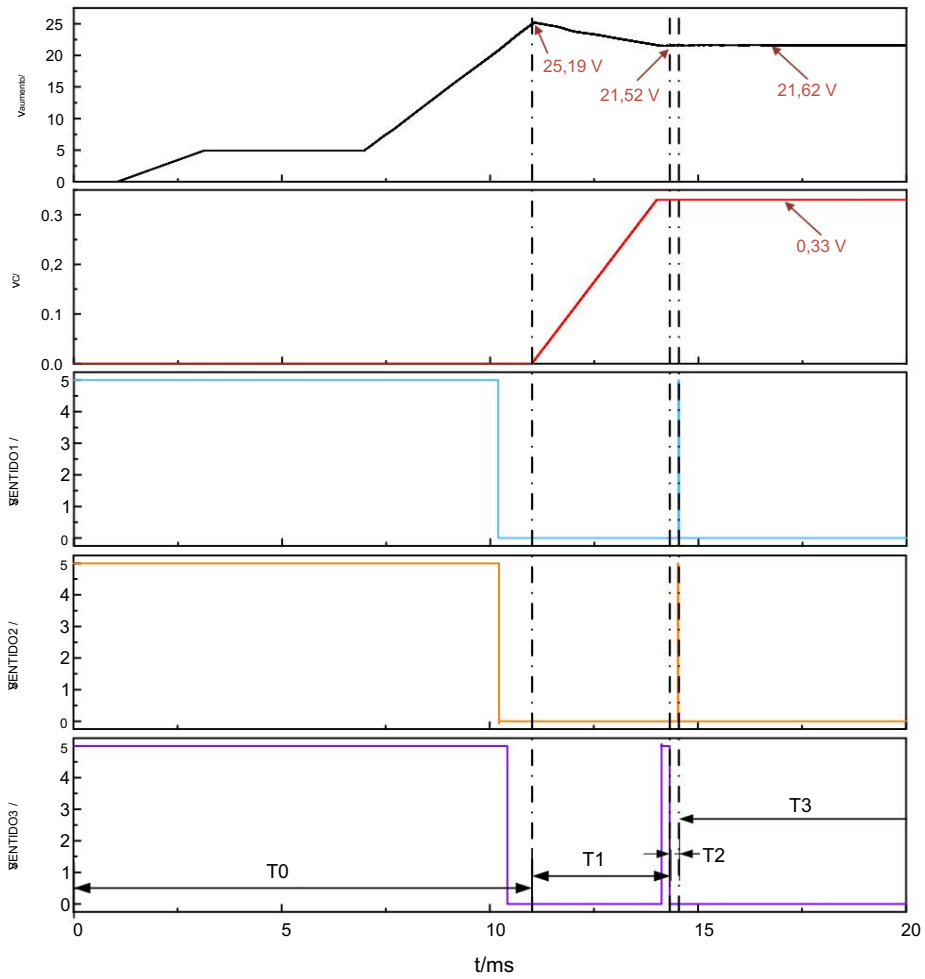


Figura 7. Formas de onda de voltaje bajo el proceso de control adaptativo.

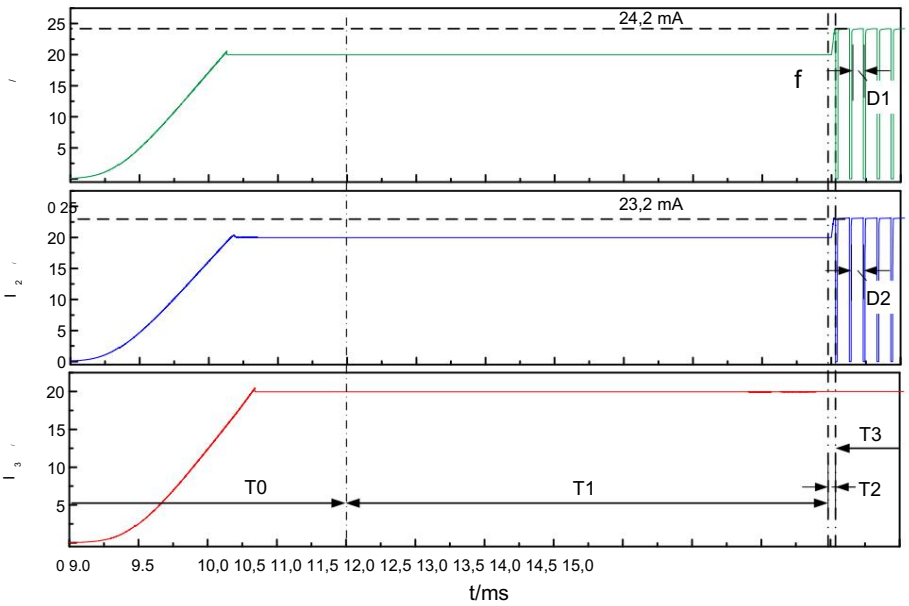


Figura 8. Formas de onda actuales de cada canal bajo el proceso de control adaptativo.

f

Machine Translated by Google

La Figura 9 compara las diferencias de pérdida de potencia entre el método de control de corriente máxima fija y el método de control adaptativo propuesto en este artículo. En el método de corriente máxima fija, solo se ejecuta el paso de ajuste Vboost , mientras que la corriente máxima y el ciclo de trabajo permanecen sin cambios. Como se describió anteriormente, bajo el método de corriente máxima fija, el canal 3 experimenta la menor pérdida de energía, mientras que el canal 1 y el canal 2 sufren mayores pérdidas de energía debido al voltaje excesivo. La figura ilustra la pérdida de potencia de los tres canales según el método de corriente máxima fija. Por el contrario, con el método de control adaptativo, tanto la corriente máxima como el ciclo de trabajo se ajustan, eliminando efectivamente el voltaje excesivo en el canal 1 y el canal 2, reduciendo así significativamente las pérdidas de e Como se muestra en la figura, cuando la corriente nominal del canal se establece en 20 mA, el método de control adaptativo reduce la pérdida de energía en un 74 %.

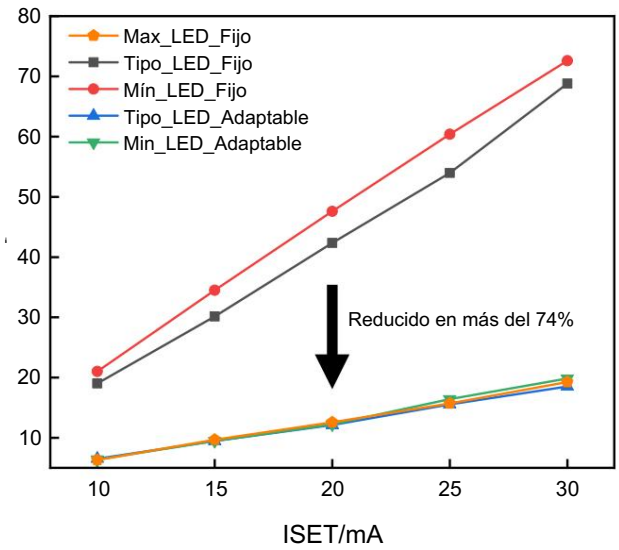


Figura 9. Pérdidas de potencia de LCR con el método de corriente pico fija y el método de control adaptativo propuesto.

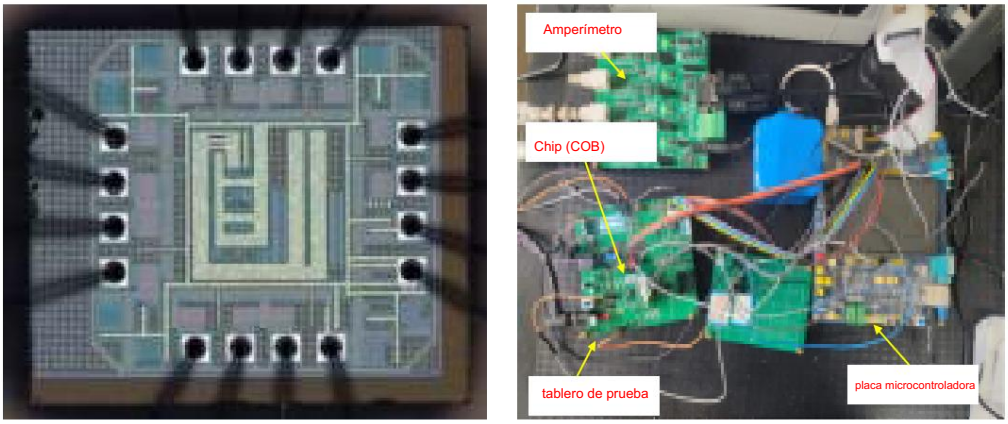
3.3. Resultados de la medición

La Figura 10 muestra una microfotografía del chip fabricado con cables de unión, junto con la configuración de prueba del chip. El chip está alojado en un paquete chip on-board (COB) y montado en la placa de prueba. La corriente de referencia IREF es suministrada por la placa de prueba. Una placa de desarrollo MCU STM32F407 (de ST Microelectronics) sirve como controlador de brillo y el DAC integrado en la MCU se utiliza para generar VC. Se conecta un amperímetro multicanal en serie entre cada cadena de LED y el drenaje del transistor MOS de alto voltaje para medir la corriente promedio de los canales de LED. Este amperímetro admite el registro de datos en tiempo real a través de un puerto serie. Las formas de onda de voltaje en los nodos del circuito se capturan utilizando un osciloscopio digital, específicamente el RTB2004 de Rohde & Schwarz. Para simplificar las pruebas, solo se implementan dos canales de LED, cada uno de los cuales comprende 6 LED. Cabe destacar que los LED se seleccionan intencionalmente para crear una diferencia de aproximadamente 500 mV en el voltaje directo a través de la cadena de LED entre los dos canales. El canal 2 tiene el voltaje directo más pequeño. Esta diferencia deliberada mejora la demostración de la eficacia del circuito.

La temperatura interior se mantuvo en torno a los 27 ◦ C. La Figura 11 ilustra las formas de onda de voltaje medidas de VPWM y Vloss para el canal 2 después del proceso de control adaptativo inicial. La configuración de corriente del canal Iset es 20 mA. Las cuatro cifras corresponden al caso en el que VREF se establece en 1 V, 0,6 V, 0,4 V y 0,3 V, respectivamente. El ciclo de trabajo de VPWM en cada caso se registra como 68,57%, 68,86%, 68,43% y 68,53%, respectivamente. Cuando VPWM es alto, el canal se enciende y Vloss en cada caso se mide a 1,06 V, 0,69 V, 0,49 V y 0,36 V, respectivamente. Cuando VPWM pasa a un nivel bajo, el canal se cierra y el aumento de Vloss se atribuye principalmente a la influencia de los efectos de la corriente de f

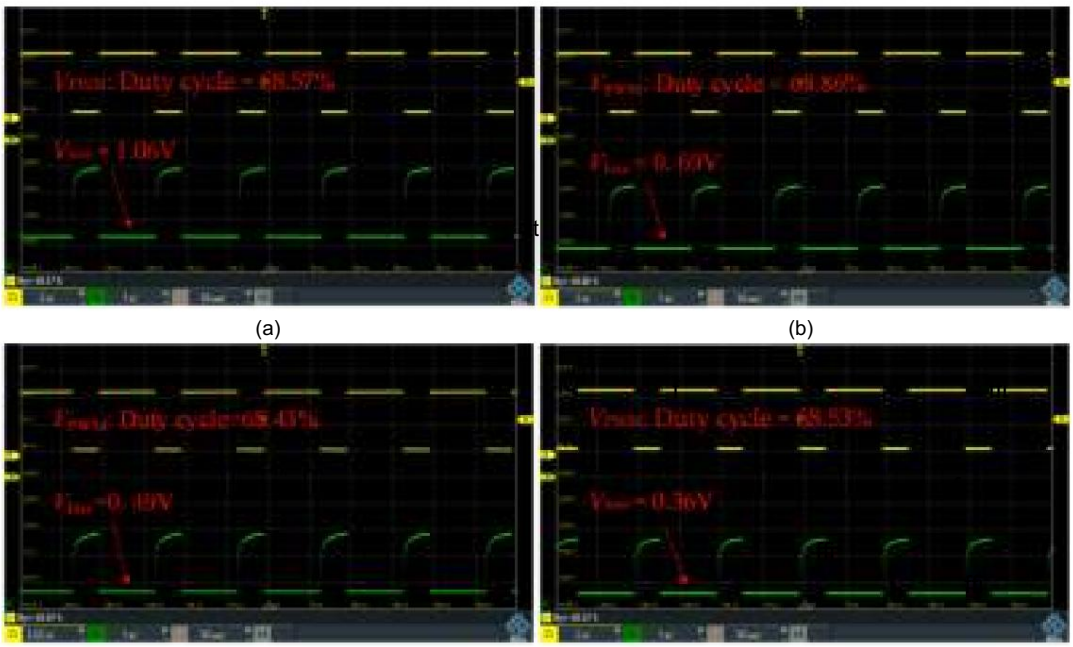
Machine Translated by Google

De las figuras se puede inferir que a pesar de que VREF disminuye de 1 V a 0,3 V, lo que puede hacer que los transistores espejo actuales en el LCR entren en la región lineal, la precisión de la corriente de salida aún se puede mantener y el ciclo de trabajo de VPWM permanece consistente en todos estos entornos.



(a) (b)

Figura 10. (a) Microfotografía del chip LCR; (b) sistema de prueba.

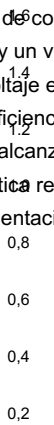


(a) (b)

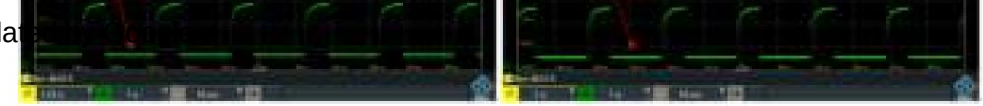
(C) (d)

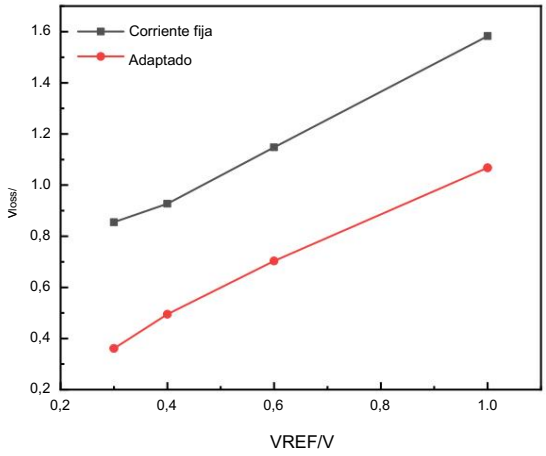
Figura 11. Formas de onda de voltaje de VPWM y Vloss bajo (a) VREF = 0,3 V, (b) VREF = 0,4 V, (c) VREF = 0,6 V y (d) VREF = 1 V. Iset = 20 mA.

La Figura 12 muestra la diferencia en Vloss y eficiencia energética del canal 2 tanto con el método de control de corriente máxima fija como con el método de control adaptativo. En la Figura 12a, Adaptativo, es muy obvio que hay un voltaje excesivo de aproximadamente 500 mV en el canal 2. Con el método de control adaptativo, este voltaje excesivo se mitiga efectivamente mediante ajustes en ILED, lo que resulta en una mejora sustancial en la eficiencia energética. Específicamente, cuando VREF se establece en 300 mV, la eficiencia energética puede alcanzar el 98,1 % con un ILED de 20 mA. En principio, es posible mejorar aún más la eficiencia energética reduciendo aún más el VREF , con el límite superior restringido por VCOM, que depende de la fuente de alimentación.

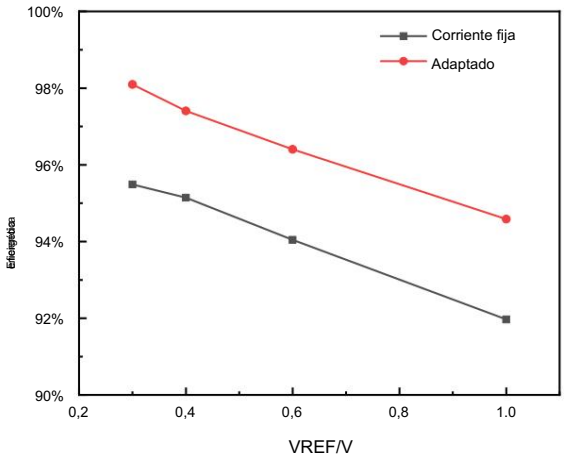


Machine Translat





(a)



(b)

Figura 12. Comparación entre el método de corriente pico fija y el control adaptativo propuesto método con respecto a (a) Vpérdida y (b) eficiencia energética.

La Tabla 1 compara varios parámetros y métricas de desempeño entre los propuestos. conductor adaptativo y otras referencias existentes. El diseño propuesto demuestra ventajas tales como un amplio rango de corriente de salida y una alta eficiencia energética. De hecho, la Tabla 1 sólo revela la eficiencia de un solo canal. Sin embargo, lo más importante es que la propuesta El método adaptativo tiene como objetivo mejorar la eficiencia de cada canal en un LED multicanal. conductor. Compensa eficazmente el voltaje excesivo en el LCR mediante control adaptativo con una complejidad de implementación moderada.

Tabla 1. Comparación de parámetros de rendimiento.

Ref	[17]	[41] [42]	[43]	Este trabajo
Proceso	CMOS de 0,5 µm	CMOS de 40 nm BCD de 0,35 µm	CMOS de 40 nm	CMOS de 0,18 µm
Área del núcleo (mm2)	N/A +	N/A	N/A +	0.1
Fuente de alimentación (V)	6–27	3–4,2 3,2–4,2 20 25 +	3,2–4,2	5
ILED máximo (mA)	30	2 6 5,36 22,5 ~300 ~675 94,4%	25	48
Configuración de cadena de LED.		97% Sí Sí No No		6
Vboost (V)	8		6	18,96 *
Vpérdida (mV)	26,41		20	360 *
Ajuste de Vboost de eficiencia energética	~400		~480	98,1% *
				Sí
Ajuste canal por canal	98,4% Sí No		97,6% Sí No	Sí

* Medido a Iset = 20 mA, δset = 3000%. + No disponible.

Machine Translated by Google

4. Resumen

En este artículo, se diseña un controlador de retroiluminación LED adaptativo de alta eficiencia para abordar el problema de la pérdida excesiva de energía causada por variaciones en el voltaje directo de los LED. Al ajustar la corriente máxima, se logra la consistencia en el voltaje directo de la cadena de LED dentro de cada canal. Esto minimiza el voltaje en el LCR en cada canal, optimizando así la pérdida excesiva de energía en cada canal y la eficiencia energética total. Además, ajustar el ciclo de trabajo garantiza la coherencia del brillo en cada canal. Basado en el proceso CMOS 1P4M de 0,18 µm, se diseñó y fabricó un circuito LCR adecuado para control adaptativo. El circuito utiliza una estructura de espejo de corriente y transistores MOS que operan en la región lineal para garantizar la precisión de la corriente y la eficiencia energética. El circuito LCR diseñado admite un rango de corriente de salida de 0 a 48 mA. Para verificar la efectividad del circuito de control adaptativo, se construyó un controlador de retroiluminación LED experimental de dos canales utilizando los chips LCR diseñados. Cada canal consta de 6 LED y la diferencia de voltaje directo entre canales se expande intencionalmente a aproximadamente 500 mV. Los resultados de la prueba demuestran que el circuito de control adaptativo presentado elimina esta diferencia de voltaje directo y reduce la pérdida excesiva de energía. Cuando el voltaje de referencia se establece en 300 mV, se logra una eficiencia energética del 98,1% a 20 mA. De hecho, el controlador experimental de dos canales se puede extender a una implementación multicanal. Si bien en este estudio solo se diseña y fabrica un chip LCR , los transistores MP y el controlador de brillo pueden integrarse para realizar un chip controlador integrado monolítico utilizando proc

Contribuciones de los autores: Conceptualización, WZ y QZ; metodología, XX, QZ, CJ y ZZ; software, XX; validación, XX, QZ, CJ y ZZ; análisis formal, XX; investigación, XX, QZ, CJ y ZZ; recursos, XX y QZ; curación de datos, XX y QZ; redacción: preparación del borrador original, XX y QZ; redacción: revisión y edición, WZ y XX; supervisión, WZ y JT; administración de proyectos, WZ y JT; adquisición de financiación, WZ Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por el Proyecto de Investigación Científica del Departamento de Educación de la Provincia de Hunan (23A0260) y el Proyecto de Innovación en la Práctica de Graduados de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Changsha (CLSJCX24079).

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos presentados en este estudio están disponibles previa solicitud al autor correspondiente.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Tsao, JY Iluminación de estado sólido: lámparas, chips y materiales para el mañana. Dispositivos de circuitos IEEE Mag. 2004, 20, 28–37. [Referencia cruzada]
2. Yadlapalli, RT; Narasipuram, RP; Kotapati, A. Una descripción general de las topologías de controladores LED de estado sólido energéticamente eficientes. En t. J. Energía Res. 2020, 44, 612–630. [Referencia cruzada]
3. Morrow, iluminación LED RC en horticultura. HortScience 2008, 43, 1947–1950. [Referencia cruzada]
4. Cho, J.; Parque, JH; Kim, JK; Schubert, EF Diodos emisores de luz blanca: historia, progreso y futuro. Fotónica láser Rev.2017 , 11, 1600147. [Referencia cruzada]
5. Surkanti, PR; Mehrotra, D.; Furth, PM Controlador LED multicanal con coincidencia de corriente precisa para aplicaciones portátiles. En actas del 62.º Simposio internacional sobre circuitos y sistemas del Medio Oeste del IEEE de 2019 (MWSCAS), Dallas, TX, EE. UU., 4 a 7 de agosto de 2019; págs. 941–944.
6. Pal, N.; Pescado, A.; McIntyre, W.; Griesert, N.; Invierno, G.; Eichhorn, T.; Pilawa-Podgurski, R.; Hanumolu, PK Un controlador LED de retroiluminación basado en convertidor boost-SC híbrido de 30 V con eficiencia del 91 % en CMOS de 180 nm. En Actas de la Conferencia de circuitos integrados personalizados (CICC) del IEEE de 2020, Boston, MA, EE. UU., 22 a 25 de marzo de 2020; págs. 1–4.
7. Pressman, A. Diseño de fuentes de alimentación conmutadas; McGraw-Hill, Inc.: Nueva York, NY, EE.UU., 1997.
8. Wang, Y.; Alonso, JM; Ruan, X. Una revisión de los controladores LED y tecnologías relacionadas. Traducción IEEE. Indiana electrón. 2017, 64, 5754–5765. [Referencia cruzada]
9. Gupta, N.; Verma, D. Una revisión y análisis de topologías de controladores de diodos emisores de luz (LED). En actas de la Segunda Conferencia Internacional del IEEE de 2021 sobre Energía Eléctrica y Sistemas de Energía (ICEPES), Bhopal, India, 10 y 11 de diciembre de 2021; págs. 1–6.
10. Oh, T.-J.; Cho, A.; Ki, S.-L.; Hwang, I.-C. Un controlador IC de LED de refuerzo controlado digitalmente de bajo consumo y bajo costo para retroiluminación. En Actas de la Conferencia de Circuitos Asiáticos de Estado Sólido del IEEE de 2012 (A-SSCC), Kobe, Japón, 12 a 14 de noviembre de 2012; págs. 237-240.

Machine Translated by Google

11. Lee, SW; Choe, H.-J.; Yun, J.-J. Mejora del rendimiento de un controlador LED de refuerzo con ganancia de alto voltaje para retroiluminación LED con iluminación de borde . Traducción IEEE. Sistema de circuitos. II Resúmenes Express 2017, 65, 481–485. [Referencia cruzada]
12. Chen, H.; Zhang, Y.; Ma, D. Un CI de controlador de cadena paralela SIMO para retroiluminación LED regulable con optimización de voltaje del bus local y circuito de regulación único en tiempo compartido. Traducción IEEE. Electron de potencia. 2011, 27, 452–462. [Referencia cruzada]
13. Kim, H.-C.; Yoon, CS; Jeong, D.-K.; Kim, J. Un controlador LED de equilibrio de corriente de múltiples canales y un solo inductor para visualización aplicaciones de retroiluminación. Traducción IEEE. Aplica. Ind. 2014, 50, 4077–4081. [Referencia cruzada]
14. Chen, J.-H.; Wang, SC; Liu, Y.-H.; Cheng, Y.-S.; Yang, Z.-Z. Sistema de conducción con retroiluminación LED RGB con capacidad de regulación dinámica de voltaje. En actas de la décima conferencia internacional del IEEE de 2013 sobre electrónica de potencia y sistemas de accionamiento (PEDS), Kitakyushu, Japón, 22 a 25 de abril de 2013; págs. 349–353.
15. Liu, P.-J.; Hong, Z.-Y.; Colgado, C.-C. Un controlador LED RGB de CA-CC de baja potencia y una sola etapa con esquema de control de capacitor de conmutación. Traducción IEEE. Indiana electrón. 2020, 68, 3103–3112. [Referencia cruzada]
16. Kim, J.-S.; Lee, YK; Lee, J.-S.; Shin, Y.-K.; Tark, J.-H.; Ryu, K.-C.; Yang, B.-D. Un controlador de pulso de corriente de conmutación rápida para retroiluminación LED. En Actas del Simposio Internacional IEEE sobre Circuitos y Sistemas de 2009, Taipei, Taiwán, 24 a 27 de mayo de 2009; págs. 1775-1778.
17. Hong, S.-I.; Han, J.-W.; Kim, D.-H.; Kwon, O.-K. Un controlador IC de retroiluminación LED de control de doble bucle para pantallas LCD de tamaño mediano. En Actas de la Conferencia Internacional de Circuitos de Estado Sólido del IEEE de 2010 (ISSCC), San Francisco, CA, EE. UU., 7 a 11 de febrero de 2010; págs. 116-117.
18. Huang, Y.-C.; Chen, H.-W. Un novedoso controlador de pulso de corriente de conmutación rápida para aplicaciones de retroiluminación LED. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE sobre Electrónica de Consumo-Taiwán de 2016 (ICCE-TW), Nantou, Taiwán, 27 a 29 de mayo de 2016; págs. 1–2.
19. Ahn, H.-A.; Hong, S.-K.; Kwon, O.-K. Un regulador de corriente de conmutación rápida que utiliza un método de reducción del tiempo de giro para una alta atenuación relación de controladores de retroiluminación LED. Traducción IEEE. Sistema de circuitos. II Escritos Express 2016, 63, 1014–1018. [Referencia cruzada]
20. Han, H.; Zhang, F.; Liu, M. Método de atenuación PWM para un circuito de intercambio de corriente fijado por condensador en un sistema de retroiluminación LED. IEEE J. Emergente. Sel. Arriba. Electron de potencia. 2018, 6, 1190–1197. [Referencia cruzada]
21. Hong, S.-I.; Nam, K.-S.; Jung, Y.-H.; Ahn, H.-A.; En, H.-J.; Kwon, O.-K. CI de controlador de retroiluminación de diodo emisor de luz confiable y de alta eficiencia energética para la conducción de corriente uniforme de pantallas de cristal líquido de tamaño mediano. J.Inf. Disp. 2012, 13, 73–82. [Referencia cruzada]
22. Lim, B.-M.; Ko, Y.-H.; Jang, Y.-S.; Kwon, O.-H.; Han, SK; Lee, S.-G. Un controlador LED reductor de 200 V y 98,16 % de eficiencia que utiliza control de corriente integrado para mejorar la precisión de la corriente para aplicaciones de retroiluminación LED de una sola cadena a gran escala. Traducción IEEE. Electron de potencia. 2015, 31, 6416–6427. [Referencia cruzada]
23. Parthasarathy, MK; Ganesan, N. Un novedoso controlador de diodo emisor de luz de ocho canales y un solo inductor para visualización de baja potencia aplicaciones de retroiluminación. Turco. J. Electr. Ing. Computadora. Ciencia. 2018, 26, 2130–2139. [Referencia cruzada]
24. Él, J.-P.; Zhang, B.; Gao, X.; Wu, C.-D.; Li, Z.-J.; Zhou, J.-Y. Un método de atenuación analógica LED de voltaje débil de alta precisión. IEEE Acceso 2019, 7, 172362–172373. [Referencia cruzada]
25. Lin, CL; Chen, SC; Deng, M.-Y.; Ho, Y.-H.; Lin, C.-A.; Tsai, CL; Liao, W.-S.; Liu, C.-I.; Wu, CE-E.; Peng, J.-T. Circuito de conducción AM PWM para retroiluminación mini-LED en pantallas de cristal líquido. IEEE J. Dispositivos electrónicos Soc. 2021, 9, 365–372. [Referencia cruzada]
26. Schubert, Diodos emisores de luz EF (2018); Instituto Politécnico Rensselaer: Tory, Nueva York, EE. UU., 2018.
27. Liu, CH-H.; Hsieh, C.-Y.; Hsieh, Y.-C.; Tai, T.-J.; Chen, K.-H. Técnica de tiempo de apagado adaptativo controlado por SAR sin resistencia de detección para lograr un sistema de iluminación LED de alta eficiencia y precisión. Traducción IEEE. Sistema de circuitos. Yo regulo. Papilla. 2009, 57, 1384–1394.
28. Lohaus, L.; Rossio, A.; Dietrich, S.; Wunderlich, R.; Heinen, S. Un controlador LED regulable que utiliza control de retroalimentación DAC resistivo para regulación de voltaje adaptativa. En Actas del Congreso y Exposición de Conversión de Energía IEEE de 2013, Denver, CO, EE. UU., 15 a 19 de septiembre de 2013; págs. 3126–3133.
29. Hsieh, C.-Y.; Wei, Y.-S.; Chen, K.-H.; Lin, T.-C. Controlador LED eficiente con técnica de seguimiento de referencia adaptativa. En Actas de la 16ª Conferencia Internacional IEEE sobre Electrónica, Circuitos y Sistemas de 2009 (ICECS 2009), Yasmine Hammamet, Túnez, 13 a 16 de diciembre de 2009; págs. 291–294.
30. Liu, P.-J.; Hsu, SR-R.; Chang, C.-W.; Liao, C.-Y.; Chien, L.-H. Controlador LED blanco regulable con control de retroalimentación de voltaje adaptativo. En actas de la Segunda Conferencia Internacional sobre Electrónica de Energía del Futuro (IFEEC) del IEEE de 2015, Taipei, Taiwán, 1 a 4 de noviembre de 2015; págs. 1–4.
31. Jung, YH; Hong, SK; Kwon, OK Un controlador LED transitorio rápido con control de frecuencia adaptativo según la variación de carga para Retroiluminación LCD de gran tamaño. J. Soc. Inf. Disp. 2017, 25, 712–724. [Referencia cruzada]
32. Hsu, Y.-C.; Lin, J.-Y.; Chen, CC-P. Controlador LED RGB de alta eficiencia y ahorro de área con voltaje de conducción adaptable y técnica de ahorro de energía. Energías 2018, 11, 1422. [CrossRef]
33. Yong, W.; Baoxing, D.; Yi, L.; Ting, L.; Yintang, Y. Un controlador de retroiluminación LED multicanal de alta eficiencia con alto índice de atenuación. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Industria Electrónica y Automatización de 2017 (EIA 2017), Suzhou, China, 23 a 25 de junio de 2017; págs. 110-116.
34. Hsieh, Y.-T.; Liu, B.-D.; Wu, J.-F.; Fang, C.-L.; Tsai, H.-H.; Juang, Y.-Z. Un controlador LED de alta relación de atenuación para retroiluminación de LCD. Traducción IEEE . Electron de potencia. 2012, 27, 4562–4570. [Referencia cruzada]
35. Chiu, H.-J.; He aquí, Y.-K.; Chen, J.-T.; Cheng, S.-J.; Lin, C.-Y.; Mou, S.-C. Un controlador LED regulable de alta eficiencia para bajo consumo Aplicaciones de iluminación. Traducción IEEE. Indiana electrón. 2009, 57, 735–743. [Referencia cruzada]
36. Hu, Y.; Jiang, L.; Wen, W.; Yan, W.; Ding, R. Un nuevo enfoque de voltaje de accionamiento adaptativo para controladores LED. En Actas de la Conferencia y Exposición de Electrónica de Potencia Aplicada (APEC) de IEEE de 2019, Anaheim, CA, EE. UU., 17 a 21 de marzo de 2019; págs. 721–726.

Machine Translated by Google

37. Wu, CH-H.; Chen, C.-L. Bomba de carga regulada por corriente de alta eficiencia para un controlador LED blanco. Traducción IEEE. Sistema de circuitos. II expreso Resúmenes 2009, 56, 763–767.
38. Mu, H.; Geng, L.; Liu, J. Una fuente de corriente constante de alta precisión aplicada en un controlador LED. En las actas del simposio de 2011 sobre Fotónica y Optoelectrónica (SOPO), Wuhan, China, 16 a 18 de mayo de 2011; págs. 1–4.
39. Sansen, Fundamentos del diseño analógico de WM; Springer Science & Business Media: Berlín, Alemania, 2007; Volumen 859.
40. Hogervorst, R.; Tero, JP; Eschauzier, RG; Huijsing, JH Una entrada/salida de carril a carril CMOS de 3 V compacta y de bajo consumo Amplificador operacional para bibliotecas de células VLSI. IEEE J. Circuitos de estado sólido 1994, 29, 1505–1513. [Referencia cruzada]
41. Surkanti, PR; Mehrotra, D.; Gangineni, M.; Furth, PM Controlador LED de múltiples cadenas con coincidencia de corriente precisa y cancelación dinámica de desajuste de voltaje directo. En actas del 60.º Simposio internacional sobre circuitos y sistemas del Medio Oeste del IEEE de 2017 (MWSCAS), Boston, MA, EE. UU., 6 al 9 de agosto de 2017; págs. 229-232.
42. Shahroury, FR; Ahmad, HH; Abuishmais, I. Aspectos de diseño de un controlador WLED multicadena de salida única que utiliza tecnología CMOS de 40 nm. J. Electrón de baja potencia. Aplica. 2022, 12, 5. [Referencia cruzada]
43. Abuishmais, I.; Shahroury, FR; Ahmad, H. Una metodología de diseño de disipadores de corriente regulables de alta eficiencia para controladores regulados por corriente. Electrónica 2022, 11, 2566. [CrossRef]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Detección de objetos y estimación de distancia estable monocular para Entornos viales: una arquitectura de fusión que utiliza YOLO-RedeCa y un filtro de cambio de salto anormal

hejun lv, Yu Du*, Yan Ma y Ying Yuan

Laboratorio Clave de Ingeniería de Servicios de Información de Beijing, Facultad de Robótica, Universidad Unión de Beijing, Beijing 100101, China; lyuhejun@163.com (HL); jqrmayan@buu.edu.cn (YM); yueeing@163.com (AA)
* Correspondencia: duyu@buu.edu.cn

Resumen: Permitir una percepción ambiental integral rápida y precisa para los vehículos plantea un gran desafío. La detección de objetos y la estimación de distancias monoculares son las dos tecnologías principales, aunque a menudo se utilizan por separado. Por ello, es necesario fortalecer y optimizar la interacción entre ellos. El movimiento de vehículos u oclusiones de objetos pueden provocar variaciones repentinas en las posiciones o tamaños de los cuadros de detección dentro de los datos temporales, lo que genera fluctuaciones en las estimaciones de dist Por lo tanto, proponemos un método para integrar un detector basado en YOLOv5-RedeCa, un rastreador Bot-Sort y un filtro de cambio de salto de anomalías. Esta combinación permite una detección y seguimiento de objetos más precisos. El filtro de salto de anomalías suaviza las variaciones de distancia causadas por cambios repentinos en el tamaño de los cuadros de detección. Nuestro método aumenta la precisión al tiempo que reduce las demandas computacionales, mostrando un rendimiento sobresaliente en varios conjuntos de datos. En particular, en el conjunto de datos KITTI, la desviación estándar de los resultados de rango continuo permanece consistentemente baja, especialmente en escenarios con múltiples oclusiones o desapariciones de objetos. Estos resultados validan la eficacia y precisión de nuestro método en la gestión de tareas duales.

Palabras clave: técnica de conducción automática; detección de objetos; medición de distancia monocular; filtro de kalman

check for updates

Cita: Lv, H.; Du, Y.; Puede.; Yuan, Y. Detección de objetos y monocular Estimación de distancia estable para la carretera Entornos: una arquitectura de fusión Uso de YOLO-RedeCa y filtro de cambio de salto anormal. Electrónica 2024, 13, 3058. https://doi.org/10.3390/electrónica13153058

Editor Académico: Felipe Jiménez

Recibido: 24 de junio de 2024
Revisado: 19 de julio de 2024
Aceptado: 26 de julio de 2024
Publicado: 2 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

La percepción y comprensión eficientes del entorno de la carretera son cruciales para la tecnología de conducción autónoma [1]. Sin embargo, lograr una percepción integral del entorno circundante para los vehículos plantea un problema desafiante. Este sistema de percepción integral realiza múltiples tareas. Detecta varios objetos alrededor del vehículo. Además, obtiene las distancias entre estos objetos y el vehículo. Por lo tanto, nos centramos en métodos que logran tareas duales. Nuestros métodos detectan simultáneamente objetos alrededor del vehículo y determinan la distancia a estos objetos. Se pueden encontrar más detalles en la Figura 1.

En la conducción autónoma, la detección precisa de objetos es crucial para la estimación dinámica de la distancia, lo que afecta directamente la seguridad y eficiencia del sistema [2]. La estimación dinámica de la distancia, como parte de la percepción de nivel superior, puede simular la percepción intuitiva de los conductores humanos.

Los métodos existentes de medición de distancias basados en radar y visión estereoscópica, aunque efectivos, enfrentan desafíos tales como altos costos, complejidad del sistema y bajo rendimiento en tiempo real . Además, vale la pena explorar si la tecnología actual de percepción a vista de pájaro (BEV) requiere un apoyo más profundo de las características visuales humanas [3]. Los métodos de medición de distancia monocular existentes carecen de solidez cuando se trata de cambios repentinos de valores, lo que afecta directamente la percepción y la calidad de la toma de decisiones de los sistemas de conducción autónomos en entornos dinámicos.

Machine Translated by Google

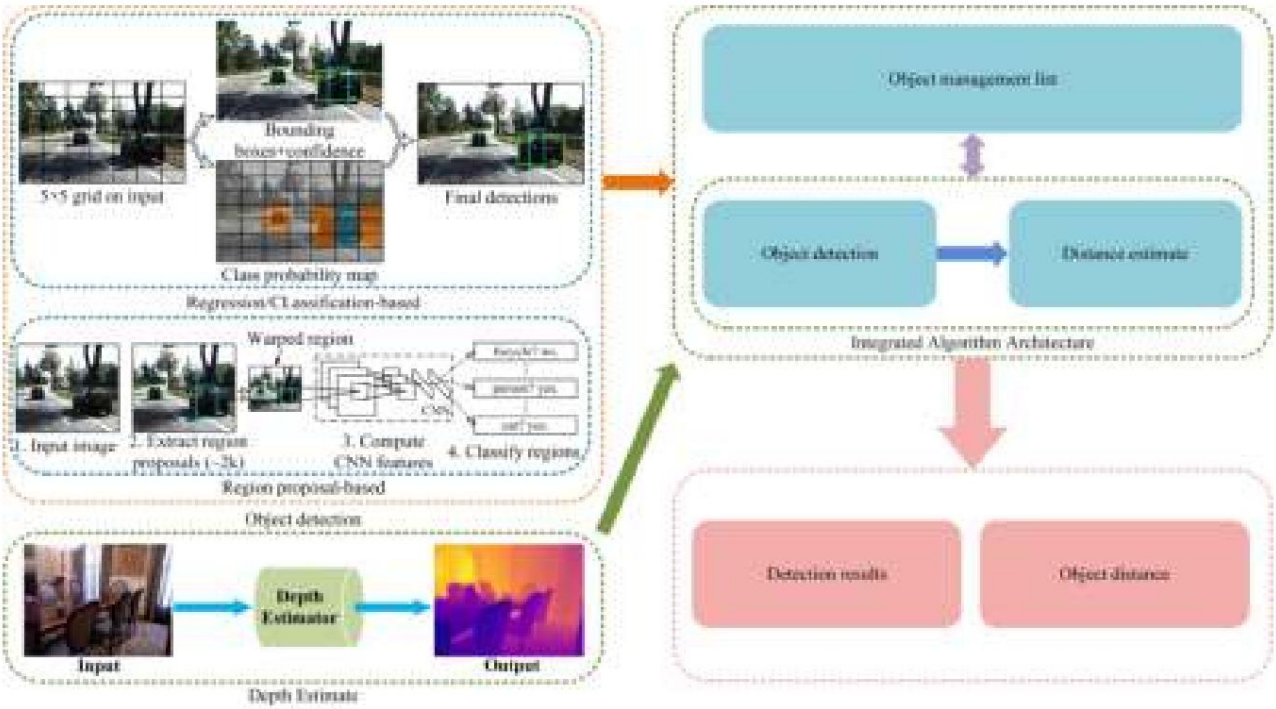


Figura 1. El lado izquierdo es el marco principal de detección de objetos con estimación de profundidad monocular. A la derecha está la arquitectura del algoritmo que vamos a implementar y el resultado.

El objetivo de este estudio es proponer un método de medición de distancia monocular. Este El método tiene como objetivo detectar objetos y determinar la distancia entre los objetos y el vehículo. Al combinar los métodos de filtro de salto de anomalía y YOLOv5-RedeCa, el El enfoque pretende mejorar la precisión y solidez de la estimación dinámica de distancias. abordando así los desafíos de percepción y toma de decisiones en entornos dinámicos. Nuestro método demuestra un potencial significativo en la extracción de características y la estimación de distancias . Además, proporcionará información perceptual más rica y confiable para sistemas de conducción autónomos, mejorando así significativamente la seguridad y la eficiencia de la conducción . Esto convierte a nuestro método en un candidato prometedor para avances revolucionarios en Tecnología de conducción autónoma.

Revisión de trabajos anteriores en el campo de la detección de objetos 2D, basados en propuestas de regiones Los métodos (por ejemplo, R-CNN) [4] han mejorado significativamente la precisión de la detección a través de un enfoque de detección de dos etapas, funcionando excepcionalmente bien en entornos complejos. Sin embargo, son relativamente lentos en el cálculo. Por el contrario, aunque los detectores de una sola etapa (por ejemplo, YOLO) [5] comprometen ligeramente la precisión, predicen directamente las posiciones y categorías de objetos en una imagen mediante regresión/clasificación, simplificando el modelo. estructura y proceso de cálculo, haciéndolos adecuados para el procesamiento en tiempo real [6]. Por lo tanto, los utilizamos como base para nuestro detector.

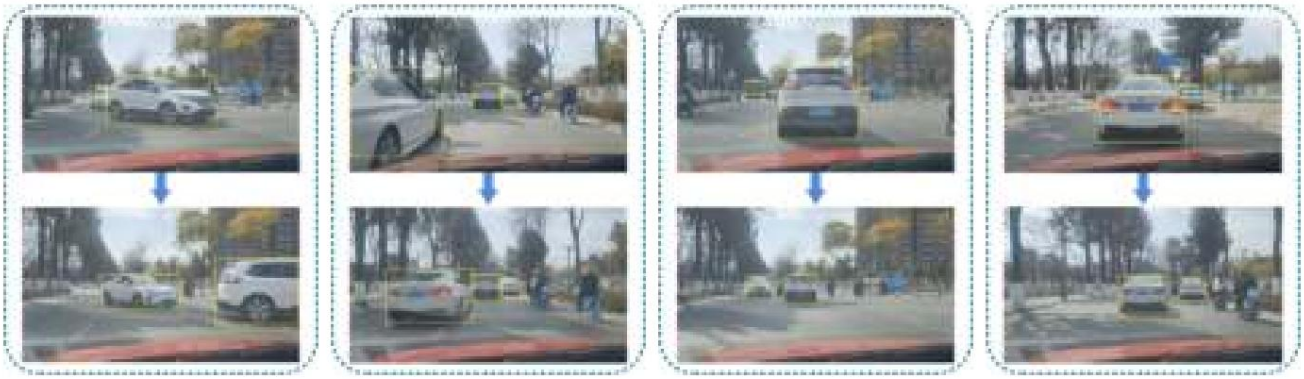
La detección de objetos por sí sola no puede percibir completamente el entorno sin información a distancia [7]. Los métodos tradicionales de estimación de profundidad utilizan señales monoculares o diseñadas manualmente. características [8,9], pero a menudo tienen un rendimiento inferior en diferentes escenarios de profundidad.

El aprendizaje profundo, especialmente con redes neuronales convolucionales (CNN), ofrece mapeo de píxel a profundidad [10]. Las redes multiescala y las funciones de pérdida invariantes de escala tienen precisión mejorada en la estimación de profundidad. A diferencia de los métodos tradicionales, el aprendizaje profundo genera automáticamente mapas de disparidad e información de profundidad sin anotaciones extensas, generalmente utilizando secuencias de video o imágenes estéreo. Sin embargo, estos métodos requieren sustancial recursos computacionales.

En la conducción autónoma, información continua de detección de objetos desde el dominio del tiempo. Se utiliza para rastrear objetos y estimar distancias. Sin embargo, las vibraciones causadas por el vehículo El movimiento y las oclusiones pueden alterar la estabilidad de los objetos en la secuencia de vídeo. Esto puede

Machine Translated by Google

provocar cambios repentinos en la posición o el tamaño de los cuadros de detección, como se muestra en la Figura 2. Por tanto, es necesario suavizar los cuadros de detección.



(a) (b) (C) (d)

Figura 2. Se ilustran los cuadros delimitadores para capturas ideales y no ideales de objetos de la escena de la carretera. (a – d) representan cuadros consecutivos de cuatro secuencias de video distintas. En (a,b), las dimensiones del cuadro delimitador exhiben cambios abruptos cuando el objeto objetivo sufre eventos repentinos de aparición, desaparición u oclusión. Por el contrario, (c,d) representan escenarios en los que el objetivo es claramente visible y el cuadro delimitador encapsula con precisión el objeto objetivo en condiciones normales.

Aunque los algoritmos para la detección de objetos 2D han logrado avances significativos, siguen estando especializados. Del mismo modo, los algoritmos de estimación de profundidad monocular han avanzado considerablemente. Sin embargo, la investigación en estos dos campos sigue estando relativamente separada. Aún falta integración entre la detección de objetos y la estimación de profundidad. En las investigaciones existentes, la detección de objetos a menudo carece de una estimación de profundidad integrada, y la estimación de profundidad no incluye capacidades de reconocimiento de objetos. Esta situación pone de relieve una necesidad urgente. Desarrollar un sistema integrado que combine la detección de objetos y la estimación de profundidad es esencial. Un sistema de este tipo optimizaría la interacción entre las dos técnicas. En consecuencia, mejoraría su eficiencia en aplicaciones prácticas.

Por lo tanto, proponemos y diseñamos una arquitectura de algoritmo holístico que fusiona objetos Detección y estimación de distancia. Nuestras principales aportaciones son las siguientes:

1. Diseñamos el módulo RedeCa para mejorar la capacidad de extracción de características, permitiendo una detección de objetos más precisa en escenarios de tráfico rodado. Para garantizar el rendimiento en tiempo real, utilizamos una arquitectura de red convolucional profundamente separable.
2. Integramos un mecanismo de asociación de múltiples cuadros para mejorar la robustez del algoritmo en casos de oclusión de objetos o pérdida temporal, permitiendo el seguimiento y alcance simultáneo de múltiples objetos diferentes.
3. Diseñamos un filtro de cambio de salto de anomalías para mejorar la precisión y solidez de la estimación de distancia. Este filtro elimina anomalías causadas por cambios repentinos en el tamaño del cuadro de detección dentro de un marco. Suaviza la variación en la distancia del objeto. En consecuencia, se mejora la fiabilidad de la determinación de distancias.

Nuestro algoritmo propuesto ganó la medalla de oro en la 3.ª Conferencia sobre vehículos inteligentes conectados de China (shenyang). También logró la medalla de bronce en el grupo de control de percepción y decisión en la Competencia de Simulación Virtual Metaverso del World Intelligent Driving Challenge 2023.

2. Trabajo relacionado

En el campo de la conducción autónoma, cómo hacer que el vehículo perciba plenamente su entorno es un problema desafiante. Esta percepción integral incluye no sólo la detección de diversos objetos circundantes, sino también la medición de la distancia entre estos objetos y el vehículo. Actualmente, el uso de cámaras de luz visible es un enfoque común y rentable para abordar este problema. Equipadas con elementos fotosensibles, las cámaras de luz visible pueden capturar imágenes en color del mundo real. Investigadores

Machine Translated by Google

realice un análisis en profundidad de estas imágenes en color para realizar tareas clave de percepción, como la detección de objetos y la estimación de distancias.

Detección de objetos de tráfico. La detección de objetos es uno de los problemas centrales en el campo de la visión por computadora [11]. Tiene como objetivo clasificar y determinar la posición de objetos en imágenes. Las redes neuronales convolucionales profundas (DCNN) han brindado un fuerte apoyo para el desarrollo de técnicas de detección de objetos con sus excelentes capacidades de representación de características [12,13]. Comúnmente, las principales arquitecturas para la detección de objetos se pueden dividir en dos categorías: métodos de detección de objetos basados en propuestas de región y métodos de detección de objetos basados en regresión/clasificación [6]. Cada uno de ellos tiene sus propias características y aborda diferentes desafíos técnicos.

Los modelos representativos de arquitecturas de detección de objetos basadas en propuestas regionales incluyen RCNN [4] y sus mejoras posteriores, como SPPNet [14], Fast RCNN [15], Faster R-CNN [16], Mask RCNN [17] y R-FCN. [18]. La primera etapa de estas arquitecturas genera propuestas de regiones candidatas. La segunda etapa realiza una clasificación detallada y un refinamiento del cuadro delimitador en estas regiones. Este procesamiento por etapas mejora en gran medida la precisión de la detección, mostrando particularmente un rendimiento excelente en fondos complejos. Por ejemplo, para abordar el problema de la baja velocidad de generación de propuestas, Faster R-CNN presenta la red de propuestas regionales (RPN). Es importante mejorar la calidad y rapidez de las propuestas.
Mask RCNN predice aún más las máscaras de objetos agregando una rama paralela, lo que permite que el modelo realice tanto la detección de objetos como la segmentación de instancias simultáneamente. Esto es particularmente valioso en aplicaciones que requieren información visual detallada.

Para simplificar la estructura del modelo y los procesos computacionales, las arquitecturas de detección de objetos basadas en regresión/clasificación están diseñadas para predecir posiciones y categorías de objetos directamente en imágenes, como OverFeat [19], la serie YOLO [20-25], SSD [26], DSSD. [27] y FSSD [28]. La principal ventaja de estas arquitecturas es su alta velocidad de detección, lo que las hace adecuadas para escenarios de procesamiento en tiempo real. Entre ellos destaca la serie YOLO . Al reformular el problema de detección como una única tarea de regresión, se pueden predecir simultáneamente las categorías y posiciones de múltiples objetos en un único paso hacia adelante de la red. Para abordar de manera efectiva los desafíos de detección de objetos de varios tamaños y mejorar la capacidad del modelo para detectar objetos pequeños, SSD introduce el concepto de mapas de características de múltiples escalas.

Estimación de profundidad monocular. La búsqueda de determinar la distancia entre los objetos y la cámara ha seguido siendo un foco de investigación fundamental dentro del dominio de la visión por computadora desde sus inicios. En los enfoques iniciales, la estimación de la profundidad monocular se basaba principalmente en la forma a partir del sombreado (SFS) y la profundidad desde el enfoque/desenfoque (DFF/DFD). SFS infiere la forma del objeto basándose en cambios en la iluminación de su superficie [29]. Las técnicas DFF/DFD estiman la profundidad utilizando información enfocada y desenfocada en las imágenes junto con los parámetros de calibración de la cámara [30]. La suposición fundamental es que las partes enfocadas de la imagen son más claras, mientras que las partes desenfocadas se vuelven borrosas gradualmente. Aunque son efectivos en escenarios específicos, estos métodos a menudo se basan en suposiciones de escena adicionales y exhiben un rendimiento deficiente cuando se enfrentan a escenas con una profundidad de campo significativa.

Con el avance de la tecnología de aprendizaje automático, los investigadores han comenzado a enmarcar el problema de estimación de profundidad de un solo píxel como un problema de aprendizaje probabilístico basado en campos aleatorios. Por ejemplo, optimizar mapas de profundidad utilizando el campo aleatorio de Markov (MRF) [8,31] y modelar probabilidades posteriores con campo aleatorio condicional (CRF) para la estimación de profundidad [9]. El poder computacional mejorado de las unidades de procesamiento de gráficos (GPU) y la disponibilidad de conjuntos de datos de imágenes a gran escala han impulsado el aprendizaje profundo, allanando el camino para nuevas direcciones de investigación en estimación en profundidad.

Las técnicas de aprendizaje profundo normalmente requieren datos profundos reales como etiquetas de entrenamiento. Estas técnicas asignan directamente píxeles a valores de profundidad mediante la construcción de redes neuronales convolucionales (CNN). Árbitros. [32,33] fueron los primeros en aplicar CNN en el campo de la estimación de profundidad Emplearon una estrategia de red de múltiples escalas. Una red global de estimación aproximada proporciona estimaciones iniciales de distancia. Además, una red de refinamiento local optimiza los detalles. Introdujeron una función de pérdida invariante de escala para manejar errores. Estudios posteriores

Machine Translated by Google

han mejorado aún más la precisión de la estimación al refinar las estructuras de la red [29,34–36] e integrar información auxiliar [37,38]. Algunas investigaciones no se basan en una gran cantidad de datos de profundidad etiquetados. En su lugar, utilizan secuencias de vídeo o imágenes estéreo para derivar automáticamente mapas de disparidad e información de profundidad mediante algoritmos de aprendizaje profundo. Por ejemplo, Ref. [39] procesan la vista izquierda utilizando una red neuronal convolucional. Esto genera un mapa de disparidad. Luego, reconstruyen la vista izquierda combinándola con la vista derecha mediante un mapeo inverso. El error de reconstrucción se utiliza como señal de supervisión para el entrenamiento. Árbitro. [40] procesa simultáneamente las vistas izquierda y derecha para optimizar la generación de mapas de disparidad, lo que permite una estimación precisa de la profundidad incluso cuando solo se utilizan imágenes monoculares durante las pruebas. Además, la Ref. [41] deriva la pose y la profundidad de secuencias de vídeo de fotogramas consecutivos, lo que demuestra la eficacia de combinar múltiples modelos de red para la reconstrucción de la vista. Si bien estos métodos logran un buen rendimiento, tienen un costo computacional significativo.

Se han logrado avances significativos en la detección de objetos 2D y la estimación de profundidad monocular. Pero los dos permanecen en gran medida separados en la investigación, sin que se observe una integración efectiva. En la actualidad, los sistemas de detección de objetos a menudo carecen de la capacidad de estimar el alcance. Y el sistema de estimación de profundidad no integra la capacidad de reconocimiento de objetos. Esta separación sugiere una necesidad de desarrollo. Es necesaria una arquitectura algorítmica holística. Una arquitectura de este tipo debería integrar la detección de objetos y la estimación del alcance. Esta integración mejoraría la sinergia entre estas dos técnicas. En consecuencia, optimizaría su rendimiento en aplicaciones prácticas.

3. Método

Para abordar la integración de la detección de objetos y la estimación de distancias, diseñamos y desarrollamos una arquitectura algorítmica. Consta de tres componentes principales: un detector basado en YOLOv5-RedeCa, un rastreador de objetos múltiples y un filtro de cambio de salto de anomalías. En escenarios de conducción autónoma, los vehículos a menudo se encuentran con entornos complejos y dinámicos con múltiples objetos que se mueven de forma autónoma y que pueden aparecer repentinamente, quedar ocluidos o superponerse [21]. Estas situaciones imponen requisitos estrictos sobre la precisión y solidez del algoritmo. Además, debido a la alta velocidad del movimiento del vehículo, el algoritmo debe procesar los datos del sensor y reaccionar en milisegundos para garantizar la seguridad del vehículo. Por tanto, los sistemas de conducción autónoma requieren un algoritmo de percepción con alta precisión y robustez.

Para estos fines, diseñamos el módulo RedeCa, que mejora la arquitectura del algoritmo de detección de objetos, mejorando la precisión de la localización de objetos en escenarios viales. Además, integramos el rastreador Bot-Sort. Este rastreador emplea un mecanismo de asociación de múltiples cuadros. Mejora la solidez del algoritmo cuando se encuentra una oclusión de un objeto o una pérdida temporal. Por tanto, el método puede rastrear simultáneamente varios objetos y estimar sus distancias. El enfoque también evalúa periódicamente la continuidad del seguimiento, monitorea cambios significativos en el estado del objeto y verifica la estabilidad del proceso de seguimiento. Para mejorar la precisión y solidez de la estimación de distancia, también integramos un filtro de cambio de salto de anomalía. El filtro suaviza eficazmente la variación en la distancia del objeto y elimina posibles anomalías causadas por cambios repentinos en el tamaño del cuadro de detección. De este modo, puede mejorar la fiabilidad de la medición de distancias. La arquitectura general se ilustra en la Figura 3.

Al implementar YOLOv5-RedeCa, nuestro método mejora la precisión en el reconocimiento de objetos y refina la precisión del cuadro delimitador en los cuadros de video. Además, calculamos las distancias entre los objetos y la cámara utilizando un sofisticado modelo de imágenes físicas.

Para rastrear y medir múltiples objetos de manera efectiva, integramos el rastreador Bot-Sort. Este mecanismo de asociación de múltiples cuadros mejora significativamente la robustez en escenarios con oclusiones o pérdida temporal de objetos. Incluso si el objeto desaparece temporalmente de la vista en ciertos fotogramas, continúa rastreando y midiendo la distancia de manera consistente. Asignamos identificadores únicos a los objetos recién detectados mediante una secuencia incremental. Luego, utiliza Bot-Sort para unirlos con objetos existentes, distinguiendo entre aquellos que tienen

Machine Translated by Google

recién aparecidos y aquellos que ya están siendo rastreados. Para los objetos que coinciden correctamente, se actualiza su información de estado y se conservan los identificadores originales. Por el contrario, a los nuevos objetos se les asignan nuevos registros de seguimiento e identificadores. Si no se detecta un objeto en el cuadro actual, su entrada se conserva temporalmente. Si el objeto no reaparece dentro de un período predeterminado, será eliminado de la lista de seguimiento.

Ahora, la mayoría de los métodos de medición monocular se centran principalmente en la precisión de imágenes individuales, pasando por alto la correlación de los cambios de distancia entre fotogramas consecutivos en el dominio temporal. Por lo tanto, proponemos una estrategia de análisis de datos de múltiples cuadros que integra el filtrado de Kalman. No sólo mejora la precisión y solidez de la estimación de distancias, sino que también ayuda en el análisis detallado de los patrones de movimiento del objeto y las tendencias en los cambios de distancia. El filtrado de Kalman suaviza las variaciones de distancia analizando los cambios en el mismo objeto en fotogramas consecutivos. También elimina posibles errores causados por cambios abruptos en el tamaño de los cuadros de detección de un solo cuadro.

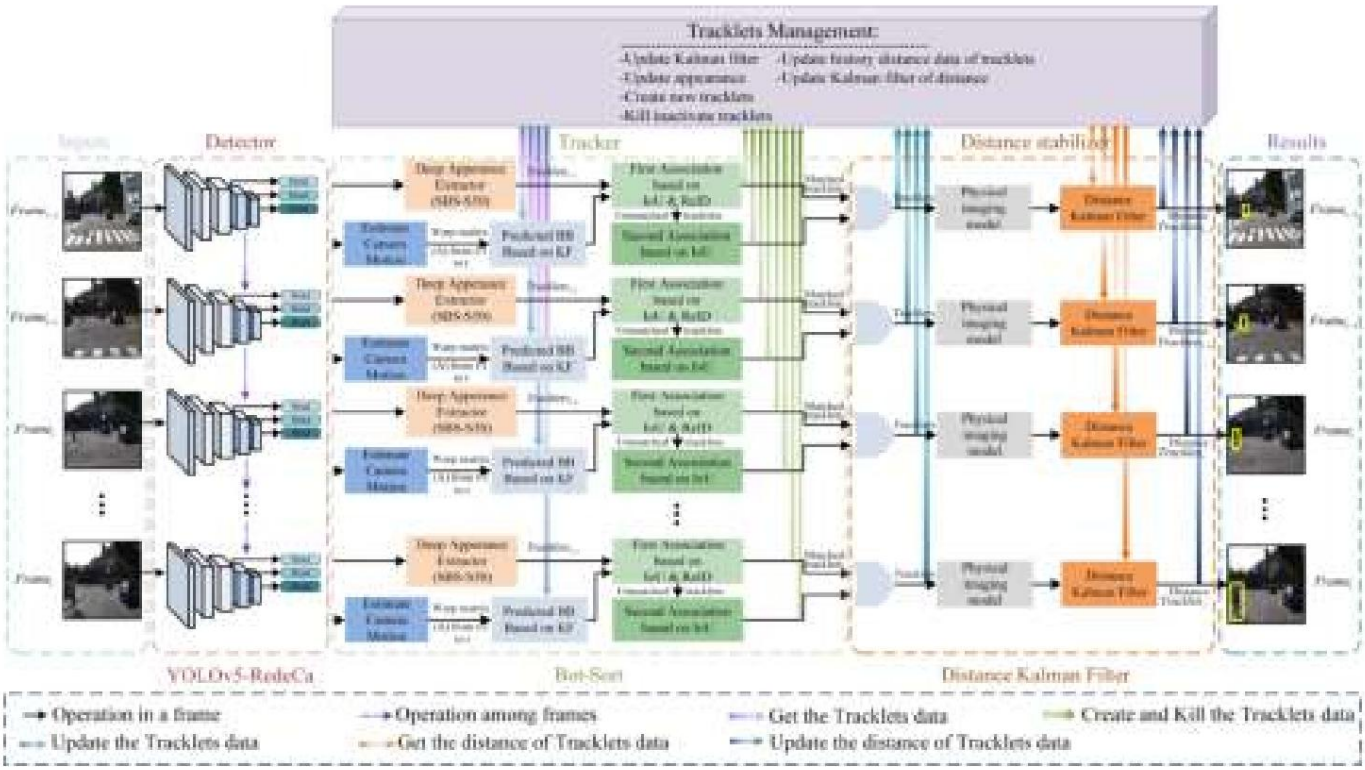


Figura 3. El gráfico de la arquitectura general.

3.1. Detección de

objetos Para garantizar un reconocimiento preciso de objetos y una extracción precisa del cuadro delimitador en cada cuadro de video, empleamos el algoritmo de detección de objetos YOLOv5. Sirve como marco central para nuestro módulo de detección, que se basa en redes neuronales convolucionales profundas . YOLOv5 predice la clase y posición de los objetos, es decir, los cuadros delimitadores, directamente desde la imagen de entrada en un solo paso hacia adelante. En comparación con los métodos de detección de dos etapas , que primero extraen regiones candidatas y luego las clasifican, YOLOv5 mejora considerablemente la velocidad y la eficiencia de la detección. Utiliza una red convolucional profunda para extraer características de las imágenes, extrayendo progresivamente características cada vez más co Mejora su capacidad para reconocer varios objetos. Al integrar una red piramidal de características (FPN), YOLOv5 combina mapas de características de diferentes niveles, mejorando así sus capacidades de detección en una variedad de tamaños de objetos.

Teniendo en cuenta la diversidad de tamaños de objetos en escenas de carreteras, la precisión de la detección de objetos y los requisitos específicos del tráfico rodado, hemos mejorado la arquitectura de red YOLOv5. Primero, integramos el módulo RedeCa en los bloques residuales. Esto permite una detección más precisa de objetos más pequeños bajo diferentes condiciones de iluminación y

Machine Translated by Google

Cambios de clima. Luego, reemplazamos las convoluciones tradicionales en los bloques residuales con convoluciones separables en profundidad. Este cambio reduce la cantidad de parámetros en la red y mejora el rendimiento en tiempo real. La arquitectura de la red YOLOv5-RedeCa se muestra en la Figura 4.

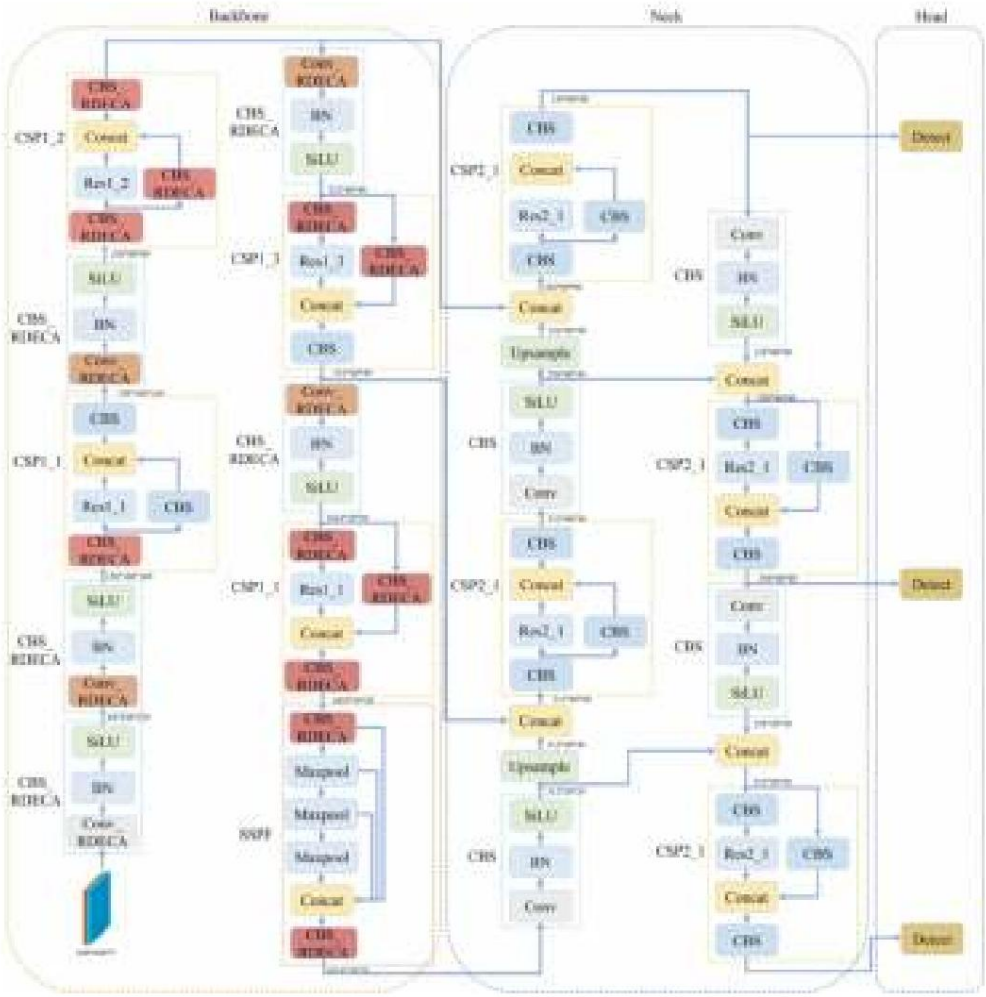


Figura 4. Diagrama de arquitectura de red YOLOv5-RedeCa.

Módulo RedeCa

YOLOv5 ha demostrado un rendimiento sobresaliente en una amplia gama de escenarios de detección. Sin embargo, el complejo entorno vial exige un enfoque versátil para adaptarse a los diversos tipos y tamaños de objetos de tráfico. Para abordar este desafío, optimizamos la estructura de red de YOLOv5, específicamente diseñando el módulo RedeCa para mejorar la precisión del reconocimiento de objetos de tráfico de varios tamaños. Como se muestra en la Figura 5, el módulo RedeCa se basa en un bloque residual. Incorpora una secuencia de bloques de convolución residuales separables en profundidad y módulos ECA para mejorar las capacidades de extracción de caracter

Las convoluciones separables en profundidad reducen notablemente la cantidad de parámetros y la carga computacional en los modelos. Esto se logra dividiendo las convoluciones estándar en dos operaciones más simples: convoluciones en profundidad y convoluciones puntuales. El proceso se detalla en la Figura 6. Implica primero aplicar convolución profunda de forma independiente a cada canal de entrada. Luego, la convolución puntual agrega estas salidas utilizando núcleos de convolución 1 × 1. Este enfoque reduce en gran medida el recuento de parámetros y las demandas computacionales, lo que reduce el uso de memoria y el consumo de energía. En consecuencia, hace que el modelo sea más adecuado para su implementación en dispositivos con recursos limitados.

Machine Translated by Google

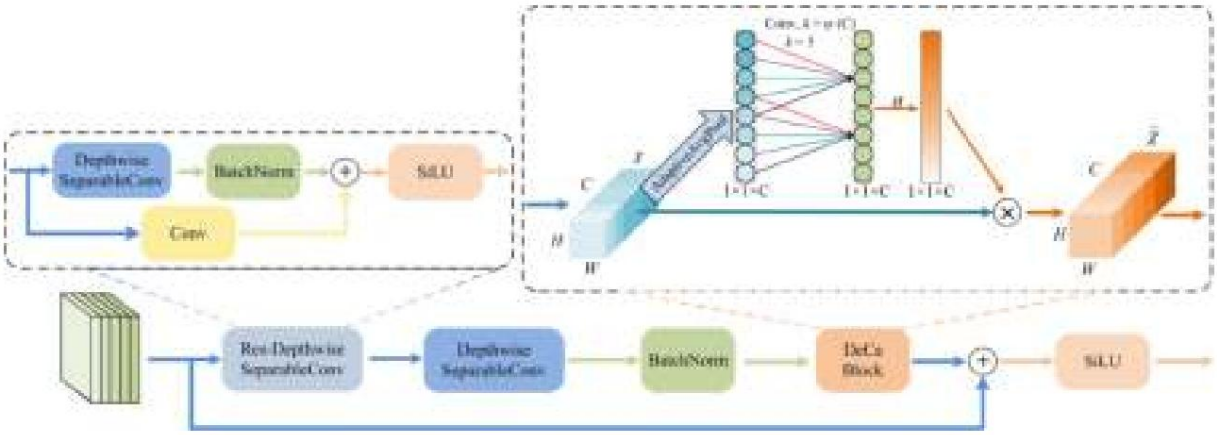


Figura 5. El gráfico de la estructura de RedeCa.

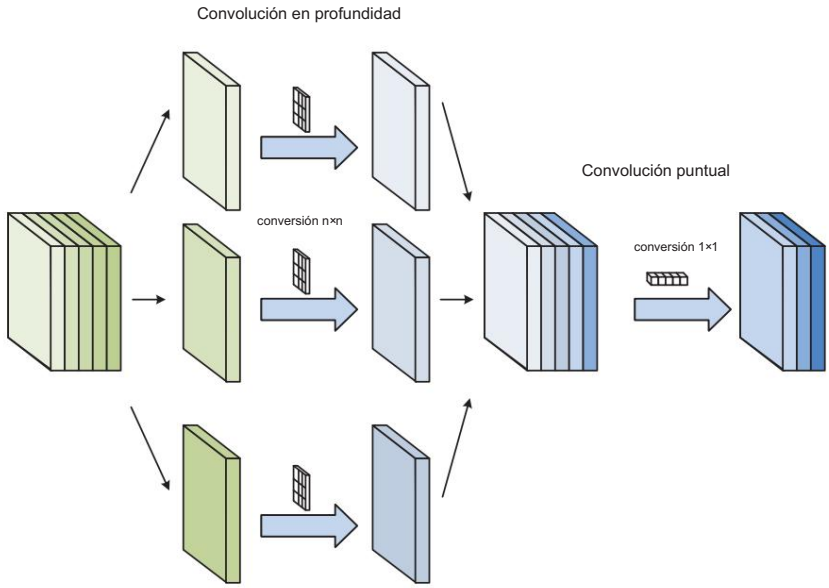


Figura 6. El gráfico de la estructura convolucional separable en profundidad.

Las convoluciones separables en profundidad minimizan el riesgo de sobreajuste, lo cual es particularmente crucial cuando se entrenan modelos con datos limitados.

Al reducir el número de parámetros, el entrenamiento se vuelve más simple y la probabilidad de sobreajuste se reduce. Mejora la capacidad de generalización del modelo en el mundo real. aplicaciones. La complejidad computacional asociada con las convoluciones separables en profundidad se detalla a continuación.

Convolución en profundidad:

$$\text{ParamDC} = K \times K \times \text{Cin} \quad (1)$$

$$\text{FLOPSDC} = \text{Hout} \times \text{Wout} \times K \times K \times \text{Cin} \quad (2)$$

Convolución puntual:

$$\text{ParamPC} = \text{Cin} \times \text{Cout} \quad (3)$$

$$\text{FLOPSPC} = \text{Hout} \times \text{Wout} \times \text{Cin} \times \text{Cout} \quad (4)$$

Machine Translated by Google

Convoluciones separables en profundidad:

$$ParamDW = ParamDC + ParamPC \quad (5)$$

$$FLOPSDW = FLOPSDC + FLOPSPC \quad (6)$$

donde ParamDC cuantifica el recuento de parámetros asociados con la convolución en profundidad y FLOPSDC delinea las demandas computacionales necesarias para la convolución en profundidad . En consecuencia, ParamPC especifica el recuento de parámetros para la convolución puntual, mientras que FLOPSPC caracteriza sus demandas computacionales. Además, ParamDW es indicativo del recuento de parámetros en una convolución separable en profundidad, y FLOPSDW aclara las demandas computacionales para este tipo de convolución.

El módulo RedeCa se inicia con un bloque de convolución separable en profundidad que integra principios de una red residual. Utiliza el mapeo de identidad para mejorar la eficiencia del aprendizaje de las capas profundas de la red. Combina la alta eficiencia de los parámetros de las convoluciones separables en profundidad con la capacidad de aprendizaje rápido de las conexiones residuales, mejorando así la capacidad de extracción de características del módulo. Y luego, se integra un bloque de convolución estándar separable en profundidad para reducir efectivamente la complejidad y las demandas computacionales del modelo. Finalmente, el módulo deca ajusta las dependencias entre canales , optimizando dinámicamente las respuestas de las características para mejorar la precisión de la detección de objetos.

La formulación matemática del módulo RedeCa es la siguiente:

$$F^{res}_{DWConv} = SiLU(BN(DWConv(F\quad)) + Conv(F\quad)) \quad (7)$$

$$FDWConv = BN(Punto(Profundidad(F^{res}_{DWConv}))) \quad (8)$$

$$F_{RedeCa} = SiLU(FDWConv \times \sigma(Conv(AdaptAvgPool(FDWConv))) + F\quad) \quad (9)$$

donde F representa la entrada del mapa de características de la capa anterior.

3.2. Mejora de la solidez de la asociación de cuadros múltiples en la estimación de distancias

En la detección de objetos y la estimación de distancias en escenas de tráfico no basta con actuar sobre un único objeto. En aplicaciones prácticas, es necesario estimar con precisión la distancia de múltiples objetos simultáneamente. Y estos objetos pueden sufrir apariciones, oclusiones, superposiciones o desapariciones repentinas. Nuestro método propuesto integra el rastreador Bot-Sort, asignando un identificador único a cada objeto en cada cuadro, lo que facilita la identificación y el seguimiento efectivos de los objetos. Aunque los algoritmos de alcance monocular existentes han mejorado la precisión en imágenes individuales, a menudo pasan por alto la coherencia de los cambios de distancia para el mismo objeto en fotogramas consecutivos. Ignorar esta coherencia puede provocar fluctuaciones en las mediciones de distancia, especialmente cuando el tamaño del cuadro delimitador de la detección del objeto cambia drásticamente en un período corto. Nuestro método mejora la precisión y la solidez de la estimación de distancias mediante la integración de técnicas de filtrado de Kalman en datos de series temporales. El enfoque suaviza las variaciones en las distancias de los objetos y elimina las anomalías causadas por cambios repentinos en los tamaños de los cuadros de detección de un solo cuadro, lo que resulta en un rendimiento superior en escenarios de tráfico en tiempo real.

3.2.1. Clasificación de bots

En el ámbito del análisis visual del tráfico rodado, la mera detección y estimación de la distancia de objetos individuales no es suficiente. Lo más importante en este campo es la capacidad de medir con precisión las distancias de múltiples objetos dentro de una escena y asignar identificadores distintos a cada uno para un seguimiento y diferenciación efectivos. Nuestro método integra el rastreador Bot-Sort, un algoritmo avanzado que identifica y analiza hábilmente cada objeto dentro de los cuadros de video, determinando nuevos objetos para el seguimiento. La metodología del Algoritmo 1 se delinea en forma de pseudocódigo [43].

Machine Translated by Google

Algoritmo 1 Flujo de trabajo del sistema de seguimiento de objetos basado en cuadros

```
Entrada: fotogramas de vídeo
Salida: Trayectorias de objetos rastreados para
cada cuadro en Video haga
    Detectar objetos potenciales usando YOLOX
    Estimar la matriz de transformación del movimiento de la cámara del fotograma anterior
    Extraiga funciones para objetos detectados utilizando el modelo SBS-S50
    Predecir ubicaciones de objetos en el cuadro actual usando el filtro de Kalman
    Primera asociación basada en puntuaciones fusionadas de IoU y ReID
Haga coincidir las detecciones actuales con los tracklets existentes
    Segunda asociación para tracklets inigualables basados en IoU
Actualizar la información del estado de los tracklets
    Cree nuevos tracklets y asigne nuevos identificadores únicos
Eliminar tracklets inactivos si no se detectan dentro de un período determinado
    (Opcional) Interpolar partes faltantes en tracklets
final para
regreso Trayectorias completadas para todos los objetos
```

BoT-SORT es un sistema superior de seguimiento de objetos múltiples que mejora significativamente la precisión del seguimiento mediante la integración sinérgica de datos de movimiento y apariencia visual. El sistema aprovecha los filtros Kalman avanzados junto con técnicas de compensación del movimiento de la cámara para manejar hábilmente la dinámica del mundo real. Combina de manera distintiva Intersección sobre Unión (IoU) con medidas de distancia de coseno de algoritmos de Reidentificación (ReID) para establecer asociaciones de objetos consistentes y confiables, particularmente en entornos densamente dinámicos.

3.2.2. Identificación y mantenimiento de objetos

Nuestro método incorpora la siguiente lógica para la identificación y el mantenimiento de objetos. En primer lugar, para los objetos recién detectados, el método asigna a cada objeto un identificador único a través de una secuencia incremental para diferenciar entre diferentes objetos de seguimiento. Posteriormente , el método aplica el algoritmo Bot-Sort. Compara objetos recién descubiertos con aquellos ya rastreados para determinar su estado.

Para los objetos coincidentes exitosamente, el sistema actualiza su información de estado en la lista de seguimiento, manteniendo sin cambios sus identificadores únicos originales. Los objetos que aparecen recientemente se crean como nuevas entradas de seguimiento y se les asignan nuevos identificadores únicos. Si un objeto rastreado no se detecta en el cuadro actual, posiblemente debido a una oclusión o a una salida del campo de visión, el método conserva temporalmente su entrada y su ID. Si el objeto no reaparece dentro del tiempo establecido, será eliminado de la lista de seguimiento.

3.2.3. Filtro de cambio de salto de anomalía

Al modelar el movimiento de un objeto en el plano de la imagen, normalmente utilizamos un filtro de Kalman discreto equipado con un modelo de velocidad constante. El vector de estado de este filtro se define como un séptuplo, $x = [xc, yc, s, a, \dot{x}c, \dot{y}c, \dot{s}]^t$ donde (xc, yc) especifica las coordenadas 2D del centro del objeto dentro del plano de la imagen. Aquí, s significa la escala (área) del cuadro delimitador y a indica su relación de aspecto. Para aumentar la precisión y la resiliencia de la estimación de distancia, estabilizar las variaciones en la distancia del objeto y abordar anomalías potencialmente provocadas por cambios abruptos en los tamaños de los cuadros de detección dentro de un marco, el vector de estado se expande a un óctuplo, $x = [xc, yc, a, h, \dot{x}c, \dot{y}c, \dot{a}, \dot{h}]^T$. En consecuencia, el vector de estado del filtro de Kalman (KF) se define como se representa en la ecuación (10) y el vector de medición se delinea en la ecuación (11).

$$xk = [xc(k), yc(k), a(k), h(k), \dot{x}c(k), \dot{y}c(k), \dot{a}(k), \dot{h}(k)]T \quad (10)$$

$$zk = [zxc(k), zyc(k), za(k), zh(k)]T \quad (11)$$

Machine Translated by Google

Este enfoque, que integra el filtrado de Kalman en el análisis de series temporales, está diseñado para mejorar significativamente la precisión y solidez de la estimación de distancias. El algoritmo del filtro de Kalman suaviza metódicamente las fluctuaciones en las distancias de los objetos mediante la realización de un análisis de datos históricos. Aborda eficazmente las anomalías que surgen de cambios repentinos en el tamaño de los cuadros de detección dentro de marcos individuales. La predicción del estado del algoritmo se formula en las ecuaciones (12) y (13), mientras que el mecanismo de actualización de la observación se detalla en las ecuaciones (14) a (16).

$$X = Fkx\hat{}\ k-1|k-1 + Bkuk\ k|k-1 \quad (12)$$

$$Pk|k-1 = FkPk-1|k-1F_k^t + Qk \quad (13)$$

donde $x\hat{}\ k|k-1$ representa el estado predicho, Fk es la matriz de transición de estado, Bk denota el modelo de entrada de control, uk es el vector de control, Pk|k−1 es la covarianza predicha y Qk significa la covarianza del ruido del proceso.

$$Kk = Pk|k-1H_k^t\ (HkPk|k-1H_k^t + Rk)^{-1} \quad (14)$$

$$x\hat{} = x\hat{}\ k|k\ k|k-1 + Kk\ (zk - Hkx\hat{}\ k|k-1) \quad (15)$$

$$Pk|k = (I - KkHk)Pk|k-1 \quad (16)$$

donde Kk denota la ganancia de Kalman, Hk representa la matriz de observación, zk es la observación real , Rk indica la covarianza del ruido de observación e I es la matriz de identidad.

4. Experimentos 4.1. Conjuntos de datos

Conjuntos de datos COCO. El conjunto de datos Common Objects in Context (COCO), desarrollado por el equipo de Microsoft, es un activo vital en la investigación de la visión por computadora. Contiene más de 330.000 imágenes ricamente comentadas en 80 categorías de objetos. Al proporcionar un punto de referencia diverso, a gran escala y desafiante, el conjunto de datos COCO ha facilitado extensas actividades de investigación [44]. En consecuencia, el método que propusimos ha sido evaluado rigurosamente en el conjunto de datos COCO para comparar su rendimiento con los algoritmos líderes en el campo. La Tabla 1 resume la configuración experimental y la partición del conjunto de datos, ilustrando nuestro método dentro del conjunto de datos COCO.

Tabla 1. División del conjunto de pruebas, validación y entrenamiento del conjunto de datos COCO.

División del conjunto de datos	Número de imágenes	Categorías cubiertas
Conjunto de entrenamiento	118.287	80 clases
Conjunto de validación	5000	80 clases
Equipo de prueba	40.670	80 clases

Conjuntos de datos de COV. El conjunto de datos PASCAL Visual Object Classes (VOC) sirve como punto de referencia crucial en el campo de la visión por computadora y respalda tareas como la detección de objetos. Incluye anotaciones para 20 categorías de objetos diferentes, incluidas etiquetas de clase y cuadros delimitadores. La serie de desafíos PASCAL VOC jugó un papel fundamental en el avance de las tecnologías basadas en la visión [45]. Además, evaluamos el YOLOv5 mejorado en el conjunto de datos VOC y lo comparamos con otros métodos populares. La Tabla 2 proporciona una descripción detallada de la partición del conjunto de datos de VOC.

Machine Translated by Google

Tabla 2. Divisiones del conjunto de validación y entrenamiento del conjunto de datos de VOC.

División del conjunto de datos	Número de imágenes	Categorías cubiertas
Conjunto de entrenamiento	11.540	20 clases
Conjunto de validación	10.991	20 clases

Conjuntos de datos KITTI. El conjunto de datos KITTI es un punto de referencia crucial en el campo de la autonomía. impulsar la investigación. Abarca una variedad de escenarios de conducción del mundo real, incluidos urbanos, entornos rurales y carreteros. Proporciona anotaciones completas para tareas como como detección, seguimiento y estimación de profundidad de objetos 3D [46]. Usamos el conjunto de datos KITTI para validar la precisión de nuestro método propuesto en la estimación de distancias y demostrar su aplicabilidad y eficacia en condiciones de conducción realistas.

4.2. Detalles de implementacion

4.2.1. Configuración de entrenamiento

Para garantizar la equidad y coherencia del efecto de entrenamiento del modelo, los detalles del hardware, software y entorno experimental se muestran en la Tabla 3. La capacitación La configuración de parámetros se muestra en la Tabla 4.

Tabla 3. Entorno del experimento.

Ambiente	Versión
Sistema operativo	ubuntu 20.04
UPC	AMD Ryzen 9 5900HX
GPU	Nvidia GeForce RTX 3080 16G
Entorno de compilación	Pitón 3.9.0
CUDA	12.2
Marco de aprendizaje profundo	Pytorch 1.13.1
Compilador	Pycharm 2022.3.1

Tabla 4. Parámetros de entrenamiento.

Parámetro	Valor
Tamaño del lote	dieciséis
Tasa de aprendizaje inicial	0.1
Tasa de aprendizaje final	0.0001
Tamaño de la imagen	640 × 640
Optimizador	SGD
Trabajadores	2

4.2.2. Función de pérdida

La función de pérdida utilizada en el modelo YOLOv5-RedeCa se calcula de la siguiente manera:

$$L(tp, tgt) = \sum_{k=0}^{k} [\alpha_k^{balance} caja\ \alpha \sum_{yo=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} {}_{kij}^{objeto} LC\ IOU + \alpha obj \sum_{yo=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} {}_{kij}^{objeto} Lobj + \alpha cls \sum_{yo=0}^{S^2} \sum_{j=0}^{B} {}_{kij}^{objeto} Lcl] \quad (17)$$

$$LC_{pagaré} = 1 - pagaré + \frac{\rho^2 (b, b\ gt)}{C2} + \alpha u \quad (18)$$

donde k, s^2, y B representan el mapa de características de salida, la celda y el número de anclajes en cada celda, respectivamente. αx representa el peso del artículo correspondiente. αbox, αobj y Los αcls toman valores de 0,05, 0,7 y 0,3, respectivamente. Basamos los valores de los parámetros de αbox, αobj y αcls en el algoritmo YOLOv5 original. Utilizar una línea de base estable y reconocida La configuración es esencial para una evaluación consistente del desempeño. $\alpha_k^{balance}$ se utiliza para equilibrar los pesos de los mapas de características de salida en cada escala, con un valor predeterminado de [4.0, 1.0, 0.4].

Machine Translated by Google

kij obj indica si el k-ésimo mapa de características de salida, la i-ésima celda y el j-ésimo cuadro de anclaje son muestras positivas. Si es una muestra positiva, es 1; de lo contrario, es 0. tp y tgt son el vector predicho y el vector de verdad fundamental.

La función de pérdida de CIoU es la siguiente:

$$L_{CIoU} = 1 - IoU + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{c^2} + \alpha v \tag{19}$$

donde b representa los puntos centrales del cuadro predicho y b gt representa el cuadro de verdad fundamental. α es el factor de equilibrio entre la pérdida causada por la relación de aspecto y la pérdida causada por IoU. υ es la normalización de la diferencia en la relación de aspecto entre el cuadro predicho y el cuadro real. Se definen matemáticamente de la siguiente manera:

$$\rho(b, b^{gt}) = \left\| b - b^{gt} \right\|_2 \tag{20}$$

$$\alpha = \frac{v}{(1 - IoU) + v} \tag{21}$$

$$v = \frac{4}{\pi^2}\left(\arctan\frac{w^{gt}}{h^{gt}} - \arctan\frac{w}{h}\right)^2 \tag{22}$$

Las funciones de pérdida para objeto y clase se definen de la siguiente manera:

$$L_{obj}(p_o, p_{IoU}) = BCE_{sig}(o_{jb}(p_o, p_{IoU}; w_{obj}) \tag{23}$$

$$L_{cls}(c_p, c_{gt}) = BCE_{sig}(c_p, c_{gt}; w_{cls}) \tag{24}$$

donde (wG, hG) representa el ancho y el alto del cuadro del objeto y (wP, hP) representa el ancho y el alto del cuadro predicho po es la puntuación de confianza del objeto en el cuadro predicho. pIoU es la puntuación de confianza del objeto en el cuadro previsto. BCEsig y BCEsig cls representan pérdida binaria de entropía cruzada. wobj y BCEcls representan los pesos de cls muestras positivas.

4.3. Índice de evaluación

En los siguientes experimentos, evaluamos la precisión de la detección de objetos frente a la precisión y estabilidad de la estimación de distancia utilizando las siguientes métricas. •

Precisión: esta métrica es fundamental para evaluar la precisión de los modelos de detección de objetos. Cuantifica la proporción de instancias identificadas con precisión como objetos con respecto a todos los casos etiquetados como objetos por el modelo. La fórmula se define como

$$\text{Precisión} = \frac{TP}{TP + FP} \tag{25}$$

donde TP (verdaderos positivos) representa el recuento de objetos detectados correctamente y FP (falsos positivos) denota las instancias clasificadas erróneamente como objetos. • Recuperación: la recuperación evalúa la proporción de objetos verdaderos que el modelo detecta exitosamente entre todo el conjunto de objetos reales. Una mayor recuperación implica que el modelo es capaz de identificar la mayoría de los objetos verdaderos, aunque potencialmente aumenta la tasa de falsos positivos. La fórmula para el retiro es

$$\text{Recordar} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{26}$$

con FN (Falsos Negativos) que indica la cantidad de objetos que no fueron detectados. • Precisión promedio (AP): AP calcula el valor medio de precisión en distintos niveles de recuperación. Se puede determinar para cada categoría, y la precisión promedio media (MAP) representa el promedio de AP en todas las categorías. MAP se utiliza ampliamente

Machine Translated by Google

para medir el desempeño integral en tareas que involucran la detección de múltiples clases de objetos.

$$mapa = \frac{1}{calzas} \sum_{yo=1}^{clases} \int_{0}^{1} P(R)d(R) \quad (27)$$

• Desviación estándar (SD): La SD sirve como medida estadística para cuantificar el grado de variación o dispersión de la media dentro de un conjunto de datos. En el ámbito del análisis en el dominio del tiempo, es fundamental evaluar con precisión la cercanía de las estimaciones de distancia. derivados de varios algoritmos de rango monocular a los valores verdaderos, así como para medir su dispersión. El cálculo de la desviación estándar está definido por la siguiente fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{1}{norte} \sum_{yo=1}^{norte} (f(xi) - \mu i)^2} \quad (28)$$

donde σdenota SD, f(xi) representa la distancia estimada en el momento i, y μi corresponde al valor real en ese momento. Esta métrica es crucial para evaluar la confiabilidad y precisión de estos algoritmos en aplicaciones del mundo real.

4.4. Experimento de comparación

Hemos desarrollado un método YOLOv5 mejorado, específicamente optimizado para detectar Objetos pequeños en escenas de carretera bajo diversas condiciones climáticas y de iluminación. Para evaluar el rendimiento de nuestro método en términos de representación de características y procesamiento en tiempo real capacidades, realizamos una serie de experimentos en los conjuntos de datos COCO y VOC. Nuestro Se utilizaron métodos mejorados, denominados según la escala Ours-s, Ours-m y Ours-l. en comparación con varios métodos de detección de objetos de última generación.

Utilizamos Precision, mAP y Recall como métricas de rendimiento principales. Además, Consideramos la complejidad evaluando el número de parámetros (Params) y operaciones de punto flotante por segundo (FLOPS). Realizamos un análisis comparativo de diferentes métodos en los conjuntos de datos COCO y VOC, asegurando la solidez del experimento diseño y validez del análisis de datos. Los resultados se presentan en el documento adjunto. Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de detección de diferentes algoritmos en conjuntos de datos COCO y VOC.

Método	COCO VOC Precisión (%) mAP@.5 (%) Recuperación (%) Precisión (%) mAP@.5 (%) Recuperación (%)						Parámetros (M)	FLOPS (G)
SSD	50,7	45,1	38,8	31,4	54,7	57,3	26,3	65,7
R-CNN más rápido	53,1	48,0	46,0	34,1	57,5	54,7	60,4	93,6
Máscara-RCNN	51,9	48,0	45,7	33,9	57,2	69,1	63,4	147.0
yolv5s	63,5	54,3	52,1	69,4	60,3	52,9	7,1	16.1
YOLOv5m	70,4	61,3	55,4	82,5	74,3	67,2	21,0	48,5
yolv5l	72,9	64,0	59,7	82,5	75,4	69,3	46,2	108,6
yolv6s	64,7	52,8	46,2	65,3	58,3	51,6	18,5	45.3
yolv7s	65,8	47,6	49,5	66,8	58,3	52,5	6,1	13.2
Yolov8s	68,1	56,3	53,1	68,8	56,5	53,0	11,2	28.8
yolv9s	67,1	55,7	50,7	66,7	61,7	54,1	9,6	38,8
Yolov10s	66,3	57,2	51,8	68,4	60,7	56,1	8,1	24.9
Nuestro-s	67,2	55,0	51,3	67,0	57,5	53,5	6,7	13.2
Nuestro-m	71,6	61,5	57,9	81,9	77,5	73,4	17,2	34,6
Nuestro-l	73,6	64,4	60,1	82,5	80,0	76,0	34,3	70,4

Los resultados experimentales en el conjunto de datos COCO muestran que nuestro modelo optimizado Ours-m logró un 71,6 % de precisión, un 61,5 % de mAP y un 57,9 % de recuperación. Estos resultados son los mejores entre todos los métodos utilizan recursos computacionales similares. En el conjunto de datos VOC, el modelo también sobresalió, registrando 77,5% mAP@.5 y 73,4% Recall. En particular, a pesar de tener menos parámetros que el modelo YOLOv5 de escala equivalente, Ours-s, Ours-m y Ours-l superados

Machine Translated by Google

otros métodos en Precision y mAP. Demuestra nuestro éxito en mejorar el rendimiento y al mismo tiempo optimizar la eficiencia computacional.

En comparación con SSD y Faster R-CNN, Ours-m demostró ventajas significativas en los conjuntos de datos COCO y VOC. Fue particularmente efectivo en Recall para la detección de objetos pequeños. Por ejemplo, en el conjunto de datos COCO, el Recall of Ours-l fue un 21,3% mayor que el de SSD y un 14,1% mayor que Faster R-CNN, lo que destaca la eficacia del módulo RedeCa para mejorar las capacidades de retiro.

Aunque Mask-RCNN está diseñado para, por ejemplo, la segmentación, el modelo Ours-l se destacó en tareas de detección de objetos. En el conjunto de datos VOC, logró un mAP@.5 del 80,0%, en comparación con el 57,2% de Mask-RCNN. Esto enfatiza que nuestro modelo mejorado ofrece un rendimiento de detección excepcional, incluso en dominios especializados por Mask-RCNN.

También controlamos la complejidad del modelo mientras nos esforzábamos por lograr un mayor rendimiento. En comparación con el YOLOv5 original, la serie Ours demostró una detección superior de objetos pequeños en entornos complejos con menos parámetros. En el conjunto de datos COCO, Ours-l mejoró mAP y Recall en un 0,4% cada uno con respecto a YOLOv5l. Nuestros métodos superan a los métodos existentes en métricas de rendimiento clave y al mismo tiempo mantienen la eficiencia computacional, sentando una base sólida para aplicaciones prácticas.

Comparamos nuestro método con los últimos métodos de detección de objetos desde YOLOv6 a YOLOv10 [47–51]. Nuestro método coincide con YOLOv8 y YOLOv9 en términos de precisión y supera a YOLOv6, v8, v9 y v10 en aligeramiento del modelo y carga computacional. Los datos presentados en la Tabla 5 mostraron que, si bien nuestro modelo logra una precisión comparable a las últimas versiones de YOLO, aún tiene beneficios en el aligeramiento del modelo y la carga computacional. Estas ventajas contribuyen al despliegue y la eficiencia operativa de nuestro método en aplicaciones prácticas.

El módulo RedeCa mejora la capacidad de nuestro método para representar características, especialmente en el manejo preciso de información de bordes y detalles, lo cual es crucial para la detección de objetos pequeños . También aumenta la adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas y de iluminación, aumentando así la robustez en entornos complejos.

En escenarios de tráfico rodado, el rendimiento en tiempo real es crucial. Evaluamos nuestro método frente a métodos populares en términos de FPS y recuento de parámetros, como se detalla en la Tabla 5. El recuento de parámetros y la complejidad computacional de nuestro método son notablemente más bajos que los de Faster R-CNN y Mask-RCNN. En comparación con el YOLOv5 de referencia, nuestro método logra un rendimiento comparable al tiempo que reduce tanto el recuento de parámetros como la complejidad computacional.

Los resultados experimentales muestran que al agregar el módulo RedeCa a YOLOv5, mejoramos notablemente la precisión de la detección de objetos pequeños mientras mantenemos altas tasas de recuperación. Estos hallazgos respaldan firmemente una mayor exploración de métodos de aprendizaje profundo para la detección de objetos pequeños en entornos complejos, lo que confirma la efectividad y el potencial de nuestras mejoras.

Para validar la precisión superior y la solidez de nuestro método, realizamos un análisis comparativo cuantitativo y cualitativo integral. Comparamos nuestro método con métodos populares de medición de distancias monoculares en escenarios de tráfico rodado.

Los resultados se muestran en la Figura 7.

Como se muestra en la Figura 7, nuestro método de medición de distancia monocular reduce efectivamente los errores potenciales causados por cambios repentinos en el tamaño del cuadro delimitador de detección Esto conduce a una menor dispersión en las mediciones de distancia, lo que garantiza que sigan siendo más consistentes con las distancias reales a lo largo del tiempo.

También realizamos un análisis cualitativo para comparar nuestro método con los métodos convencionales. A diferencia de los métodos que generan mapas de profundidad para toda la imagen para obtener distancias de los objetos, nuestro método detecta objetos y mide sus distancias simultáneamente, lo que mejora la eficiencia. Los resultados de la medición de distancia se muestran en la Figura 8.

Machine Translated by Google

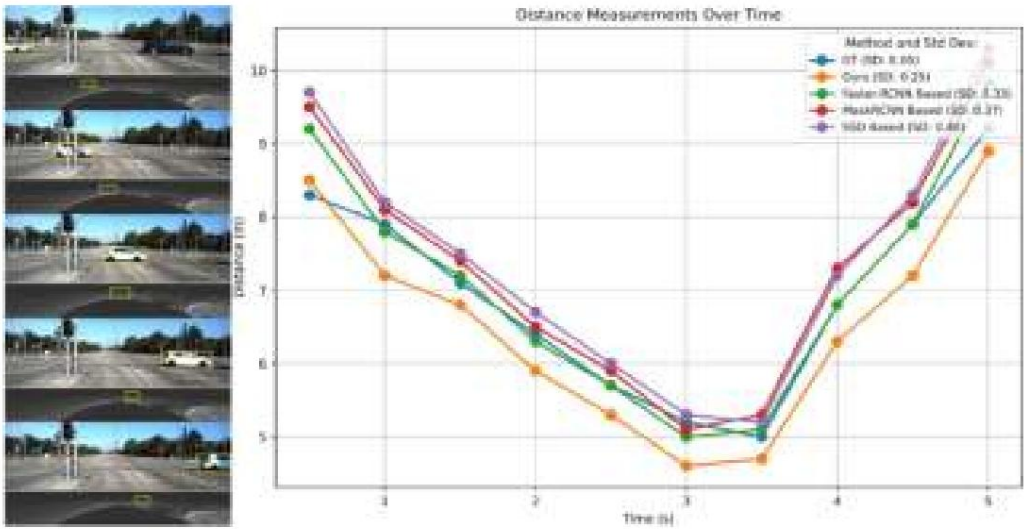


Figura 7. Resultados estadísticos y cálculos de desviación estándar de diferentes distancias monoculares métodos de medición. La desviación estándar de nuestro método es 0,25. La desviación estándar de RCNN más rápido es 0,33. La desviación estándar de Mask R-CNN es 0,37. La desviación estándar de SSD es 0,40.

(a) (b) (C) (d)

Figura 8. Resultados de visualización de diferentes métodos de medición de distancia monocular. (a) es el verdad sobre el terreno. (b) es el resultado basado en Faster R-CNN. (c) es el resultado basado en YOLOv5. (d) es el resultado basado en YOLO-RedeCa.

Machine Translated by Google

4.5. Experimento de ablación

Adoptamos el método del experimento de ablación para evaluar el impacto de diferentes módulos en el rendimiento de detección del modelo YOLOv5m en el conjunto de datos de VOC. el experimento Los resultados se muestran en la Tabla 6. Investigamos el efecto de la convolución separable en profundidad. (DW) sobre el rendimiento del modelo. Además, examinamos el impacto de un canal efectivo. atención (ECA). También exploramos la combinación directa de DW y ECA. Finalmente, evaluamos el rendimiento del módulo RedeCa.

Tabla 6. Resultados de la detección utilizando diferentes módulos en el conjunto de datos de VOC.

Método	DW ECA RedeCa (DW + ECA) Precisión (%) mAP (%) IOU (%) Parámetros (M) FLOPS (G)					
YOLOv5m		82,5	74,3	67,2	21,0	48,5
YOLOv5m		70,5	62,9	38,4	9,1	18.3
YOLOv5m		82,7	76,3	74,1	21,8	48,6
YOLOv5m		79,3	74,6	71,3	20,8	47,6
YOLOv5m + RedeCa		81,9	77,5	73,4	17,2	34,6

Como se muestra en la Tabla 6, el modelo YOLOv5m de referencia logró una precisión del 82,5%. mAP del 74,3% y pagaré del 67,2% en el conjunto de datos VOC. Tenía 21,0 millones de parámetros y 48,5 GFLOPS.

Después de agregar convoluciones separables en profundidad (DW) al modelo de referencia, la precisión disminuyó al 70,5 %, mAP cayó al 62,9 % y IOU disminuyó significativamente a 38,4%. Sin embargo, el número de parámetros y FLOPS se redujo a 9,1 millones y 18,3 GFLOPS, respectivamente. Esto indica que si bien el módulo DW reduce efectivamente La complejidad del modelo afecta negativamente el rendimiento de la detección.

La incorporación del módulo Efficient Channel Attention (ECA) resultó en una ligera mejora en la precisión al 82,7 %, un aumento en mAP al 76,3 % y un aumento significativo en pagaré al 74,1%. El número de parámetros y FLOPS aumentó ligeramente, lo que demuestra que el módulo ECA mejora el rendimiento de detección sin aumentar significativamente el carga computacional.

Uso de convoluciones separables en profundidad (DW) y atención de canal eficiente (ECA) directamente, el modelo vio ligeras mejoras en la precisión promedio promedio (mAP) y Intersección sobre Unión (IoU). Pero el aumento fue mínimo y no hubo cambios significativos. Reducción de los parámetros de la red y de la carga computacional. Sin embargo, al efectivamente Al integrar DW y ECA en el módulo RedeCa, la precisión del modelo disminuyó ligeramente al 81,9%, pero el mAP aumentó al 77,5% y el IoU aumentó al 73,4%, mientras que los parámetros y FLOPS se redujeron a 17,2 M y 34,6 G, respectivamente. Esto indica que el uso del módulo RedeCa puede equilibrar el rendimiento de detección y la complejidad del modelo hasta cierto punto. medida, proporcionando una solución eficaz para aplicaciones de detección de objetos en tiempo real.

Verificar que el uso de un filtro de salto de anomalía ayuda a suavizar las variaciones de distancia y eliminar posibles errores causados por cambios repentinos en el tamaño del cuadro delimitador de detección, Realizamos un análisis comparativo. Comparamos la arquitectura del algoritmo con la La anomalía salta el filtro al que no lo tiene.

Como se muestra en la Figura 9, el uso de un filtro de Kalman integrado con las series de tiempo efectivamente Elimina posibles errores causados por cambios repentinos en el tamaño del cuadro delimitador de detección. Este Reduce la dispersión en las mediciones de distancia, haciéndolas más consistentes con la distancias reales a lo largo del tiempo.

Machine Translated by Google

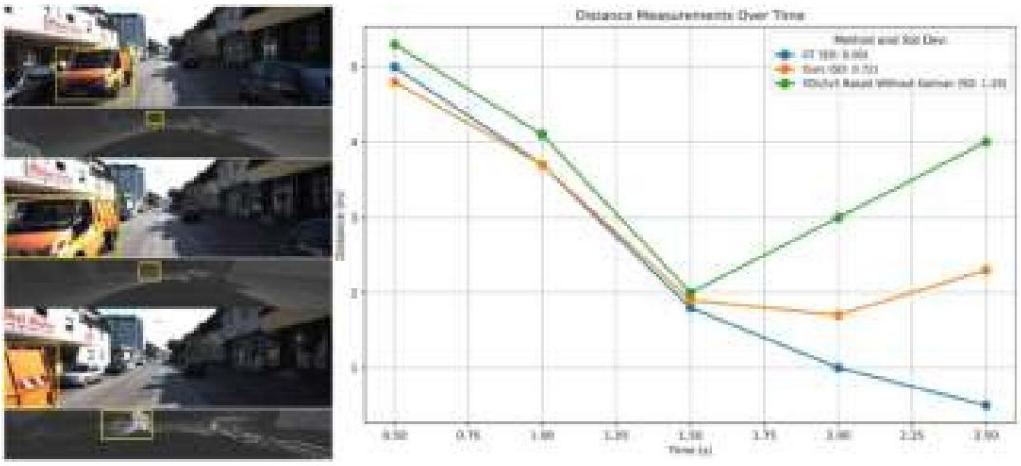


Figura 9. El impacto del uso del filtrado de Kalman en las fluctuaciones en la estimación de distancias. La desviación estándar de nuestro método es 0,72. La desviación estándar para el sistema basado en YOLOv5-RedeCa

El método sin el uso del filtrado de Kalman es 1,29.

5. Conclusiones

Nuestra red mejorada de detección de objetos funciona de manera excelente en el conjunto de datos COCO. Logra una precisión del 71,6%, una precisión media media del 61,5% (mAP@.5) y una recuperación del 57,9%, respectivamente. Estos resultados son mejores que los modelos de comparación con los mismos recursos informáticos. Además, en el conjunto de datos VOC, nuestra red mejorada de detección de objetos también muestra un rendimiento excelente en mAP@.5 y recuperación. Los resultados son 77,5% y 73,4%, respectivamente. Al integrar el algoritmo Bot-Sort, la robustez del método propuesto mejora significativamente cuando se trata de oclusión de objetos o pérdida temporal, de modo que el sistema puede rastrear y distanciar múltiples objetos al mismo tiempo. Al mismo tiempo, el filtro de salto anormal puede suavizar efectivamente el cambio repentino del alcance del objeto, eliminar la posible anomalía causada por la mutación del tamaño del cuadro de detección y así mejorar la confiabilidad del alcance.

La arquitectura de algoritmo holístico que diseñamos e implementamos con éxito rompe la brecha de investigación tradicional entre la detección de objetos 2D y la estimación de profundidad monocular. Combinamos las dos técnicas diseñando una nueva arquitectura de algoritmo.
Esto mejora significativamente el rendimiento de la detección de objetos y la estimación de distancias en entornos dinámicos y complejos. La integración de estas tecnologías no sólo optimiza las funciones respectivas, sino que también mejora la eficiencia del sistema en aplicaciones prácticas. En particular, ha demostrado un gran potencial de aplicación en el campo de la vigilancia del tráfico y la conducción automática.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, HL, YM, YD e YY; metodología, HL y YM; software, NS; validación, HL y YY; análisis formal, HL, YY y YM; investigación, NS; recursos, HL, YD y YM; curación de datos, HL; redacción: preparación del borrador original, NS; redacción: revisión y edición, HL, YM y YY; visualización, NS; supervisión, YD y YM; administración de proyectos, NS; adquisición de financiación, YD Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Este trabajo cuenta con el apoyo principal del Proyecto de Control de Fusión de Conducción Autónoma Cooperativa de Vehículos-Carreteras y está patrocinado por los Proyectos de Investigación Académica de la Universidad Unión de Beijing (Nos. ZK80202003, ZK90202105), el Programa de Ciencia y Tecnología de la Comisión Municipal de Educación de Beijing (Nos. KM202111417007, KM202211417006).

Declaración de disponibilidad de datos: el conjunto de datos COCO utilizado se puede obtener de https://cocodataset. org/ #casa (consultado el 24 de junio de 2024). El conjunto de datos VOC se puede obtener en http://host. robots.ox.ac.uk/pascal/ VOC/ (consultado el 24 de junio de 2024). El conjunto de datos KITTI se puede obtener en https://www.cvlibs.net/datasets/kitti/ eval_object.php?obj_benchmark=3d (consultado el 24 de junio de 2024). La arquitectura de fusión que utiliza YOLO-RedeCa y el filtro de cambio de salto anormal está disponible

Machine Translated by Google

en GitHub en https://github.com/Mr-Lv-BUU/The-Fusion-Architecture-Using-YOLO-RedeCa-and-Abnormal-Jumping-Change-Filter.git (consultado el 24 de junio de 2024).

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Tan, K.; Wu, J.; Zhou, H.; Wang, Y.; Chen, J. Integración de algoritmos avanzados de visión por computadora e inteligencia artificial para la conducción autónoma Sistemas. J. Teoría Práctica. Ing. Ciencia. 2024, 4, 41–48.
2. Haris, M.; Glowacz, A. Detección de objetos en la carretera: un estudio comparativo de algoritmos basados en aprendizaje profundo. Electrónica 2021, 10, 1932. [Referencia cruzada]
3. Li, Y.; Huang, B.; Chen, Z.; Cui, Y.; Liang, F.; Shen, M.; Liu, F.; Xie, E.; Sheng, L.; Ouyang, W.; Shao, J. Fast-BEV: una línea base de percepción a vista de pájaro rápida y sólida. Traducción IEEE. Patrón Anal. Mach. Intel. 2024, 1–14.
4. Girshick, R.; Donahue, J.; Darrell, T.; Malik, J. Rich presenta jerarquías para una detección precisa de objetos y una segmentación semántica. En Actas de la Conferencia IEEE sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Columbus, OH, EE. UU., 23 a 28 de junio de 2014; págs. 580–587.
5. Diwan, T.; Anirudh, G.; Tembhurne, JV Detección de objetos usando YOLO: desafíos, sucesores arquitectónicos, conjuntos de datos y aplicaciones. Multimed. Herramientas Aplica. 2023, 82, 9243–9275. [Referencia cruzada] [PubMed]
6. Zhao, ZQ; Zheng, P.; Xu, ST; Wu, X. Detección de objetos con aprendizaje profundo: una revisión. Traducción IEEE. Red neuronal. Aprender. Sistema. 2019, 30, 3212–3232. [Referencia cruzada] [PubMed]
7. Poggi, M.; Tosi, F.; Batsos, K.; Mordohai, P.; Mattoccia, S. Sobre las sinergias entre el aprendizaje automático y el estéreo binocular para la estimación de profundidad a partir de imágenes: una encuesta. Traducción IEEE. Patrón Anal. Mach. Intel. 2021, 44, 5314–5334. [Referencia cruzada] [PubMed]
8. Saxena, A.; Sol, M.; Ng, AY Make3d: Aprendizaje de la estructura de una escena 3D a partir de una única imagen fija. Traducción IEEE. Patrón Anal. Mach. Intel. 2008, 31, 824–840. [Referencia cruzada]
9. Karsch, K.; Liu, C.; Kang, SB Transferencia de profundidad: extracción de profundidad de video mediante muestreo no paramétrico. Traducción IEEE. Patrón Anal. Mach. Intel. 2014, 36, 2144–2158. [Referencia cruzada]
10. Fu, C.; Yuan, H.; Xu, H.; Zhang, H.; Shen, L. TMSO-Net: observación multiescala adaptativa de textura para la profundidad de la imagen del campo de luz Estimacion. J. Vis. Comunitario. Representación de imagen. 2023, 90, 103731. [Referencia cruzada]
11. Zou, Z.; Chen, K.; Shi, Z.; Guo, Y.; Ye, J. Detección de objetos en 20 años: una encuesta. Proc. IEEE 2023, 111, 257–276. [Referencia cruzada]
12. Krizhevsky, A.; Sutskever, I.; Hinton, clasificación GE Imagenet con redes neuronales convolucionales profundas. Adv. Inf. neuronal. Proceso. Sistema. 2012, 25, 1097–1105. [Referencia cruzada]
13. Xiao, Y.; Tian, Z.; Yu, J.; Zhang, Y.; Liu, S.; Du, S.; Lan, X. Una revisión de la detección de objetos basada en el aprendizaje profundo. Multimed. Herramientas Aplica. 2020, 79, 23729–23791. [Referencia cruzada]
14. Él, K.; Zhang, X.; Ren, S.; Sun, J. Agrupación de pirámides espaciales en redes convolucionales profundas para el reconocimiento visual. Traducción IEEE. Patrón Anal. Mach. Intel. 2015, 37, 1904-1916. [Referencia cruzada] [PubMed]
15. Girshick, R. Rápido r-cnn. En actas de la Conferencia Internacional IEEE sobre Visión por Computador, Santiago, Chile, 7 a 13 de diciembre 2015; págs. 1440-1448.
16. Ren, S.; Él, K.; Girshick, R.; Sun, J. Faster r-cnn: hacia la detección de objetos en tiempo real con redes de propuesta de región. Adv. Inf. neuronal . Proceso. Sistema. 2015, 28, 91–99. [Referencia cruzada] [PubMed]
17. Martín, D.; Fowlkes, C.; Tal, D.; Malik, J. Una base de datos de imágenes naturales segmentadas por humanos y su aplicación para evaluar algoritmos de segmentación y medir estadísticas ecológicas. En Actas de la Octava Conferencia Internacional IEEE sobre Visión por Computadora, ICCV 2001, Vancouver, BC, Canadá, 7 a 14 de julio de 2001.
18. Dai, J.; Li, Y.; Él, K.; Sun, J. R-fcn: Detección de objetos a través de redes totalmente convolucionales basadas en regiones. Adv. Inf. neuronal. Proceso. Sistema. 2016, 29, 379–387.
19. Sermanet, P.; Eigen, D.; Zhang, X.; Mathieu, M.; Fergus, R.; LeCun, Y. Overfeat: reconocimiento, localización y detección integrados utilizando redes convolucionales. arXiv 2013, arXiv:1312.6229.
20. Redmon, J.; Divvala, S.; Girshick, R.; Farhadi, A. Solo miras una vez: detección de objetos unificada en tiempo real. En Actas de la Conferencia IEEE sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Las Vegas, NV, EE. UU., 26 de junio a 1 de julio de 2016; págs. 779–788.
21. Han, X.; Chang, J.; Wang, K. Detección de objetos en tiempo real basada en YOLO-v2 para objetos de vehículos pequeños. Computación de procedimiento. Ciencia. 2021, 183, 61–72. [Referencia cruzada]
22. Redmon, J.; Farhadi, A. YOLO9000: Mejor, más rápido, más fuerte. En actas de la Conferencia IEEE sobre visión por computadora y Reconocimiento de patrones, Honolulu, Hawaii, EE. UU., 21 a 26 de julio de 2017; págs. 7263–7271.
23. Redmon, J.; Farhadi, A. Yolov3: Una mejora incremental. arXiv 2018, arXiv:1804.02767.
24. Bochkovskiy, A.; Wang, CY; Liao, HYM Yolov4: Velocidad óptima y precisión de detección de objetos. arXiv 2020, arXiv:2004.10934.
25. Jocher, G.; Chaurasia, A.; Stoken, A.; Borovec, J.; Kwon, Y.; Michael, K.; Colmillo, J.; Wang, C.; Yifu, Z.; Montes, D.; et al. ultralytics /yolov5: v6.2: modelos de clasificación YOLOv5, Apple M1, reproducibilidad, integraciones ClearML y Deci.ai, v6.2; Zenodo: Ginebra, Suiza, 2022.
26. Liu, W.; Anguelov, D.; Erhan, D.; Szegedy, C.; Caña, S.; Fu, CY; Berg, AC Ssd: detector multibox de disparo único. En Actas de Computer Vision–ECCV 2016: 14ª Conferencia Europea, Ámsterdam, Países Bajos, 11 a 14 de octubre de 2016; Actas, Parte I 14; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2016; págs. 21–37.

Machine Translated by Google

27. Fu, CY; Liu, W.; Ranga, A.; Tyagi, A.; Berg, AC Dssd: Detector deconvolucional de disparo único. arXiv 2017, arXiv:1701.06659.
28. Li, Z.; Yang, L.; Zhou, F. FSSD: Detector multibox de disparo único de fusión de funciones. arXiv 2017, arXiv:1712.00960.
29. Ren, D.; Yang, M.; Wu, J.; Zheng, N. Restricciones de peso normal de superficie y gaussiano para la terminación de estructuras de profundidad en interiores. Reconocimiento de patrones. 2023, 138, 109362. [Referencia cruzada]
30. Favaro, P.; Soatto, S. Una aproximación geométrica a la forma desde el desenfoque. Traducción IEEE. Patrón Anal. Mach. Intel. 2005, 27, 406–417. [Referencia cruzada] [PubMed]
31. Liu, B.; Gould, S.; Koller, D. Estimación de la profundidad de una sola imagen a partir de etiquetas semánticas predichas. En Actas de la Conferencia de la IEEE Computer Society de 2010 sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, San Francisco, CA, EE. UU., 13 a 18 de junio de 2010; págs. 1253-1260.
32. Eigen, D.; Puhrsch, C.; Fergus, R. Predicción de mapas de profundidad a partir de una sola imagen utilizando una red profunda de múltiples escalas. Adv. Inf. neuronal. Proceso. Sistema. 2014, 27, 2366–2374.
33. Kuznietsov, Y.; Stuckler, J.; Leibe, B. Aprendizaje profundo semisupervisado para la predicción de mapas de profundidad monoculares. En Actas de la Conferencia IEEE sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Honolulu, Hawaii, EE. UU., 21 a 26 de julio de 2017; págs. 6647–6655.
34. Eigen, D.; Fergus, R. Predicción de profundidad, normales de superficie y etiquetas semánticas con una arquitectura convolucional multiescala común. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE sobre Visión por Computadora, Santiago, Chile, 7 a 13 de diciembre de 2015; págs. 2650–2658.
35. Liu, C.; Yang, G.; Zuo, W.; Zang, T. DPDFormer: un modelo de grueso a fino para la estimación de la profundidad monocular. Transmisión ACM. Multimed. Computadora. Comunitario. Aplica. 2024, 20, 1–21. [Referencia cruzada]
36. Li, Z.; Chen, Z.; Liu, X.; Jiang, J. Depthformer: Explotación de la correlación de largo alcance y la información local para obtener monoculares precisos estimación de profundidad. Mach. Intel. Res. 2023, 20, 837–854. [Referencia cruzada]
37. Jiao, J.; Cao, Y.; Canción, Y.; Lau, R. Mire más profundamente: estimación de profundidad monocular con refuerzo semántico y pérdida impulsada por la atención. En Actas de la Conferencia Europea sobre Visión por Computador (ECCV), Múnich, Alemania, 8 a 14 de septiembre de 2018; págs. 53–69.
38. Miclea, VC; Nedevschi, S. Estimación de profundidad monocular con precisión mejorada de largo alcance para la percepción del entorno de UAV. Traducción IEEE. Geociencias. Sensores remotos 2021, 60, 1–15. [Referencia cruzada]
39. Garg, R.; Bg, VK; Carneiro, G.; Reid, I. CNN no supervisada para estimación de profundidad de vista única: geometría al rescate. En Actas de Computer Vision–ECCV 2016: 14ª Conferencia Europea, Ámsterdam, Países Bajos, 11 a 14 de octubre de 2016; Actas, Parte VIII 14; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2016; págs. 740–756.
40. Godard, C.; Mac Aodha, O.; Brostow, GJ Estimación de profundidad monocular no supervisada con consistencia de izquierda a derecha. En Actas de la Conferencia IEEE sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Honolulu, Hawaii, EE. UU., 21 a 26 de julio de 2017; págs. 270–279.
41. Zhou, T.; Marrón, M.; Snaly, N.; Lowe, DG Aprendizaje no supervisado de la profundidad y el movimiento del ego a partir de vídeos. En Actas de la Conferencia IEEE sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Honolulu, Hawaii, EE. UU., 21 a 26 de julio de 2017; págs. 1851–1858.
42. Mahaur, B.; Mishra, K. Detección de objetos pequeños basada en YOLOv5 en sistemas de conducción autónomos. Reconocimiento de patrones. Letón. 2023, 168, 115-122. [Referencia cruzada]
43. Aharon, N.; Orfaig, R.; Bobrovsky, BZ BoT-SORT: Asociaciones robustas de seguimiento de múltiples peatones. arXiv 2022, arXiv:2206.14651.
44. Lin, TY; Maire, M.; Belongie, S.; Hays, J.; Perona, P.; Ramanan, D.; Dollár, P.; Zitnick, CL Microsoft coco: Objetos comunes en contexto. En Actas de Computer Vision–ECCV 2014: 13.ª Conferencia Europea, Zurich, Suiza, 6 a 12 de septiembre de 2014; Procedimientos, Parte V 13; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2014; págs. 740–755.
45. Everingham, M.; Eslami, SA; Van Gool, L.; Williams, CK; Winn, J.; Zisserman, A. El desafío de las clases de objetos visuales de Pascal: una retrospectiva. En t. J. Computación. Vis. 2015, 111, 98-136. [Referencia cruzada]
46. Geiger, A.; Lenz, P.; Más quieto, C.; Urtasun, R. La visión se encuentra con la robótica: el conjunto de datos de Kitti. En t. J. Robot. Res. 2013, 32, 1231–1237. [Referencia cruzada]
47. Li, C.; Pequeño.; Jiang, H.; Weng, K.; Geng, Y.; Pequeño.; Ke, Z.; Li, Q.; Cheng, M.; Nie, W.; et al. YOLOv6: una detección de objetos de una sola etapa marco para aplicaciones industriales. arXiv 2022, arXiv:2209.02976.
48. Wang, C.-Y.; Bochkovskiy, A.; Liao, H.-YM YOLOv7: La bolsa de regalos entrenable establece un nuevo estado del arte para los detectores de objetos en tiempo real. En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Vancouver, BC, Canadá, 17 a 24 de junio de 2023; págs. 7464–7475.
49. Lou, H.; Duan, X.; Guo, J.; Liu, H.; Gu, J.; Bi, L.; Chen, H. DC-YOLOv8: Algoritmo de detección de objetos de pequeño tamaño basado en cámara sensor. Electrónica 2023, 12, 2323. [CrossRef]
50. Wang, C.-Y.; Sí, I.-H.; Liao, H.-YM YOLOv9: Aprenda lo que quiere aprender utilizando información de gradiente programable. arXiv 2024, arXiv:2402.13616.
51. Wang, A.; Chen, H.; Liu, L.; Chen, K.; Lin, Z.; Han, J.; Ding, G. YOLOv10: Detección de objetos de un extremo a otro en tiempo real. arXiv 2024, arXiv:2405.14458.

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Un enfoque de clasificación del tráfico cifrado basado en la ruta Funciones exclusivas y LSTM

Yihe Mei [1], Nurbol Luktarhan 2,*, Guodong Zhao [1] y Xiao Tong Yang [2]

[1] Escuela de Software, Universidad de Xinjiang, Urumqi 830091, China; 107552204789@stu.xju.edu.cn (YM); 107552204851@stu.xju.edu.cn (GZ)
[2] Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Información, Universidad de Xinjiang, Urumqi 830046, China;
107552204103@stu.xju.edu.cn * Correspondencia: nurbol@xju.edu.cn

Resumen: Clasificar el tráfico cifrado es un aspecto crucial de la seguridad de la red. Sin embargo, los métodos populares enfrentan varias limitaciones, como la dependencia de la ingeniería de características y la necesidad de arquitecturas de modelos complejas para garantizar una clasificación efectiva. Para abordar estos desafíos, proponemos un método que combina características de firma de ruta con modelos de memoria a corto plazo (LSTM) para clasificar los tipos de servicios dentro del tráfico cifrado. Nuestro enfoque construye rutas de tráfico utilizando el tamaño de los paquetes y los tiempos de llegada. Generamos características de firma de ruta en varias escalas utilizando una innovadora técnica de extracción de características acumulativas de múltiples escalas. Estas características sirven como entradas para que las redes LSTM realicen la clasificación. En particular, al utilizar solo 24 funciones de paquetes secuenciales junto con los modelos LSTM, nuestro método ha logrado un éxito significativo en la clasificación de tipos de servicios dentro del tráfico cifrado. Los resultados experimentales resaltan la superioridad de nuestro método propuesto en comparación con los principales enfoques en el campo.

Palabras clave: clasificación del tráfico cifrado; características de firma de ruta; memoria larga a corto plazo; aprendizaje profundo

check for updates

Cita: Mei, Y.; Luktarhan, N.; Zhao, GRAMO.; Yang, X. Un enfoque de clasificación de tráfico cifrado basado en características de firma de ruta y LSTM. Electrónica 2024, 13 , 3060. https://doi.org/10.3390/electronics13153060

Editor académico: Martin Reisslein

Recibido: 27 de junio de 2024
Revisado: 29 de julio de 2024
Aceptado: 31 de julio de 2024
Publicado: 2 de agosto de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

En la era de la conectividad ubicua a Internet, la clasificación del tráfico de red se ha convertido en una piedra angular de la ciberseguridad. La importancia de esta disciplina se ve subrayada por sus aplicaciones críticas en la detección de intrusiones, análisis de tendencias de tráfico, gestión de la calidad del servicio y mejora de la visibilidad de la red [1]. Con la adopción generalizada de tecnologías de cifrado, el panorama del tráfico de red ha cambiado drásticamente a medida que más usuarios y proveedores de servicios eligen transmitir información a través de tráfico cifrado [2].

El tráfico cifrado se diferencia del tráfico no cifrado en que emplea protocolos de cifrado para codificar los datos transmitidos entre dispositivos, evitando así que personas no autorizadas accedan a ellos. Este cifrado garantiza importantes ventajas en términos de privacidad y seguridad al proteger la información sensible de la interceptación y explotación por parte de actores maliciosos. El tráfico cifrado mantiene la confidencialidad y la integridad de los datos, las comunicaciones y las transacciones de los usuarios, haciéndolos a prueba de manipulaciones. Por el contrario, el tráfico no cifrado transmite datos en texto plano, que cualquier persona con acceso a la red puede interceptar y leer fácilmente . Si bien el tráfico no cifrado permite un monitoreo y análisis más simples por parte de los administradores de red, expone a los usuarios a un mayor riesgo de violaciones de datos y privacidad . Las principales ventajas del tráfico no cifrado son su simplicidad y una menor sobrecarga computacional, lo que puede resultar en una transmisión de datos más rápida. Sin embargo, los beneficios de seguridad del tráfico cifrado superan con creces estas ventajas, lo que hace que el cifrado sea esencial en el entorno digital actual.

Aunque el tráfico cifrado salvaguarda la privacidad y el anonimato de la mayoría de los usuarios, al mismo tiempo presenta desafíos sustanciales para la ciberseguridad [3]. Los delincuentes aprovechan cada vez más sofisticadas técnicas de cifrado para realizar actividades ilegales, de manera significativa

Machine Translated by Google

socavando la estabilidad del ciberespacio y planteando amenazas a la seguridad nacional. Los investigadores necesitan urgentemente nuevos métodos de clasificación para abordar este formidable desafío.

La llegada del cifrado ha planteado un desafío sustancial a los métodos tradicionales de clasificación del tráfico [4]. Las técnicas que alguna vez se basaron en la inspección de la carga útil y la clasificación basada en puertos ahora se han vuelto ineficaces contra el velo del cifrado [5,6].

Históricamente, este campo se ha apoyado en métodos estadísticos y, más recientemente, en algoritmos de aprendizaje automático para navegar por las complejidades de la clasificación del tráfico cifrado [7-10]. Estos métodos, sin embargo, conllevan sus propios desafíos. A menudo requieren grandes esfuerzos de ingeniería de funciones y dependen en gran medida de la calidad y cantidad de los datos disponibles. Además, aunque prácticos, los intrincados diseños de los modelos de aprendizaje profundo exigen vastos recursos computacionales y grandes conjuntos de datos para lograr una precisión satisfactoria [4].

Hoy en día, las aplicaciones del mundo real para la clasificación del tráfico cifrado incluyen Cisco Encrypted Traffic Analytics (ETA), Darktrace, Symantec Encrypted Traffic Management (ETM) y Vectra AI. Cisco ETA identifica malware en el tráfico cifrado mediante telemetría de red y aprendizaje automático. Darktrace utiliza la detección de anomalías basada en IA para identificar amenazas en datos cifrados. Symantec ETM descifra, inspecciona y vuelve a cifrar el tráfico mediante una inspección profunda de paquetes para su clasificación. La plataforma Cognito de Vectra AI emplea aprendizaje automático y análisis de comportamiento para detectar amenazas dentro del tráfico cifrado. Estas soluciones resaltan la dependencia de la industria del aprendizaje automático, la inteligencia artificial y el análisis de red avanzado para una gestión del tráfico cifrado segura y eficaz.

La característica de firma de ruta propuesta por Chen [11] se ha aplicado con éxito en los últimos años a campos como el aprendizaje automático, el reconocimiento de patrones y el análisis de rutas. Esta característica también se introdujo recientemente en el dominio de la clasificación del tráfico cifrado, donde ha demostrado su viabilidad en varios conjuntos de datos [12]. Sin embargo, la complejidad inherente de las características de la firma de la ruta significa que los resultados de la clasificación no son consistentemente satisfactorios. En la clasificación del tráfico cifrado, persiste el desafío de aprovechar plenamente las características de firma de ruta para lograr resultados satisfactorios, lo que requiere más investigación e innovación.

En este artículo, presentamos un método de extracción de características de firma de ruta acumulativa de múltiples escalas para maximizar el contenido de información de las características de firma de ruta. Para aprovechar al máximo el potencial de estas funciones, hemos explorado su integración con redes neuronales profundas. Esta integración ha dado lugar a resultados de clasificación satisfactorios, lo que demuestra la eficacia de combinar características de firma de ruta con aprendizaje profundo en la clasificación del tráfico cifrado.

Las principales contribuciones de este trabajo son las siguientes:

1. Proponemos un clasificador de tráfico cifrado que combina características de firma de ruta con un modelo LSTM. Este clasificador extrae la dinámica compleja y las estructuras geométricas del tráfico cifrado utilizando características de firma de ruta y utiliza un modelo LSTM para realizar la tarea de clasificación, lo que reduce significativamente los recursos computacionales necesarios para la clasificación del tráfico.
2. Introducimos un método de extracción de características acumulativas de múltiples escalas para generar características de firma de ruta que se adaptan de manera óptima a los modelos LSTM. Con este método, la precisión de la clasificación del modelo LSTM se puede mejorar entre un 5% y un 30%, lo que valida la eficacia de nuestro nuevo enfoque de extracción de características.
3. Nuestro método propuesto logra resultados de clasificación competitivos utilizando solo 24 características consecutivas de longitud de paquete e intervalo de tiempo. Demuestra precisiones de clasificación del 94,74 %, 90,53 %, 93,86 % y 95,03 % en los conjuntos de datos ISCX-VPN, ISCX-nonVPN, ISCX-Tor e ISCX-nonTor, respectivamente, lo que demuestra la eficacia de nuestro enfoque.

2. Trabajo relacionado

2.1. Clasificación de tráfico cifrado

La clasificación del tráfico de Internet se puede clasificar en tres dominios principales:

1. Distinguir entre tráfico cifrado y no cifrado [3]; 2. Identificar las aplicaciones específicas asociadas al tráfico [13];

Machine Translated by Google

3. Clasificar el tráfico en función de diferentes tipos de servicios. Los tipos de servicio se refieren al propósito del tráfico, es decir, tráfico generado para satisfacer necesidades específicas del usuario. Por ejemplo, el tráfico de transferencia de archivos se genera cuando los usuarios realizan operaciones de carga o descarga en la red, y el tráfico de transmisión se genera cuando los usuarios utilizan servicios de transmisión de medios, como escuchar música o mirar videos [14].

Esta sección resume métodos vitales para la clasificación del tráfico de red, categorizados según las técnicas utilizadas: basado en puerto, basado en carga útil, construcción de huellas digitales, métodos estadísticos y modelos de aprendizaje profundo.

Basado en puerto: este método, uno de los más antiguos en la clasificación del tráfico de red, se basaba en números de puerto fijos asignados por la Autoridad de Números Asignados de Internet (IANA) durante el desarrollo inicial de Internet. Este enfoque facilitó la asociación de aplicaciones de red con su tráfico correspondiente mediante escaneo de puertos, permitiendo así la identificación del tráfico [15]. Sin embargo, con el crecimiento exponencial de las aplicaciones de red y las técnicas de puertos dinámicos, el escaneo de puertos ya no se aplica al entorno de red actual [5]. Nuestro método, en particular, no depende de los números de puerto.

Basado en carga útil: para abordar las limitaciones del escaneo de puertos, los investigadores han propuesto métodos de inspección profunda de paquetes (DPI) [6] para la identificación del tráfico. DPI examina la parte de datos de un paquete (carga útil) y utiliza firmas conocidas para identificar el tipo de tráfico. El principio básico de DPI es que varios paquetes de datos de protocolos de comunicación tienen ciertos formatos de paquete y se pueden encontrar caracteres o cadenas específicas con información significativa extrayendo la carga útil de los paquetes. Estos contenidos de carga útil específicos sirven como indicadores para el reconocimiento del tipo de tráfico [6]. Sin embargo, este método presenta riesgos de infringir la privacidad del usuario, incurrir en altos costos de computación y volverse ineficaz cuando se trata de tráfico cifrado [16]. Nuestro enfoque evita la dependencia de la información de carga útil.

Construcción de huellas dactilares: para abordar las limitaciones de los métodos de clasificación del tráfico basados en carga útil, varios estudios han utilizado información de campo de protocolo no cifrada para la clasificación del tráfico [3]. Por ejemplo, T Van Ede et al. [17] emplea características como el tipo de dispositivo, detalles del certificado, tamaño del paquete e información de tiempo para representar cada flujo, construyendo una biblioteca de huellas digitales a través de técnicas de agrupación y correlación cruzada para una clasificación eficiente del tráfico. Sin embargo, estos métodos dependen en gran medida de información de texto sin formato, que puede alterarse fácilmente durante la transmisión, lo que lleva a la pérdida del significado exacto. Por el contrario, nuestro modelo funciona independientemente de la información de texto sin formato dentro de los paquetes de datos.

Métodos estadísticos: esta categoría implica la extracción manual de características como el tamaño y el tiempo del tráfico utilizando algoritmos de aprendizaje automático para la clasificación del tráfico. El clasificador Random Forest es un algoritmo clásico de aprendizaje automático que funciona construyendo múltiples árboles de decisión durante el entrenamiento y generando el patrón de clase para la tarea de clasificación. Este método de conjunto mejora la solidez y precisión del modelo al mitigar el problema común de sobreajuste en árboles de decisión individuales. Por ejemplo, VF Taylor et al. [9] utiliza un clasificador de bosque aleatorio con características de tamaño de paquete para tareas de clasificación. Por otro lado, Vinai George Biju [18] empleó el algoritmo Support Vector Machine (SVM) para clasificar el tráfico cifrado. SVM también es un algoritmo clásico de aprendizaje automático que funciona encontrando el hiperplano óptimo que maximiza el margen entre diferentes clases en el espacio de características, funcionando excepcionalmente bien en espacios de alta dimensión. Aunque estos métodos evitan la necesidad de inspeccionar el contenido de los paquetes, adaptándose así a la clasificación del tráfico cifrado, también enfrentan limitaciones. Las características estadísticas simples a menudo no alcanzan una clasificación precisa, y derivar características complejas exige esfuerzos y recursos significativos. Nuestra metodología se basa en características estadísticas sencillas para derivar características de firma de ruta, enriqueciendo la información de las características sin ingeniería compleja.

Modelos de aprendizaje profundo: la llegada del aprendizaje profundo ha influido significativamente en el uso de estos modelos en la clasificación del tráfico cifrado. DF [19] utiliza por primera vez una red neuronal convolucional (CNN) para extraer características del tráfico cifrado, mientras que FS-NET [20] emplea una red neuronal recursiva para la clasificación del tráfico cifrado. DeepPacket [6] y TSCRNN [21] construyen modelos combinando extracción de características y construcción de clasificadores.

Machine Translated by Google

Maneja automáticamente la extracción y clasificación de características cuando la carga útil de los paquetes originales se ingresa en el modelo. Zhang et al. [22] utilizaron redes neuronales gráficas para extraer características a nivel de paquete para la clasificación del tráfico. MT-FlowFormer [23] utiliza un transformador de flujo semisupervisado para completar la clasificación de flujo cifrada. Lin et al. [16] capturaron asociaciones sólidas y generales de paquetes de tráfico sin procesar utilizando grandes modelos previamente entrenados, como la representación de codificador bidireccional de Transformers (BERT), logrando excelentes resultados de clasificación. No obstante, los modelos de aprendizaje profundo suelen requerir arquitecturas de red complejas y vastos conjuntos de datos para un rendimiento óptimo. Por el contrario, nuestro modelo está diseñado para ser eficiente y requiere menos recursos.

2.2. Características de la firma

de la ruta Las firmas de la ruta fueron propuestas inicialmente por Chen [11] como un concepto central en la teoría de la ruta aproximada, donde "áspero" se refiere a rutas continuas que exhiben fluctuaciones bruscas en las rutas difíciles. Estas rutas son continuas pero no diferenciables en todas partes, y las secuencias continuas de tamaño de paquete en el tráfico cifrado pueden verse como rutas irregulares. En los últimos años, las firmas de rutas han recuperado la atención de los investigadores y se han aplicado con éxito en los campos del aprendizaje automático, el reconocimiento de patrones y el análisis de datos. Graham [24] utilizó funciones de firma de ruta basadas en ventana deslizante con una CNN para el reconocimiento de caracteres escritos a mano, logrando excelentes resultados. LG Gyurkó [25] utilizó firmas de ruta para extraer características de los flujos de datos financieros para la clasificación de datos financieros. IP Arribas [26] aplicó firmas de ruta al campo médico para diferenciar los trastornos mentales. En [12], se introdujo una metodología novedosa para describir firmas a través de firmas de ruta de longitud normalizada. El estudio también exploró las características de las firmas de rutas, empleándolas junto con el algoritmo Random Forest para la clasificación del tráfico cifrado. En general, estas aplicaciones demuestran la eficacia de extraer características utilizando funciones de firma de ruta y el valor de representar vectores ricos en información. La siguiente sección presenta la definición de firmas de ruta, su interpretación geométrica de bajo orden y propiedades relevantes. Para más pruebas matemáticas, consulte [11].

2.2.1. Definición de firmas de ruta Una firma

de ruta es una función de mapeo transformadora que convierte datos de ruta sin procesar en una secuencia de números reales [12]. Cada número dentro de esta secuencia se deriva de forma única a través de los puntos de datos a lo largo del camino original, capturando una característica geométrica distintiva de ese camino. Para una ruta X en el espacio euclidiano d-dimensional Rd definida como un mapeo continuo desde el intervalo [a, b] a Rd, el parámetro t [a, b] delinea una trayectoria dentro de ese espacio euclidiano d-dimensional:

$$Xt = X\left(x_{t}^{1}, x_{t}^{2}, x_{t}^{3}, \ldots, x_{t}^{d}\right). \quad (1)$$

donde X_t representa una trayectoria continua arbitraria en la d-ésima dimensión. La firma de ruta , que consta de la firma de orden cero (1) es una secuencia infinita de una ruta $X: [a, b] \rightarrow R^d$ y varios términos de firma de orden (también llamados integrales iterados):

$$S(X)_{a,b} = \left(1, S(X)^{1}_{a,b}, \ldots, S(X)^{d}_{a,b}, S(X)^{1,1}_{a,b}, S(X)^{1,2}_{a,b}, \ldots, S(X)^{d,d}_{a,b} \ldots\right) \quad (2)$$

Para una ruta X d-dimensional, su integral iterada de k veces se puede expresar de la siguiente manera:

$$S(X)^{i_1,\ldots,i_k}_{en} = \int_{a<t_k<t} \cdots \int_{a<t_1<t_2} dX_{i_1} \cdots dX_{i_k}. \quad (3)$$

En la Fórmula (3), t1, t2,. . ., tk se refieren a variables de integración que son distintas de t. Esta distinción se hace para evitar confusión con el parámetro de ruta t durante integraciones múltiples . Tomando como ejemplo la ruta bidimensional $X_t = X^{1}_{t}, X^{2}_{t}$ que se muestra en la Figura 1 , sus características de firma de ruta de tercer orden son las siguientes: {57.17, 54.67, 23.67, 30.33, 44.17, 34.33, 22.83, 20.83}.

Machine Translated by Google

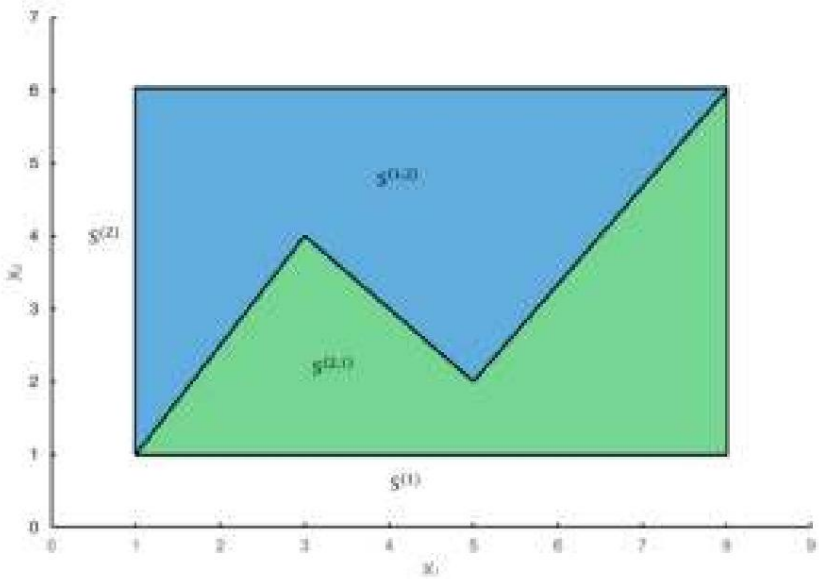


Figura 1. Interpretación geométrica del camino bidimensional.

2.2.2. Interpretación geométrica de las firmas de

caminos Para explicar mejor la interpretación geométrica de las características de las firmas de caminos, usamos un camino bidimensional Xt = X como ejemplo, donde t [0,4], (a = 0,b = 4). La ruta está definida por X = {1, 4, 2, 6}. Es importante señalar que t es un parámetro continuo; Por conveniencia, hemos elegido cuatro puntos discretos para construir el camino. La forma de la ruta se muestra en la Figura 1. Las firmas de ruta de orden cero, primer orden y segundo orden calculadas son las siguientes:

$$S = 1, S(1), S(2), S(1,1), S(1,2), S(2,1), S(2,2) = \{1, 7, 5, 24.5, 19, 16, 12.5\}. \quad (4)$$

Dentro del marco de firma de ruta, el primer elemento, indicado por 1, es una constante, lo que significa la característica de orden cero de la ruta. S 1) y S (2) representan los componentes de firma de ruta de primer orden correspondientes a las distancias de proyección de la ruta a lo largo de los ejes X1 y X2 , respectivamente. Las expresiones S (1,2) y S (2,1) denotan las áreas delimitadas (,) y (,) por el camino y las líneas rectas paralelas a los ejes de coordenadas, que se extienden a través de los puntos inicial y final del camino. Mientras tanto, S (1,1) y S (2,2) reflejan la mitad de las distancias de proyección al cuadrado (,) y (,) de la trayectoria en torno a los ejes X1 y X2 , respectivamente. Explicamos solo las características de las firmas de ruta de orden cero, primero y segundo, ya que las firmas de ruta de orden superior son difíciles de describir visualmente y nuestro método utiliza solo hasta firmas de segundo orden. ffi

2.2.3. Propiedades de las firmas de rutas

En esta sección, profundizaremos en las propiedades cruciales de las características de las firmas de rutas. Estas propiedades constituyen la base teórica y las notables ventajas de su aplicación en la clasificación del tráfico cifrado. Se detallan a continuación: • Unicidad: Hambly et al. [27] establecieron que

cada camino aproximado posee una firma de camino ffi distinta , asegurando una correspondencia uno a uno entre los caminos que no son de árbol y sus firmas. Esta propiedad fundamental afirma que las firmas de caminos pueden encapsular con precisión los rasgos geométricos de los caminos. La incorporación del tiempo como una dimensión monótonamente creciente en la secuencia del tráfico cifrado transforma estas secuencias en rutas que no parecen árboles, proporcionando así un marco teórico sólido para sustituir las rutas originales con sus características de firma de ruta como entrada para modelos analíticos. • Invariancia bajo cambios de parámetros: Diferentes estrategias de muestreo producen parámetros variados

para el mismo camino, sin embargo, la firma del camino permanece consistente a través de estas variaciones [27]. Esta invariancia implica que los resultados de clasificación para el tráfico de

Machine Translated by Google

Los tipos de aplicaciones específicos permanecen estables y no se ven afectados por la diversidad de parámetros. Aprovechar este atributo permite la eliminación de discrepancias introducidas por varias reparametrizaciones del tráfico dentro de la misma categoría, lo que destaca una ventaja crucial de utilizar características de firma de ruta.

• Invariancia de dimensión: la dimensionalidad de las características de la firma del camino está determinada únicamente por la profundidad de truncamiento elegida, independientemente de la longitud real del camino [27]. Por ejemplo, considerando el camino bidimensional discutido anteriormente $X_t = X_t^1, X_t^2$, $t \in [0,4]$, $(a = 0, b = 4)$ con $X = \{1, 3, 5, 8\}$ y $X = \{1, 4, 2, 6\}$, el truncamiento a una dimensión da como resultado una longitud de firma de ruta de 3, mientras que el truncamiento a dos dimensiones produce una longitud de 7. Esta extracción de características de longitud fija a partir de rutas de diferentes longitudes simplifica significativamente el proceso de extracción de características. , especialmente para modelos que necesitan funciones de entrada de longitud fija.

2.3. Modelo LSTM

Las redes LSTM, una subclase de redes neuronales recurrentes (RNN), se distinguen por su capacidad para mantener dependencias a largo plazo [28]. Shen et al. utilizó LSTM para analizar el coeficiente de resistencia aerodinámica de las carrocerías de los automóviles [29]. Árbitro. [30] aplicaron LSTM para predecir los niveles de agua subterránea, mostrando la capacidad del modelo para manejar datos ambientales fluctuantes y proporcionar pronósticos precisos. Árbitro. [31] exploró las perspectivas de aplicar LSTM en el campo de la conducción autónoma, destacando su potencial para procesar y aprender de grandes cantidades de datos secuenciales. Estas diversas aplicaciones subrayan la versatilidad de LSTM en diversos campos y su sólida capacidad para manejar datos de series temporales. Como se ilustra en la Figura 2, las unidades LSTM se distinguen de los RNN tradicionales mediante la integración de tres "puertas" distintas, que en conjunto mejoran las capacidades de administración de memoria del modelo [32]: • Puerta de entrada: supervisa el flujo de datos entrantes a la celda, decidiendo cuánta información nueva debe almacenarse;

• Puerta de salida: determina en qué medida el estado actual de la celda influye en otros.
partes de la red, controlando el flujo de salida;
• Forget Gate: ajusta las conexiones autorrecurrentes de la celda usando funciones sigmoideas para escalar valores entre 0 y 1, determinando qué información se descarta o se retiene.

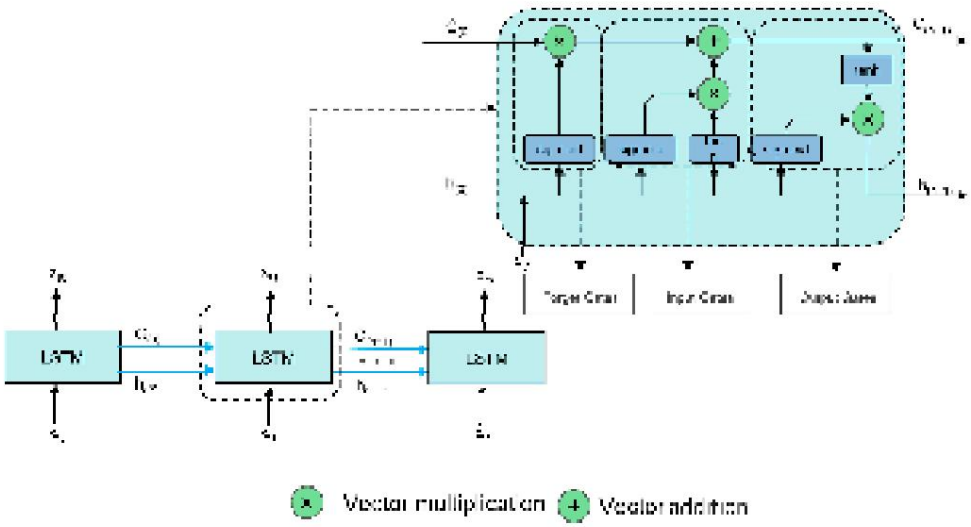


Figura 2. Arquitectura del modelo LSTM.

Como modelo típico de series de tiempo, LSTM maneja eficazmente las características de firma de ruta dentro de secuencias. Conocido por su capacidad para capturar dependencias a largo plazo en datos secuenciales [29–31], LSTM es particularmente adecuado para esta tarea debido a la naturaleza secuencial inherente de los datos de tráfico de red. En comparación con otros modelos de aprendizaje profundo conocidos, como CNN o Transformers, LSTM tiene las siguientes ventajas en esta tarea de clasificación de tráfico cifrado:

Machine Translated by Google

• Mejor manejo de las dependencias temporales: si bien las CNN destacan en la captura de jerarquías y patrones espaciales, suelen ser más efectivas en el procesamiento de datos con correlaciones espaciales (como imágenes) y no pueden capturar dependencias temporales con tanta eficacia como LSTM [33]. • Procesamiento de datos más sencillo y directo:

la aplicación de CNN a datos de secuencia requiere transformar la serie temporal a un formato adecuado para operaciones de convolución, lo que requiere un procesamiento de datos más complejo. Por el contrario, LSTM permite la entrada directa de características de series temporales en el modelo.

• Menores requisitos de recursos computacionales: los modelos Transformer han ganado popularidad recientemente por su éxito en tareas de secuencia a secuencia, especialmente en el procesamiento del lenguaje natural. Los transformadores utilizan mecanismos de autoatención para capturar dependencias entre diferentes partes de la secuencia de entrada, independientemente de su distancia [34]. Si bien esto es beneficioso para capturar dependencias globales, los Transformers generalmente requieren recursos computacionales sustanciales y grandes conjuntos de datos para la capacitación práctica. Las redes LSTM, que utilizan mecanismos de activación inherentes para procesar datos secuenciales, requieren menos recursos computacionales para el entrenamiento y la implementación.

3. Metodología 3.1.

Descripción general del enfoque

El flujo de proceso de nuestro método para clasificar el tráfico cifrado se ilustra en la Figura 3. Inicialmente, durante la fase de preprocesamiento de datos, analizamos los archivos pcap de conjuntos de datos de acceso público empleando el criterio de cinco tuplas y posteriormente descartamos los paquetes que carecen de cargas útiles válidas. Este paso asegura la creación de flujos de datos de longitud uniforme. Pasando a la fase de extracción de características, derivamos atributos de tamaño, dirección y tiempo de llegada a partir de estos flujos de datos uniformes para establecer rutas de tráfico. Se aplica un proceso de transformación a estas rutas de tráfico para enriquecerlas con información adicional. La siguiente etapa implica aprovechar técnicas de acumulación de múltiples escalas para destilar las características distintivas de estas rutas de tráfico mejoradas. Después de extraer estas características, aplicamos técnicas de equilibrio de datos para lograr un conjunto de entrenamiento bien equilibrado. Estas características de firma de ruta optimizadas se ingresan en un modelo LSTM y en capas completamente conectadas para ejecutar la tarea de clasificación final. En los próximos subapartados se profundizará en cada fase de esta metodología .

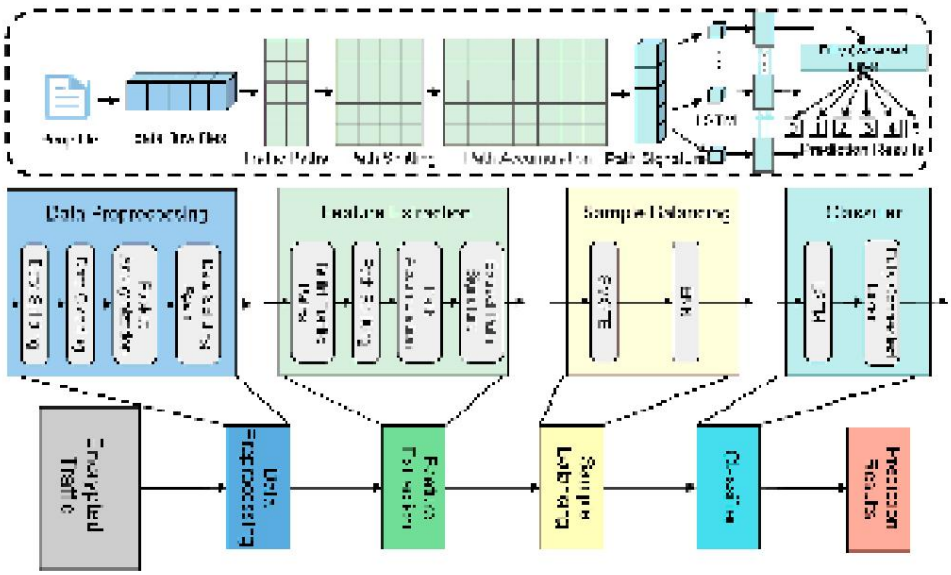


Figura 3. El marco general de nuestro enfoque.

Machine Translated by Google

3.2. Preprocesamiento de

datos Al manejar los archivos pcap sin procesar del conjunto de datos, empleamos SplitCap para segregarlos en archivos de sesión individuales, utilizando los criterios de cinco tuplas: IP de origen, puerto de origen, IP de destino, puerto de destino y el protocolo de capa de transporte [3]. . Los siguientes pasos implican eliminar sesiones sin datos y duplicadas. Para mitigar el riesgo de sobreajuste del modelo con este conjunto de datos, anonimizamos las direcciones MAC e IP en los datos del paquete sustituyéndolas por ceros [6]. Después de esto, refinamos aún más los archivos de sesión para asegurarnos de que cada uno contenga exactamente 24 paquetes de datos, un parámetro cuyo significado se detallará en la próxima sección experimental. Se excluyen las sesiones que no cumplen con el criterio de 24 paquetes de datos , lo que genera archivos de muestra que se alinean con los requisitos previos de nuestro experimento.

3.3. Construir rutas de

tráfico Al estandarizar los archivos de sesión a una longitud uniforme, categorizamos los paquetes de datos transmitidos desde el cliente al servidor con valores positivos mientras etiquetamos los paquetes que se mueven en la dirección inversa con valores negativos. Este proceso da como resultado la creación de una secuencia de longitud de paquete de datos, L = (l1, l2, ..., ln), donde l representa la longitud de cada paquete de datos [26]. Además, capturamos la hora de llegada de cada paquete de datos. Para sincronizar estas marcas de tiempo, normalizamos los datos para compilar una secuencia de tiempo para los paquetes, denotada como T = (t1, t2, ..., tn), donde t representa el tiempo de llegada de cada paquete de datos.

3.4. Transformar rutas de tráfico

Tras la extracción de características de firma de ruta bidimensionales, que encapsulan el tiempo y la longitud del paquete de datos, reconocemos que la representación de la información entre sesiones sigue siendo incompleta. Para mejorar la utilización de las características entre sesiones, adoptamos una metodología inspirada en el trabajo de Xu et al. [12]. Este enfoque implica transformar las rutas de tráfico originales para revelar capas adicionales de información, facilitando así un análisis más detallado e informativo.

3.4.1. División de ruta

En nuestro método, el término "cliente" se refiere a los usuarios que requieren servicios de Internet. Es el uso que los clientes hacen de diversos servicios en Internet lo que genera diferentes tipos de tráfico cifrado. Por ejemplo, cuando un usuario carga o descarga archivos en línea, se produce tráfico de transferencia de archivos. De manera similar, cuando un usuario utiliza servicios de transmisión, como escuchar música o mirar videos, se genera tráfico de transmisión. Para representar con mayor precisión la dinámica del flujo de tráfico entre el cliente y el servidor, dividimos la secuencia de longitud del paquete de datos en dos secuencias distintas. Una secuencia captura las transmisiones de datos del cliente al servidor, mientras que la otra detalla las transmisiones del servidor al cliente [12]. Esta división se formaliza de la siguiente manera.

Para transmisiones de cliente a servidor:

$$C = (c1, c2, \ldots, cn),\ ci = \begin{matrix} 0,\ li < 0\ li\ , \\ li > 0.. \end{matrix} \quad (5)$$

Por el contrario, para transmisiones de servidor a cliente:

$$S = (s1,s2, \ldots ,sn), si = \begin{matrix} li\ ,\ li < 0\ 0, \\ li > 0.. \end{matrix} \quad (6)$$

Al asignar como cero tamaños de paquetes de datos de la dirección opuesta de transmisión, subrayamos las propiedades de flujo distintivas inherentes a cada dirección, sentando un marco fundamental para futuras transformaciones de ruta.

3.4.2. Acumulación de ruta

Las características de acumulación desempeñan un papel crucial en la clasificación del tráfico cifrado [35], principalmente porque el tamaño de la carga útil tiende a permanecer constante en el mismo tipo de tráfico.

Machine Translated by Google

servicio, lo que lleva a patrones de acumulación similares. Para aprovechar esta coherencia para revelar información dentro de las cargas útiles de tráfico cifrado, definimos las características de acumulación como sigue a continuación.

Acumulación directa de longitudes de paquetes:

$$l' = yo_{1,2,\cdots,norte,i} = \sum_{yo=1}^{k} li, \quad (7)$$

Para transmisiones dirigidas al cliente:

$$C' = c_{1,2,en,\cdots,C} \quad C = \sum_{yo=1}^{k} ci, \quad (8)$$

Para transmisiones dirigidas al servidor:

$$S' = s_{1,s2,\cdots,s} \quad ,s_i = \sum_{yo=1}^{k} sí. \quad (9)$$

De esta manera logramos una representación integral de la ruta del tráfico a través de la siguiente:

$$Xl_t c,s,l',c',s',t = L, C, S, L \quad , C', S', t \quad , t \quad [0, norte]. \quad (10)$$

Esta representación integra las secuencias de longitud de los paquetes de datos iniciales y sus versiones acumuladas junto con la secuencia de tiempo de llegada, ofreciendo una visión multifacética de la situación. flujo de tránsito para una adecuada clasificación. Tomando una ruta de tráfico específica L = [194,−83,−32,53,86] y T = [0,2,5,8,10] como ejemplo, la ruta de tráfico transformada correspondiente se muestra en Tabla 1.

Tabla 1. Ejemplos de siete rutas de tráfico diferentes.

$X_5^{l,c,s,l',c,s',t}$						
l	C	S	l′	C′	S′	t
194	194	0	194	194	0	0
−83	0	−83	111	194	−83	2
−32	0	−32	79	194	−115	5
53	53	0	132	247	−115	8
86	86	0	218	333	−115	10

3.5. Extracción de firma de ruta

Tras la transformación de las rutas de tráfico, nuestro siguiente paso consiste en extraer la señalización de las rutas. características de la naturaleza. Definimos la característica de ruta f para cada ruta transformada de la siguiente manera:

$$pies = \varphi(X_t^{l,c,s,l',c',s',t}), \quad t \quad [0, norte]. \quad (11)$$

Aquí, φ (X) denota la función responsable de extraer la firma de la ruta y ft representa la firma de ruta de los primeros t paquetes de datos. Es importante observar que La dimensionalidad de las características de la firma de la ruta depende únicamente de la ruta elegida. profundidad de truncamiento, independiente de la longitud real de cada camino. Dentro de muchos a uno En el modelo LSTM, se acostumbra utilizar las características del último paso de tiempo como entrada para el análisis final. clasificación.

Aprovechando las propiedades únicas de la firma de la ruta y el modelo LSTM, como Como se muestra en la Figura 4, presentamos una novedosa extracción de características de acumulación de múltiples escalas. acercarse. Este método mejora el valor informativo extraído en el paso de tiempo final. entrada al modelo. Se detalla la formulación y estructura de la secuencia de características de entrada. como sigue:

$$F = (f2, f3, \ldots, fn). \quad (12)$$

Machine Translated by Google

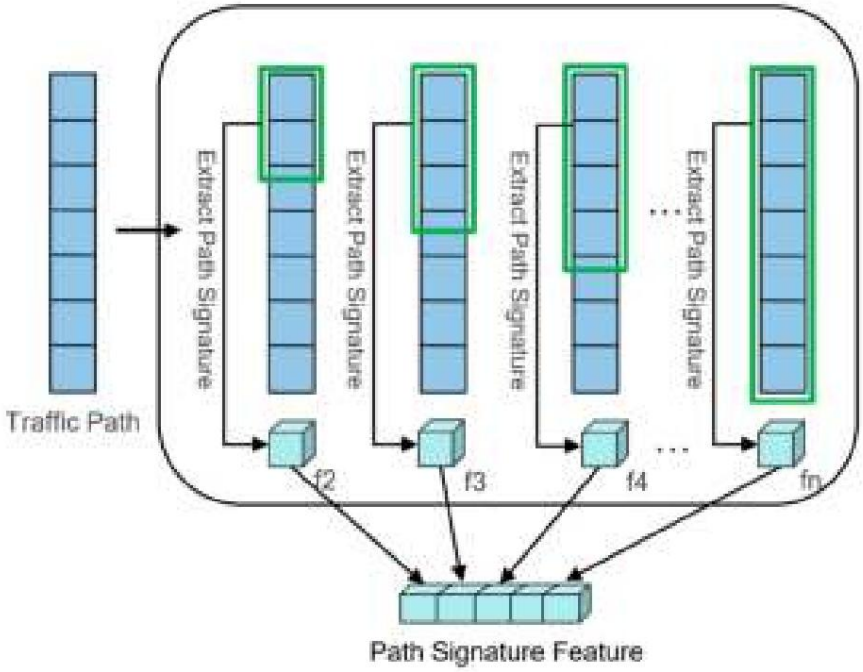


Figura 4. Método de extracción de características de acumulación de múltiples escalas.

El requisito de que n ≥ 2 surge de la consideración de que una firma de ruta basada en menos de dos paquetes de datos carece de relevancia sustancial. Cuando n = 1, la firma de la ruta se reduce a simplemente reflejar la longitud y el tiempo de llegada de un solo paquete de datos, sin satisfacer los criterios de nuestra configuración experimental. En consecuencia, compilamos la secuencia de firmas de ruta F, donde cada elemento contiene las características de firma de ruta de los primeros n paquetes de datos, y todas las firmas de ruta tienen la misma dimensión.

3.6. Equilibrio de

datos Encontrar datos desequilibrados en diferentes clasificaciones es un problema común al recopilar datos experimentales de conjuntos de datos. La implementación de técnicas de equilibrio de datos es fundamental para reforzar la eficacia de las tareas de formación. Esta sección describe las estrategias que hemos adoptado para lograr el equilibrio de datos.

3.6.1. SMOTE (Técnica de sobremuestreo de minorías sintéticas)

Introducido por Chawla [36], SMOTE es una metodología de sobremuestreo líder para rectificar problemas de desequilibrio de datos. Aumenta el conjunto de datos mediante la creación de nuevas instancias sintéticas para la clase minoritaria derivadas de observaciones existentes. Dentro del espacio característico, SMOTE elabora muestras sintéticas que se asemejan a la clase minoritaria. Específicamente, para cada muestra de clase minoritaria, SMOTE identifica sus n vecinos más cercanos utilizando la distancia euclidiana. Después de esto, se elige un vecino al azar, generando un vector que vincula a este vecino y la muestra. Luego se forma una instancia sintética agregando una fracción aleatoria de este vector a la muestra original. Este procedimiento se repite hasta que se alcanza la tasa de sobremuestreo objetivo [36]. La fórmula del algoritmo SMOTE se proporciona de la siguiente manera: ff ff

$$R_n = s + rand(0,1) \times |s - s_R|, \quad 0 \le d \le 1. \tag{13}$$

donde s simboliza las muestras de clase minoritaria, s_R denota los vecinos determinados por k vecinos más cercanos, d es un valor seleccionado aleatoriamente dentro del rango [0,1] y n representa la muestra sintética generada. Como se muestra en la Figura 5, dos puntos de diferentes colores representan dos tipos diferentes de muestras, los tres vecinos más cercanos de la muestra s son s1 R, s2 R y s3 Utilizando el método SMOTE, se selecciona aleatoriamente un vecino s1 para la muestra s y se obtiene una nueva muestra n mediante el cálculo.

Machine Translated by Google

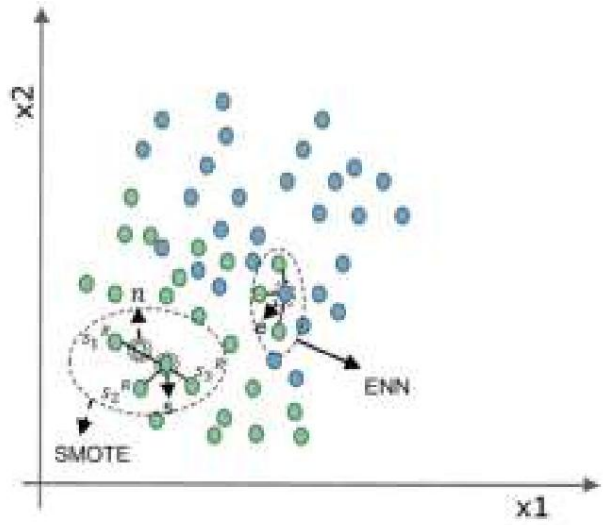


Figura 5. El ejemplo de SMOTE y ENN.

3.6.2. ENN (Vecinos más cercanos editados)

ENN emplea el algoritmo de k vecinos más cercanos como estrategia de muestreo secundaria [37]. Su objetivo es podar el conjunto de datos eliminando instancias que probablemente estén mal clasificadas. ENN calcula la distancia euclidiana para cada instancia para identificar sus k vecinos más cercanos (donde k comúnmente se establece en 3). Si la mayoría de estos vecinos no comparten la clase de la instancia, la instancia y sus vecinos se eliminan del conjunto de datos [37]. Por lo tanto, ENN puede disminuir efectivamente la presencia de muestras de clases mayoritarias dentro del conjunto de entrenamiento. Tomando la muestra e en la Figura 5 como ejemplo, sus k (establecidos en 3) vecinos son todos de otras clases. Utilizando el método ENN, se eliminarán las cuatro muestras.

3.6.3. SMOTE-ENN

SMOTE-ENN combina las fortalezas de SMOTE y ENN en un enfoque unificado para el equilibrio de datos, como propone Batista et al. [38]. Inicialmente, el conjunto de datos se mejora mediante el algoritmo SMOTE, que amplifica la representación de la clase minoritaria mediante la creación de muestras sintéticas. Una vez que se produce una cantidad adecuada de muestras de clases minoritarias , se aplica el algoritmo ENN para refinar aún más el conjunto de datos eliminando instancias cercanas al límite de clasificación. Esta aplicación secuencial de SMOTE y ENN facilita un conjunto de muestras distribuido de manera más uniforme entre las clases [38].

3.7. Entrada al modelo LSTM

La secuencia de firmas de ruta, denominada F, sirve como entrada para el modelo LSTM, preparando el escenario para el proceso de clasificación. La configuración de los pasos de tiempo dentro del LSTM se correlaciona directamente con la longitud de la ruta de tráfico inicial, reducida en uno. En consecuencia, la característica fn+1 en el enésimo paso de tiempo encapsula la firma de ruta de una ruta de tráfico que comprende n + 1 paquetes de datos. Esta disposición garantiza que con cada paso de tiempo adicional, se incorpore progresivamente más información, enriqueciendo la representación de los datos. En particular, la función en el paso de tiempo final integra la firma de la ruta de todo el recorrido del tráfico, incorporando la información más exhaustiva disponible.

La capacidad de memoria inherente del modelo LSTM [28] juega un papel fundamental, permitiendo que cada paso aproveche y transmita información de los pasos anteriores. Como resultado, el paso de tiempo final agrega efectivamente información a lo largo de toda la secuencia, evitando los posibles inconvenientes de depender únicamente de características globales. Esta integración integral de información ff aumenta significativamente la precisión de clasificación del modelo.

Machine Translated by Google

3.8. Capa completamente conectada

Después del procesamiento de la secuencia de entrada por parte del LSTM, la salida del último paso de tiempo se somete a extracción y luego se dirige hacia una capa completamente conectada, donde el Se actualiza el esfuerzo de clasificación. La esencia de esta capa radica en su capacidad de transición las características de datos adquiridas por LSTM en el dominio del espacio de etiquetas. La operación dentro del La capa completamente conectada se representa matemáticamente de la siguiente manera:

$$Y = An \times X + B. \quad (14)$$

donde Y es el vector de salida, W es el peso de la capa completamente conectada, X es la entrada vector derivado del paso de tiempo final del LSTM, y B es el sesgo.

3.9. Flujo de trabajo completo

En esta sección, explicaremos en detalle el flujo de trabajo de nuestro método propuesto. Después Al capturar un segmento de tráfico, primero extraemos las dos características estadísticas básicas de la longitud del paquete. y tiempo de llegada del paquete para formar la ruta de tráfico. Luego dividimos la secuencia de longitud del paquete. en dos caminos que representan la dirección de transmisión del paquete. A continuación, realizamos una proceso de acumulación para obtener tres rutas que representan la longitud acumulada del paquete transmisión. Esto da como resultado una ruta de tráfico de siete dimensiones.

Al emplear la función de característica de firma de ruta, transformamos el sistema de siete dimensiones. ruta de tráfico en características de firma de ruta de alta dimensión, que luego se introducen en el LSTM modelo. El modelo LSTM procesa la secuencia de entrada de forma progresiva, paso a paso. En cada paso de tiempo, las características de entrada interactúan con el estado oculto y el estado de la celda de memoria del paso de tiempo anterior. A través de una serie de mecanismos de activación, el estado oculto y la memoria El estado de la celda se actualiza en cada paso de tiempo, lo que permite que el modelo capture eficazmente el tiempo. dependencias dentro de los datos de tráfico.

Después de procesar toda la secuencia, el estado oculto del modelo LSTM en la final El paso de tiempo se selecciona como salida de la característica. Este estado oculto tiene información integrada. de toda la secuencia de entrada y representa las características globales de los datos de la secuencia. Luego, el estado oculto seleccionado se ingresa en una capa completamente conectada. El totalmente conectado La capa, a través de una serie de pesos y funciones de activación, procesa aún más lo oculto. state para generar una distribución de probabilidad para el resultado de la clasificación. La tabla 2 ilustra los cambios de forma en cada etapa del procesamiento de una secuencia de tráfico cifrado que contiene 24 paquetes.

Tabla 2. Cambios en la forma de los datos en cada etapa de procesamiento.

Escenario	Descripción	Forma
Datos sin procesar	Capturar secuencia de tráfico cifrado	—
Construir rutas de tráfico	Extraer la longitud del paquete y la hora de llegada	(24, 2)
División de ruta	Dividir la secuencia de longitud en dos caminos	(24, 4)
Acumulación de ruta	Acumular secuencias de tres longitudes.	(24, 7)
Extrayendo ruta Firma	Utilice la función de característica de firma de ruta para extraer características de firma de ruta	(24, 56)
Entrada LSTM	Utilice características de firma de ruta como entrada para LSTM	(1, 24, 56)
Unidades ocultas LSTM	64 unidades ocultas de entrada de proceso de capa LSTM secuencia, devolviendo estados ocultos para todos los pasos del tiempo	(1, 24, 64)
Estado oculto final	Seleccione el estado oculto del último paso de tiempo en el modelo LSTM e ingrese el total capa conectada	(1, 64)
Salida de capa completamente conectada	La capa completamente conectada genera la distribución de probabilidad de la resultado de clasificación	(dieciséis)

Machine Translated by Google

4. Discusión

En esta sección, profundizaremos en varios aspectos de nuestro marco experimental, arrojando luz sobre varias facetas, como el entorno experimental, las métricas de evaluación, los conjuntos de datos empleados, las técnicas de procesamiento de datos y la selección de hiperparámetros. Además, para establecer la eficacia y la ventaja competitiva de nuestra metodología, llevamos a cabo experimentos comparativos con las técnicas convencionales predominantes. También se llevaron a cabo estudios de ablación para subrayar la contribución y el impacto de los componentes individuales dentro de nuestro marco propuesto.

4.1. Entorno experimental

Los experimentos se realizaron en un sistema operativo Windows 10 con Python versión 3.9. Implementamos el modelo LSTM usando PyTorch versión 1.13.1. Establecimos la tasa de aprendizaje inicial para el entrenamiento del modelo en 0,0001 y las épocas de entrenamiento en 500. El modelo LSTM utilizado para este experimento tiene 64 dimensiones ocultas y la dimensión de salida de la siguiente capa completamente conectada es 6, correspondiente a la clasificación de seis clases. tarea de los tipos de servicios de tráfico cifrado.

4.2. Métricas de evaluación

Empleamos cuatro métricas de evaluación para evaluar el desempeño del método: exactitud (AC), precisión (PR), recuperación (RC) y puntuación F1 (F1). Los verdaderos positivos (TP) son muestras positivas identificadas correctamente, los falsos positivos (FP) son muestras negativas mal clasificadas como positivas, los verdaderos negativos (TN) son muestras negativas correctamente identificadas y los falsos negativos (FN) son muestras positivas mal clasificadas como negativas.

$$\text{Precisión} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \tag{15}$$

$$\text{Precisión} = \frac{TP}{TP + PF,} \tag{dieciséis}$$

$$\text{Recordar} = \frac{TP}{TP + FN}, \tag{17}$$

$$\text{Puntuación F1} = \frac{2 \quad \text{Precisión} \quad \text{Recuperación}}{\text{Precisión} + \text{Recuperación}}. \tag{18}$$

Estas métricas ofrecen una visión integral de la eficacia del modelo, resumiendo su exactitud, precisión y sensibilidad al clasificar los datos en sus respectivas categorías.

4.3. Conjuntos de datos

Para verificar exhaustivamente el rendimiento de nuestro método propuesto, utilizamos dos conjuntos de datos disponibles públicamente: el conjunto de datos ISCX VPN-nonVPN [39] y el conjunto de datos ISCX Tor-nonTor [40]. Estos conjuntos de datos fueron publicados por la Universidad de New Brunswick.

El conjunto de datos ISCX VPN-nonVPN consta de dos partes: ISCX-VPN e ISCX-nonVPN. El conjunto de datos ISCX-VPN contiene tráfico capturado en un entorno VPN para seis tipos de servicios: chat, correo electrónico, transferencia de archivos, streaming, P2P y VoIP. El conjunto de datos ISCX-nonVPN incluye los mismos tipos de tráfico, pero capturados fuera del entorno VPN.

De manera similar, el conjunto de datos ISCX Tor-nonTor se divide en ISCX-Tor e ISCX-nonTor. El conjunto de datos ISCX-Tor recopila tráfico a través de la red Tor, lo que proporciona un alto nivel de anonimato. El conjunto de datos ISCX-nonTor contiene tráfico recopilado fuera del entorno Tor, con tipos de tráfico idénticos a los del conjunto de datos ISCX-VPN. En la Tabla 3 se presentan las principales aplicaciones correspondientes a cada tipo de servicio y se proporciona una breve descripción.

Machine Translated by Google

Tabla 3. Detalles del conjunto de datos.

Servicio	Solicitud	Descripción
Charlar	Objetivo, ICQ, Skype, Facebook, Hangouts	Tráfico generado durante el chat en línea comunicación
Correo electrónico	Correo electrónico, Gmail	Tráfico generado durante el correo electrónico transmisión
Transferencia de archivos	Skype SFTP, FTPS, SCP	Tráfico generado durante la carga de archivos y descargas
Transmisión	Vimeo, Youtube, Netflix, Spotify	Tráfico generado al usar aplicaciones de transmisión
P2P	uTorrent, BitTorrent	Tráfico generado al compartir torrent recursos usando programas P2P
VoIP	facebook, skype, Hangouts, VoipBuster	Tráfico generado durante llamadas de voz en línea

Después de obtener el conjunto de datos, utilizamos la longitud del paquete y el tiempo de llegada para construir características de nuestra firma de ruta. La longitud del paquete se refiere al tamaño en bytes de cada paquete en el flujo de datos. Dado que la transmisión de tráfico en una red suele ser bidireccional, agregamos Señales positivas y negativas para indicar la dirección del tráfico: tráfico del cliente a el servidor se configuró como positivo y el tráfico del servidor al cliente se configuró como negativo. Esto creó una secuencia de longitud de paquete que representa tanto la dirección de transmisión como tamaño de carga de paquetes.

La hora de llegada del paquete se refiere a la hora a la que se recibe cada paquete, a partir de la recepción del primer paquete y registrar la hora de llegada de cada paquete posterior. Esto da como resultado una serie de tiempo creciente que representa la frecuencia de transmisión del paquetes. Segmentando y acumulando la secuencia de longitud del paquete y normalizando los tiempos de llegada de los paquetes, obtuvimos la ruta de tráfico final. Esta ruta fue luego ingresada en la función de característica de firma de ruta para derivar las características de firma de ruta de tráfico requeridas para nuestro método.

4.4. Equilibrio de datos

Al abordar el desequilibrio de muestra inherente al conjunto de datos ISCX VPN-nonVPN para Para la clasificación del tráfico cifrado, nuestra metodología empleó un enfoque multifacético para garantizar una representación equitativa entre los diferentes tipos de servicios de tráfico. Inicialmente, un umbral Se estableció un total de 5000 muestras, por lo que las categorías que excedían este número tenían una distribución aleatoria. Se eligió un subconjunto de 5000 muestras, mientras que se utilizaron categorías que caían por debajo de este umbral. todas las muestras disponibles para maximizar el uso de datos. Después de esta selección, la categoría con el Se identificó el recuento de muestra más bajo, estableciendo un punto de referencia para la uniformidad. Una porción correspondiente a una quinta parte de este recuento mínimo se extrajo de cada categoría para Reúna un conjunto de pruebas completo que garantice una representación equilibrada. El SMOTE-ENN se aplicó para abordar el desequilibrio residual en el conjunto de datos de entrenamiento, sintetizando nuevos muestras para clases minoritarias y eliminar muestras ambiguas para refinar la calidad del conjunto de datos. La Figura 6 compara el número de muestras para cada categoría antes y después del equilibrio para los datos del conjunto de entrenamiento en el conjunto de datos ISCX-VPN.

Machine Translated by Google

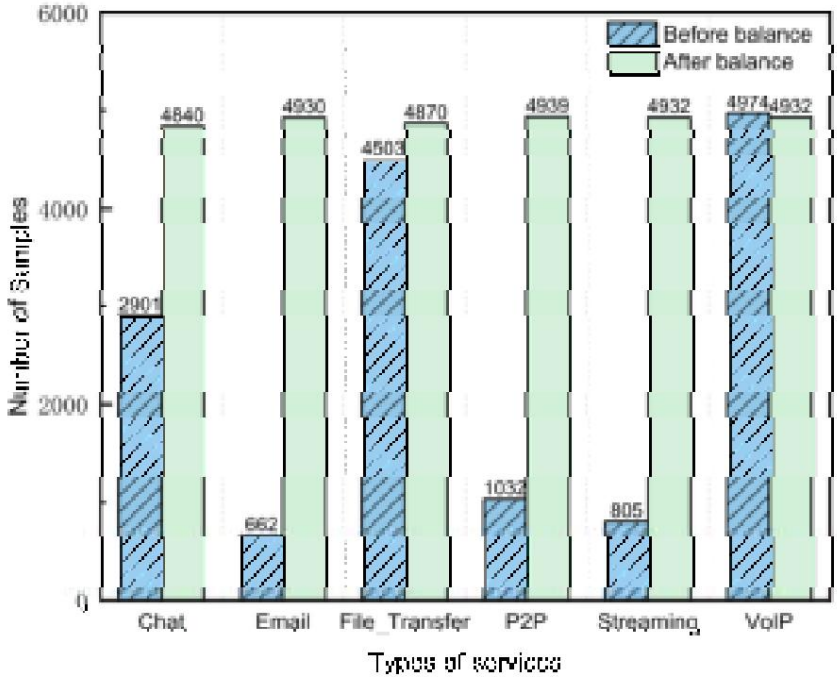


Figura 6. El número de muestras.

4.5. Selección de parámetros

En nuestros experimentos, los valores de dos hiperparámetros cruciales, a saber, la longitud de las rutas de tráfico y las dimensiones de las firmas de las rutas, desempeñaron un papel importante y estaban estrechamente relacionados con el rendimiento del modelo. Ellos moldearon directamente la capacidad del modelo para aprender de los datos e interpretarlos, influyendo en la profundidad y amplitud del análisis. La longitud de la ruta del tráfico determina los datos de entrada para cada instancia de análisis, lo que afecta la comprensión del modelo sobre la continuidad de la sesión. Mientras tanto, la dimensionalidad de las firmas de las rutas afecta la complejidad y el detalle de las características extraídas de las rutas de tráfico, equilibrando la riqueza de la información y la viabilidad computacional. En esta sección, detallamos el proceso de obtención de estos hiperparámetros.

La longitud óptima de la ruta de tráfico viene dictada por la necesidad de incluir un número suficiente de paquetes de datos consecutivos con cargas útiles válidas en un archivo de sesión, que construye la base de la ruta de tráfico original. Una longitud de ruta demasiado concisa puede dar lugar a que los archivos de sesión carezcan de datos adecuados para tareas eficaces de clasificación del tráfico. Por el contrario, las rutas de tráfico demasiado alargadas pueden aumentar innecesariamente los requisitos de recopilación de datos sin obtener ganancias proporcionales en la precisión de la clasificación [41]. Discernir la longitud óptima de las rutas de tránsito fue vital como elemento fundamental en nuestro diseño experimental.

Al clasificar los tipos de servicios para tráfico cifrado en condiciones de VPN, nuestro objetivo era determinar la longitud de ruta óptima. Como se muestra en la Figura 7, cuando la longitud del camino era relativamente corta, la precisión de la clasificación fluctuó y mejoró gradualmente al aumentar la longitud del camino para cualquier dimensión dada. Cuando la longitud del camino alcanzó 20, los modelos de varias dimensiones lograron un rendimiento de clasificación relativamente bueno. Entre estos, el modelo de ruta bidimensional alcanzó la mayor precisión de clasificación (94,74%) cuando la longitud de la ruta era 24. Posteriormente, a medida que aumentó la longitud de la ruta, la precisión de la clasificación no mejoró significativamente y, en algunas dimensiones, incluso disminuyó. En consecuencia, seleccionamos 24 como nuestro parámetro óptimo para la longitud del camino.

Además, la elección de las dimensiones de la firma del camino es igualmente crítica. Las firmas de ruta de orden superior encapsulan inherentemente más información que sus contrapartes de orden inferior. Sin embargo, un aumento en las dimensiones de la firma del camino precipita un aumento exponencial en las dimensiones de las características [11]. Por ejemplo, una característica de firma de segundo orden en una ruta de tráfico de siete dimensiones tendría una dimensionalidad de 56, aumentando a 399 para el tercer orden y 2800 para el cuarto orden. Esta tendencia subraya el equilibrio necesario

Machine Translated by Google

entre la ganancia de información del aumento de las dimensiones de la firma de la ruta y la resultante complejidad computacional.

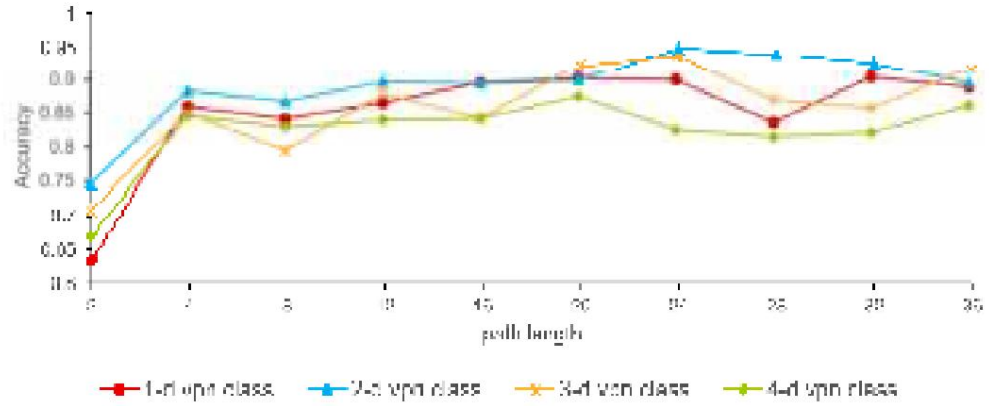


Figura 7. Efecto de la longitud y dimensión del paquete (precisión).

Como se muestra en la Figura 7, según nuestros experimentos, aumentar las dimensiones no mejorar significativamente el rendimiento de la clasificación. Hubo una ligera disminución en el rendimiento cuando las dimensiones se aumentaron a cuatro. Optamos por un camino bidimensional la firma como parámetro óptimo considerando el rendimiento de clasificación y la eficiencia computacional.

4.6. Análisis de sensibilidad

Para evaluar la solidez de nuestro método, realizamos un análisis de sensibilidad. El análisis de sensibilidad es una técnica utilizada para evaluar la capacidad de respuesta de un modelo a los cambios de parámetros. Observamos el impacto en el rendimiento del modelo al variar la tasa de aprendizaje y los parámetros de regularización durante el entrenamiento del modelo. Expresamente, al evaluar el impacto de la tasa de aprendizaje, establecemos el parámetro de regularización L2 en 0.0001, y mientras evaluamos la impacto del parámetro de regularización, establecemos la tasa de aprendizaje en 0,0001. el experimento Los resultados se muestran en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Precisión de clasificación bajo diferentes tasas de aprendizaje.

Tasa de aprendizaje	0.1	0,01	0.001	0.0001	0.00001
Exactitud	0.8596	0.8918	0.9152	0.9474	0.9298

Tabla 5. Precisión de clasificación bajo diferentes parámetros de regularización.

Parámetros de regularización	0,01	0.001	0.0001	0.00005	0.00001
Exactitud	0.8099	0.9006	0.9474	0.921	0.9152

Se puede observar que a medida que cambiaron la tasa de aprendizaje y los parámetros de regularización, La precisión de clasificación de nuestro método propuesto se mantuvo consistentemente alta, a pesar de algunos fluctuaciones. Esto indica la gran solidez de nuestro método. La capacidad de mantener una El alto nivel de precisión en diferentes condiciones demuestra la confiabilidad y estabilidad. de nuestro enfoque.

4.7. Estudio de ablación

Para resaltar las contribuciones de cada componente dentro de nuestro método propuesto para clasificación de tráfico cifrado, ejecutamos una serie de estudios de ablación. Estos estudios fueron diseñado para evaluar el impacto de la característica de firma de ruta individualmente, la escala múltiple Método de extracción de características acumulativas y modelo LSTM sobre el rendimiento general.

Machine Translated by Google

Ablación de características de firma de ruta: para esta parte del estudio, ya no extraemos características de firma de ruta de las rutas de tráfico. En cambio, las muestras sin procesar de características de siete dimensiones se introdujeron directamente en el modelo LSTM, sin pasar por el paso de procesamiento de la firma de la ruta. Todas las demás condiciones experimentales se mantuvieron utilizando el método establecido.

Ablación del método de extracción de características: al evaluar el papel de nuestro método de extracción de características acumulativas de múltiples escalas, dejamos de lado este enfoque avanzado en favor del método clásico al que hacen referencia Xu et al. [12]. Las características obtenidas mediante este proceso de extracción tradicional se introdujeron en el modelo LSTM para su clasificación. Nuevamente, este ajuste se realizó manteniendo todos los demás parámetros experimentales sin cambios.

Ablación del modelo LSTM : para examinar la contribución específica del modelo LSTM, lo reemplazamos con un algoritmo de bosque aleatorio para la tarea de clasificación, empleando configuraciones de parámetros alineadas con las sugeridas por Xu [12]. Esta sustitución nos permitió comparar directamente la eficacia de LSTM con una técnica de clasificación alternativa bien establecida.

Los resultados de estos experimentos de ablación, como se muestra en la Figura 8, exhiben variaciones significativas de ff cuando se yuxtaponen con los resultados obtenidos utilizando nuestro método completo. Estas diferencias resaltan el papel fundamental de cada componente en nuestra metodología, validando su necesidad y eficacia colectivas para mejorar la precisión de la clasificación.

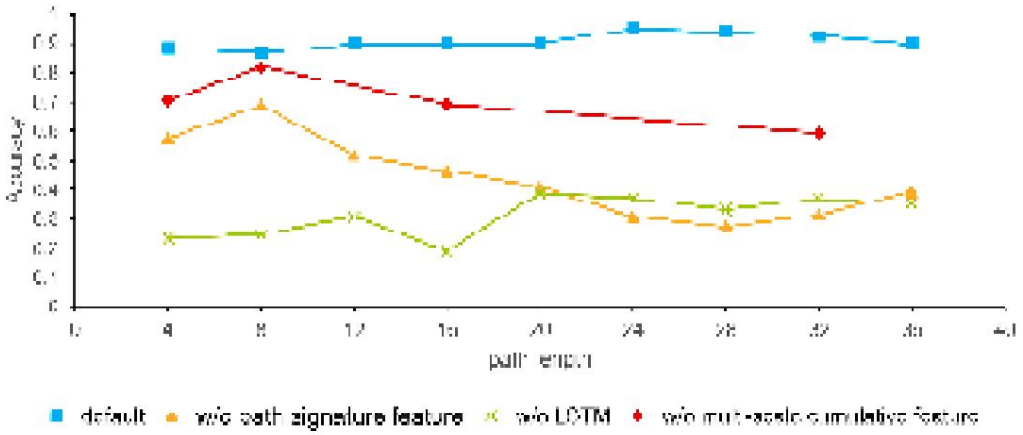


Figura 8. Resultados de los estudios de ablación.

A través de estos estudios de ablación, se demostró el valor integral y el efecto sinérgico de las características de la firma de la ruta, el novedoso método de extracción de características y el modelo LSTM , afirmando sus contribuciones indispensables al rendimiento superior de nuestro método.

4.8. Experimentos de comparación

4.8.1. Los métodos de referencia

Para determinar la efectividad de nuestro método de clasificación de tráfico cifrado propuesto, se comparó con 11 enfoques convencionales contemporáneos. Estas metodologías abarcan lo siguiente: 1. Construcción de huellas dactilares: FlowPrint [17]; ff Métodos estadísticos: AppScanner [9], CUMUL [35], K-FP (K-Fingerprinting) [42], 2. GRANO [43] y ETC-PS [12];

3. Modelos de aprendizaje profundo: FS-net [20], DF [19], MT-FlowFormer [23], GraphDApp [44] y ET-BERT (flujo) [16].

En particular, nuestro método propuesto utiliza exclusivamente características de nivel de flujo de tráfico cifrado. En aras de la justicia, optamos por compararlo con ET-BERT (flujo), que también se basa únicamente en características de nivel de flujo, en lugar de ET-BERT (paquete), que logra un mejor rendimiento de clasificación pero requiere características de nivel de paquete.

Machine Translated by Google

4.8.2. Resultados experimentales

Evaluamos la efectividad de varios métodos, incluido el nuestro, en el ISCX Conjuntos de datos VPN-nonVPN e ISCX Tor-nonTor, como se muestra en las Tablas 6 y 7. La Tabla 6 presenta el rendimiento de clasificación de los tipos de servicios de tráfico en entornos VPN y no VPN, mientras que la Tabla 7 muestra el rendimiento de la clasificación en entornos Tor y no Tor. Nuestro método demostró un rendimiento superior y competitivo en la mayoría de las métricas. en comparación con la mayoría de los métodos de referencia.

Tabla 6. Rendimiento de clasificación de diferentes métodos para el conjunto de datos ISCX VPN-nonVPN.

Conjunto de datos	ISCX-VPN				ISCX-no VPN			
Método	Exactitud	Precisión	Recordar	Puntuación F1	Exactitud	Precisión	Recordar	Puntuación F1
Impresión de flujo [17]	0,8538	0,7451	0,7917	0,7566	0,6944	0,7073	0,7310	0.7131
Escáner de aplicaciones [9]	0,8889	0,8679	0,8851	0,8722	0,7576	0,7594	0,7465	0.7486
CUMUL [35]	0,7661	0,7531	0,7852	0,7644	0,6187	0,5941	0,5971	0.5897
K-FP [42]	0,8713	0,8750	0,8748	0,8747	0,7551	0,7478	0,7354	0.7387
GRANO [44]	0,8129	0,8077	0,8109	0,8027	0,6667	0,6532	0,6664	0.6567
ETC-PS [12]	0,8889	0,8803	0,8937	0,8851	0,7273	0,7414	0,7133	0.7208
Red FS [20]	0,9298	0,9263	0,9211	0,9234	0,7626	0,7685	0,7534	0,7355
DF [19]	0,8012	0,7799	0,8152	0,7921	0,6742	0,6857	0,6717	0.6701
Formador de flujo MT [23]	0,9327	0,9152	0,9243	0,9193	0,8549	0,8473	0,8268	0.8344
GraphDApp [44]	0,6491	0,5668	0,6103	0,5740	0,4495	0,4230	0,3647	0.3614
ET-BERT (flujo) [16]	0,9532	0,9436	0,9507	0,9463	0,9167	0,9245	0,9229	0.9235
Propuesto	0,9474	0,9480	0,9474	0,9472	0,9053	0,9064	0,9053	0.9050

Tabla 7. Rendimiento de clasificación de diferentes métodos para el conjunto de datos ISCX Tor-nonTor.

Conjunto de datos	ISCX-Tor				ISCX-no Tor			
Método	Exactitud	Precisión	Recordar	Puntuación F1	Exactitud	Precisión	Recordar	Puntuación F1
Impresión de flujo [17]	0,2400	0,0300	0,1250	0,0484	0,5243	0,7590	0,6074	0.6153
Escáner de aplicaciones [9]	0,7543	0,6629	0,6042	0,6163	0,9153	0,8435	0,814	0.8273
CUMUL [35]	0,6686	0,5349	0,4899	0,4997	0,8605	0,8143	0,7393	0.7627
K-FP [42]	0,7771	0,7417	0,6209	0,6313	0,8741	0,8653	0,7792	0.8167
GRANO [44]	0,6914	0,5253	0,5346	0,5234	0,7895	0,6714	0,6615	0.6613
ETC-PS [12]	0,7486	0,6811	0,5929	0,6033	0,9155	0,8710	0,8311	0.8486
Red FS [20]	0,8286	0,7487	0,7197	0,7242	0,9278	0,8368	0,8254	0.8285
DF [19]	0,6514	0,4803	0,4767	0,4719	0,8568	0,8003	0,7415	0,7590
Formador de flujo MT [23]	0,8750	0,8252	0,8217	0,8220	0,8941	0,8742	0,8651	0.8670
GraphDApp [44]	0,4286	0,2557	0,2509	0,2281	0,6936	0,5447	0,5398	0.5352
ET-BERT(flujo) [16]	0,9543	0,9242	0,9606	0,9397	0,9029	0,8560	0,8217	0.8332
Propuesto	0,9386	0,9400	0,9386	0,9385	0,9503	0,9510	0,9503	0.9502

En estas tareas de clasificación, nuestro método mostró mejoras significativas en exactitud , precisión, recuperación y puntuación F1 en comparación con ETC-PS, que también utiliza firma de ruta. características. En comparación con el modelo de mayor rendimiento, ET-BERT (flujo), el rendimiento de nuestro método la precisión fue sólo un 0,58% menor en el entorno VPN y un 1,57% menor en las tareas de clasificación del entorno Tor. Sin embargo, es esencial reconocer que ET-BERT (flujo) es un modelo complejo y pre-entrenado a gran escala, que contrasta marcadamente con nuestro enfoque más simplificado utilizando un modelo LSTM clásico a pequeña escala.

4.8.3. Análisis de rendimiento

Para evaluar más exhaustivamente la complejidad del modelo y la capacidad computacional recursos necesarios, utilizamos parámetros (Params), operaciones de punto flotante (FLOP), tiempo de inferencia y tiempo de latencia como métricas de evaluación. Los parámetros denotan la suma acumulada. de todos los pesos y sesgos que se pueden aprender dentro de una red neuronal, mientras que los FLOP se refieren principalmente a el número de operaciones aritméticas de punto flotante requeridas durante la operación de la red neuronal. Procesos de propagación hacia adelante y hacia atrás.

En nuestro experimento, utilizamos un tamaño de lote de 32 muestras. El tiempo necesario para introducir El modelo para obtener los resultados de la predicción se conoce como tiempo de inferencia, mientras que El tiempo de latencia se refiere a la duración desde la carga de las 32 muestras en la memoria hasta la obtención. los resultados de la predicción. Es importante tener en cuenta que el número de parámetros y FLOP puede Sólo se puede utilizar para evaluar modelos de aprendizaje profundo. Por lo tanto, sólo evaluamos métodos que Utilizar modelos de aprendizaje profundo.

Machine Translated by Google

La Tabla 8 presenta los parámetros, FLOP, tiempo de inferencia y tiempo de latencia para diferentes métodos. Los datos de la tabla muestran claramente que nuestro método presenta ventajas significativas en varios aspectos para la misma tarea de clasificación de tráfico cifrado.

Tabla 8. La complejidad de los diferentes métodos.

Método	Parámetros (M)	FLOP (G)	Tiempo de inferencia (ms)	Tiempo de latencia (ms)
Red FS [20]	2,17	24,86	39,94	45,72
DF [19]	1,83	3,06	29,57	33,56
Formador de flujo MT [23]	0,26	1,07	57,79	63.08
GraphDApp [44]	0,22	0,59	78,43	84,72
ET-BERT (flujo) [16]	85,70	10,87	104,04	110,94
Propuesto	0,03	7,32 × 10−4	4,02	5.56

En primer lugar, nuestro método utiliza muchos menos parámetros (Params) que otros métodos en términos de complejidad del modelo. Esto significa que la estructura de nuestro modelo es más concisa y eficiente, lo que ayuda a reducir el riesgo de sobreajuste y al mismo tiempo mejora la interpretabilidad del modelo y mantenibilidad.

En segundo lugar, con respecto a los requisitos de recursos computacionales, nuestro método requiere menos operaciones de punto flotante (FLOP). Esto indica que nuestro modelo exige menos cálculo durante la propagación hacia adelante y hacia atrás, lo que permite procesos de entrenamiento e inferencia más rápidos. Esto es particularmente importante para aplicaciones con recursos limitados, como aplicaciones integradas. sistemas o dispositivos móviles.

Además, nuestro método demuestra claras ventajas tanto en el tiempo de inferencia como en tiempo de latencia. El tiempo de inferencia es más corto y el tiempo de latencia es menor. Esto indica que nuestro modelo no sólo es computacionalmente eficiente sino también altamente responsivo, lo que lo hace Adecuado para aplicaciones en tiempo real o casi en tiempo real. Teniendo en cuenta todos estos factores, consideramos la ligera discrepancia en la precisión de la clasificación es aceptable.

Atribuimos el corto tiempo de inferencia y el tiempo de latencia de nuestro método a lo siguiente dos razones principales:

- Nuestra arquitectura de modelo tiene una menor complejidad y requiere menos recursos computacionales. recursos. Como resultado, los cálculos se completan rápidamente una vez que las muestras entrada en el modelo, reduciendo así el tiempo de inferencia.
- Nuestro tamaño de muestra es relativamente pequeño, con un tamaño de entrada de (1,23,56). Además, el La carga computacional en la CPU es mínima, lo que permite una rápida transferencia de datos desde la CPU a la GPU, reduciendo así el tiempo de latencia.

4.8.4. Análisis estadístico

Para validar aún más la efectividad de nuestro método, empleamos la prueba de rangos con signo de Wilcoxon para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre nuestros resultados de clasificación y los de otros modelos. La prueba de rangos con signo de Wilcoxon es una prueba ampliamente utilizó un método estadístico para comparar dos conjuntos de datos [45]. Nuestra hipótesis nula plantea lo siguiente: “Los dos métodos de detección tienen el mismo rendimiento de clasificación”. Si el valor p es mayor que 0,05, aceptamos la hipótesis nula. Si el valor p es menor que 0,05, rechazamos la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95%. Los valores p que comparan nuestros El método propuesto con cada modelo de referencia se muestra en las Tablas 9 y 10.

Tabla 9. Valores de p que comparan nuestro método con la construcción de huellas dactilares y los métodos estadísticos.

Método	FlowPrint [17]	AppScanner [9]	CUMUL [35]	K-FP [42]	GRANO [44]	ETC-PS [12]
valor p	0.006956	0.036267	0.000186	0.005447	0.000104	0.041655

Tabla 10. Valores p que comparan nuestro método con modelos de aprendizaje profundo.

Método	Red FS [20]	DF [19]	Formador de flujo MT [23]	GraphDApp [44]	ET-BERT (Flujo) [16]
valor p	0.015764	0.000183	0.016351	0.000322	0.167007

Machine Translated by Google

Según los resultados, podemos concluir que los valores de p para todos los métodos comparados con nuestro método, excepto ET-BERT, son inferiores a 0,05. Esto indica que, a excepción de ET-BERT, existen diferencias significativas en el rendimiento de la clasificación entre nuestro método y los otros métodos. Específicamente, un valor p inferior a 0,05 significa que podemos rechazar la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95%, lo que implica que el supuesto de que los dos métodos tienen el mismo rendimiento de clasificación no se cumple.

Por lo tanto, nuestro método supera significativamente a los otros modelos de referencia en términos de rendimiento de clasificación, excepto ET-BERT. Para ET-BERT, el valor p es superior a 0,05, lo que indica que no hay diferencias estadísticamente significativas en el rendimiento de clasificación entre nuestro método y ET-BERT. Esto valida aún más la efectividad de nuestro método, demostrando que las ventajas de nuestro modelo en complejidad y recursos computacionales no se obtienen a expensas del rendimiento de la clasificación.

5. Conclusiones y trabajos futuros

En este estudio, propusimos un método que combina características de firma de ruta con un modelo LSTM para clasificar tipos de servicios de tráfico cifrado utilizando solo 24 características consecutivas entre tráfico. El núcleo de nuestro método implica extraer características fundamentales (como el tamaño del paquete y el tiempo de llegada) de la secuencia de paquetes de tráfico cifrado para construir rutas de tráfico detalladas. Estos caminos se someten a un proceso de transformación y se mejoran utilizando técnicas de extracción de características acumulativas de múltiples escalas, generando en última instancia características de firma de caminos de múltiples escalas. Luego, estas características se utilizan de manera efectiva como entradas para el modelo LSTM, lo que genera resultados de clasificación precisos.

Evaluamos nuestro método en los conjuntos de datos ISCX VPN-nonVPN e ISCX Tor-nonTor disponibles públicamente. Los resultados experimentales mostraron precisiones de clasificación del 94,74%, 90,53%, 93,86% y 95,03% en los entornos VPN, no VPN, Tor y no Tor, respectivamente . Estos resultados son comparables a los métodos más modernos. Además, nuestros experimentos de análisis de rendimiento y análisis estadístico demostraron las ventajas de nuestro método sobre los modelos de redes neuronales a gran escala.

Sin embargo, como método de clasificación que se basa en la longitud del paquete, nuestro enfoque, al igual que otros métodos [12] basados en características de longitud del paquete, tiene una efectividad extremadamente limitada contra el tráfico cifrado que utiliza técnicas de ofuscación de la longitud del paquete, como el relleno de paquetes [46]. El relleno de paquetes es una defensa eficaz contra el análisis del tráfico, ya que hace que todas las longitudes de los paquetes sean idénticas. Explorar características más distinguibles en el tráfico cifrado puede solucionar este problema. Además, nuestro modelo emplea una estructura LSTM relativamente simple; por lo tanto, puede tener un rendimiento deficiente al manejar tareas de clasificación más complejas del mundo real, lo que indica la necesidad de clasificadores más sólidos.

En trabajos futuros, planeamos ampliar nuestro enfoque utilizando más conjuntos de datos para aplicarlo a entornos de red más complejos. Además, la exploración de la aplicabilidad de nuestra metodología al dominio de la detección de tráfico anómalo sigue siendo un pilar central de nuestros objetivos de investigación futuros.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, YM y NL; metodología, YM; software, YM; validación , YM, GZ y XY; análisis formal, YM; investigación, GZ; recursos, YM; curación de datos, XY; redacción: preparación del borrador original, YM; redacción: revisión y edición, YM; visualización, GZ; supervisión, Países Bajos; administración de proyectos, Países Bajos; adquisición de financiación, NL Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: este trabajo fue financiado en parte por el Fondo Nacional de Ciencias Sociales de China bajo la subvención 20 y ZD293.

Declaración de disponibilidad de datos: En este estudio se analizaron conjuntos de datos disponibles públicamente. Estos datos se pueden encontrar aquí: https://www.unb.ca/cic/datasets/vpn.html (consultado el 1 de junio de 2024).

Agradecimientos: Los autores desean agradecer a los revisores anónimos por su contribución a este artículo.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Machine Translated by Google

Referencias

1. Bader, O.; Lichy, A.; Hajaj, C.; Dubin, R.; Dvir, A. MalDIST: de la clasificación del tráfico cifrado a la detección y clasificación del tráfico de malware. En actas de la 19.ª Conferencia Anual de Redes y Comunicaciones del Consumidor (CCNC) del IEEE de 2022, Las Vegas, NV, EE. UU., 8 a 11 de enero de 2022; págs. 527–533.
2. Wang, Y.; Él, H.; Lai, Y.; Liu, AX Un enfoque de dos fases para una clasificación rápida y precisa del tráfico cifrado. IEEE/ACM Trans. Neto. 2023, 31, 1071–1086. [Referencia cruzada]
3. Wang, W.; Zhu, M.; Wang, J.; Zeng, X.; Yang, Z. Clasificación del tráfico cifrado de un extremo a otro con redes neuronales convolucionales unidimensionales . En Actas de la Conferencia Internacional IEEE de 2017 sobre Inteligencia e Informática de Seguridad (ISI), Beijing, China, 22 a 24 de julio de 2017; págs. 43–48.
4. Shen, M.; Liu, Y.; Zhu, L.; Xu, K.; Du, X.; Guizani, N. Optimización de la selección de funciones para una clasificación eficiente del tráfico cifrado: un enfoque sistemático. Red IEEE. 2020, 34, 20-27. [Referencia cruzada]
5. Karagiannis, T.; Papagiannaki, K.; Faloutsos, M. BLINC: Clasificación del tráfico multinivel en la oscuridad. Computación ACM SIGCOMM. Comunitario. Rev. 2005, 35, 229–240. [Referencia cruzada]
6. Lotfollahi, M.; Jafari Siavoshani, M.; Shirali Hossein Zade, R.; Saberian, M. Paquete profundo: un enfoque novedoso para la clasificación del tráfico cifrado mediante aprendizaje profundo. Computación suave. 2020, 24, 1999-2012. [Referencia cruzada]
7. Al-Naami, K.; Chandra, S.; Mustafa, A.; Khan, L.; Thuraisingham, BM Huellas digitales de tráfico cifradas adaptativas con dependencia bidireccional. En Actas de la Conferencia sobre Aplicaciones de Seguridad Informática, Los Ángeles, CA, EE. UU., 5 a 9 de diciembre de 2016.
8. Taylor, VF; Spolaor, R.; Conti, M.; Martinovic, I. Identificación robusta de aplicaciones para teléfonos inteligentes mediante análisis de tráfico de red cifrado. Traducción IEEE. Inf. Seguridad forense. 2018, 13, 63–78. [Referencia cruzada]
9. Taylor, VF; Spolaor, R.; Conti, M.; Martinovic, I. AppScanner: Toma de huellas dactilares automática de aplicaciones de teléfonos inteligentes a partir del tráfico de red cifrado. En actas del Simposio europeo sobre seguridad y privacidad del IEEE de 2016 (EuroS&P), Saarbrucken, Alemania, 21 a 24 de marzo de 2016; págs. 439–454.
10. Xie, G.; Li, Q.; Jiang, Y. Método de aprendizaje profundo autoatento para la clasificación del tráfico en línea y su interpretabilidad. Computadora. Neto. 2021, 196, 108267. [Referencia cruzada]
11. Chen, KT Integración de caminos: una representación fiel de caminos mediante series de potencias formales no conmutativas. Trans. Soy. Matemáticas. Soc. 1958, 89, 395–407. [Referencia cruzada]
12. Xu, S.-J.; Geng, G.-G.; Jin, X.-B.; Liu, DJ; Weng, J. Ver rutas de tráfico: clasificación de tráfico cifrado con características de firma de ruta. Traducción IEEE. Inf. Seguridad forense. 2022, 17, 2166–2181. [Referencia cruzada]
13. Yamansavascilar, B.; Guvensan, MA; Yavuz, AG; Karsligil, ME Identificación de aplicaciones mediante clasificación del tráfico de red. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Computación, Redes y Comunicaciones (ICNC) de 2017, Silicon Valley, CA, EE. UU., 26 a 29 de enero de 2017; págs. 843–848.
14. Chen, RTQ; Rubanova, Y.; Bettencourt, J.; Duvenaud, DK Ecuaciones diferenciales ordinarias neuronales. Adv. Inf. neuronal. Proceso. Sistema. 2018, 31, 07366.
15. Dainotti, A.; Pescape, A.; Claffy, KC Problemas y direcciones futuras en la clasificación del tráfico. Red IEEE. 2012, 26, 35–40. [Referencia cruzada]
16. Lin, X.; Xiong, G.; Gou, G.; Li, Z.; Shi, J.; Yu, J. Et-bert: una representación de datagramas contextualizada con transformadores de entrenamiento previo para la clasificación del tráfico cifrado. En Actas de la Conferencia Web ACM 2022, Lyon, Francia, 25 a 29 de abril de 2022; págs. 633–642.
17. Van Ede, T.; Bortolameotti, R.; Continella, A.; Ren, J.; Dubois, DJ; Lindorfer, M.; Choffnes, D.; van Steen, M.; Peter, A. Flowprint: Huellas digitales de aplicaciones móviles semisupervisadas en tráfico de red cifrado. En Actas del Simposio de seguridad de sistemas distribuidos y redes (NDSS), San Diego, CA, EE. UU., 23 a 26 de febrero de 2020.
18. Biju, VG; Evaluaciones de Prashanth, C. Friedman y Wilcoxon que comparan SVM, embolsado, impulso, K-NN y árbol de decisión clasificadores. J. Aplica. Computadora. Ciencia. Métodos 2017, 9, 23–47. [Referencia cruzada]
19. Sirinam, P.; Imani, M.; Juárez, M.; Wright, M. Huellas dactilares profundas: socavar las defensas de huellas dactilares de sitios web con aprendizaje profundo. En Actas de la Conferencia ACM SIGSAC de 2018 sobre Seguridad Informática y de las Comunicaciones, Toronto, ON, Canadá, 15 a 19 de octubre de 2018; págs. 1928-1943.
20. Liu, C.; Él, L.; Xiong, G.; Cao, Z.; Li, Z. Fs-net: una red de secuencia de flujo para clasificación de tráfico cifrado. En actas de la conferencia IEEE INFOCOM 2019-IEEE sobre comunicaciones informáticas, París, Francia, 29 de abril a 2 de mayo de 2019; págs. 1171-1179.
21. Lin, K.; Xu, X.; Gao, H. TSCRNN: Un nuevo esquema de clasificación de tráfico cifrado basado en características espaciotemporales de flujo para Gestión eficiente del IIoT. Computadora. Neto. 2021, 190, 107974. [Referencia cruzada]
22. Zhang, H.; Yu, L.; Xiao, X.; Li, Q.; Mercaldo, F.; Luo, X.; Liu, Q. TFE-GNN: un codificador de fusión temporal que utiliza redes neuronales gráficas para una clasificación de tráfico cifrado detallada. En Actas de la Conferencia Web ACM 2023, Austin, TX, EE. UU., 30 de abril a 1 de mayo de 2023; págs. 2066-2075.
23. Zhao, R.; Deng, X.; Yan, Z.; Mamá, J.; Xue, Z.; Wang, Y. Mt-flowformer: un transformador de flujo semisupervisado para la clasificación del tráfico cifrado. En actas de la 28.ª Conferencia ACM SIGKDD sobre descubrimiento de conocimientos y minería de datos, Washington, DC, EE. UU., 14 a 18 de agosto de 2022; págs. 2576–2584.
24. Graham, B. Conjuntos dispersos de firmas para el reconocimiento de caracteres en línea. arXiv 2013, arXiv:1308.0371.
25. Gyurkó, LG; Lyon, T.; Kontkowski, M.; Field, J. Extracción de información de la firma de un flujo de datos financieros. arXiv 2013, arXiv:1307.7244.

Machine Translated by Google

26. Pérez Arribas, I.; Goodwin, director general; Geddes, JR; Lyon, T.; Saunders, KE Un modelo de aprendizaje automático basado en firmas para distinguir el trastorno bipolar y el trastorno límite de la personalidad. Traducción Psiquiatría 2018, 8, 274. [CrossRef] [PubMed]
27. Hambly, B.; Lyons, T. Unicidad para la firma de un camino de variación acotada y el grupo de caminos reducido. Ana. Matemáticas. 2010, 171, 109–167. [Referencia cruzada]
28. Hochreiter, S.; Schmidhuber, J. Memoria larga a corto plazo. Computación neuronal. 1997, 9, 1735–1780. [Referencia cruzada]
29. Shen, S.; Han, T.; Pang, J. Predicción del coeficiente de arrastre del automóvil utilizando una red neuronal de memoria a largo y corto plazo y LASSO. Medida 2024, 225, 113982. [CrossRef]
30. Yeganeh, A.; Ahmadi, F.; Wong, YJ; Shadman, A.; Barati, R.; Saeedi, R. Modelos de aprendizaje superficial versus profundo para la predicción del nivel de agua subterránea: un enfoque de integración de datos de múltiples piezómetros. Agua Aire Suelo. Contaminación. 2024, 235, 441. [Referencia cruzada]
31. Zhao, L.; Farhi, N.; Valero, Y.; Christoforou, Z. Redes neuronales de memoria larga y corta para modelar el comportamiento de conducción humana. Transp. Res. Procedimiento 2023, 72, 2589–2596. [Referencia cruzada]
32. Eswarsai. Explorando diferentes tipos de LSTM. Disponible en línea: https://medium.com/analytics-vidhya/exploring- Different-types-of-lstms-6109bcb037c4 (consultado el 28 de julio de 2024).
33. Sol, Y.; Wang, X.; Tang, X. Las representaciones faciales profundamente aprendidas son escasas, selectivas y sólidas. En Actas de la Conferencia IEEE sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones 2015, Boston, MA, EE. UU., 7 a 12 de junio de 2015; págs. 2892–2900.
34. Vaswani, A.; Shazeer, N.; Parmar, N.; Uszkoreit, J.; Jones, L.; Gómez, AN; Kaiser, Ł.; Polosukhin, I. Atención es todo lo que necesitas. En Actas de Advances in Neural Information Processing Systems 30, Long Beach, CA, EE. UU., 4 a 9 de diciembre de 2017; págs. 5998–6008.
35. Panchenko, A.; Lanze, F.; Pennekamp, J.; Engel, T.; Zinnen, A.; Henze, M.; Wehrle, K. Huellas dactilares de sitios web a escala de Internet. En Actas de la NDSS 2016, San Diego, CA, EE. UU., 21 a 24 de febrero de 2016.
36. Chawla, Nevada; Bowyer, KW; Salón, LO; Kegelmeyer, WP SMOTE: Técnica de sobremuestreo de minoría sintética. J. Artif. Intel. Res. 2002, 16, 321–357. [Referencia cruzada]
37. Wilson, DL Propiedades asintóticas de las reglas del vecino más cercano utilizando datos editados. Traducción IEEE. Sistema. Hombre Cibernético. 1972, 2, 408–421. [Referencia cruzada]
38. Batista, GE; Prati, RC; Monard, MC Un estudio del comportamiento de varios métodos para equilibrar los datos de entrenamiento del aprendizaje automático. Explorador ACM SIGKDD. Noticiasl. 2004, 6, 20-29. [Referencia cruzada]
39. Draper-Gil, G.; Lashkari, AH; Mamón, MSI; Ghorbani, AA Caracterización del tráfico cifrado y VPN utilizando el tiempo. En Actas de la Segunda Conferencia Internacional sobre Seguridad y Privacidad de los Sistemas de Información (ICISSP), Roma, Italia, 19-21 de febrero de 2016; págs. 407–414.
40. Lashkari, AH; Gil, GD; Mamón, MSI; Ghorbani, AA Caracterización del tráfico de Tor utilizando funciones basadas en el tiempo. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Seguridad y Privacidad de los Sistemas de Información, Roma, Italia, 29-31 de mayo de 2017; págs. 253–262.
41. Shapira, T.; Shavitt, Y. FlowPic: una representación genérica para la clasificación del tráfico cifrado y la identificación de aplicaciones. Traducción IEEE . Neto. Serv. Gestionar. 2021, 18, 1218–1232. [Referencia cruzada]
42. Hayes, J.; Danezis, G. k-fingerprinting: una técnica robusta y escalable de huellas dactilares de sitios web. En actas del 25º USENIX Simposio de seguridad (USENIX Security 16), Austin, TX, EE. UU., 10 a 12 de agosto de 2016; págs. 1187-1203.
43. Zaki, F.; Afifi, F.; Abd Razak, S.; Gani, A.; Anuar, NB GRAIN: clasificación granular de tráfico cifrado de múltiples etiquetas mediante clasificador cadena. Computadora. Neto. 2022, 213, 109084. [Referencia cruzada]
44. Shen, M.; Zhang, J.; Zhu, L.; Xu, K.; Du, X. Identificación precisa de aplicaciones descentralizadas mediante análisis de tráfico cifrado utilizando graficar redes neuronales. Traducción IEEE. Inf. Seguridad forense. 2021, 16, 2367–2380. [Referencia cruzada]
45. Sol, P.; Li, S.; Xie, J.; Xu, H.; Cheng, Z.; Yang, R. GPMT: Generación de tráfico malicioso práctico basado en ataques adversarios con Pocos conocimientos previos. Computadora. Seguro. 2023, 130, 103257. [Referencia cruzada]
46. Yu, S.; Zhao, G.; Dou, W.; James, S. Relleno de paquetes previsto para navegación web anónima contra ataques de análisis de tráfico. Traducción IEEE . Inf. Seguridad forense. 2012, 7, 1381–1393. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.

Machine Translated by Google

electrónica

MDPI

Artículo

Detección de intrusiones en la red basada en Deep Belief Network Amplio sistema de aprendizaje de ecualización

Miaolei Deng [1,2,*], Chuanchuan Sol [1,2], Yupei Kan [1,2], Haihang Xu [1,2], Xin Zhou [1,2] y Shaojun Fan [1,2]

[1] Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Información, Universidad Tecnológica de Henan, Zhengzhou 450001, China; scc@stu.haut.edu.cn (CS); 2022930951@stu.haut.edu.cn (YK); 2022930927@stu.haut.edu.cn (HX); 2023930889@stu.haut.edu.cn (XZ); 2023930813@stu.haut.edu.cn (SF)

[2] Laboratorio conjunto internacional de procesamiento de información de cereales de Henan, Zhengzhou 450001, China

* Correspondencia: dengmiaolei@haut.edu.cn

Resumen: Los sistemas de detección de intrusos en la red son una importante tecnología de defensa para garantizar la seguridad de la información y proteger una red de ataques. En los últimos años, el sistema de aprendizaje amplio ha atraído mucha atención y se ha introducido con cierto éxito en los sistemas de detección de intrusos. Sin embargo, dado que el sistema de aprendizaje amplio tradicional es una estructura lineal simple, cuando se trata de conjuntos de datos desequilibrados, a menudo ignora el aprendizaje de características de las muestras de clases minoritarias, lo que lleva a una tasa de reconocimiento más pobre de las muestras de clases minoritarias. En segundo lugar, la alta dimensionalidad y las características redundantes de los conjuntos de datos de detección de intrusiones también afectan seriamente el tiempo de capacitación y el rendimiento de detección del sistema de aprendizaje amplio tradicional. Para abordar los problemas anteriores, proponemos un sistema de aprendizaje de ecualización amplia de red de creencias profundas. El modelo aprende completamente el conjunto de datos de alta dimensión a gran escala a través de una red de creencias profundas y lo representa como un conjunto de datos óptimo de baja dimensión, y luego introduce la idea de repesaje de pérdida de ecualización v2 en el sistema de aprendizaje amplio y aprende a clasificar las dimensiones bajas. conjunto de datos a través de un amplio sistema de aprendizaje de ecualización. El modelo se probó experimentalmente utilizando el conjunto de datos CICIDS2017 y se validó completamente con el conjunto de datos CICIDS2018. En comparación con otros algoritmos del mismo campo, el modelo acorta el tiempo de entrenamiento y tiene una alta tasa de detección y una baja tasa de falsas alarmas.

Palabras clave: sistema de detección de intrusos en la red; amplio sistema de aprendizaje; conjuntos de datos desequilibrados; pérdida de ecualización v2; CICIDS2017; CICIDS2018

check for updates

Cita: Deng, M.; Sol, C.; Kan, Y.; Xu, H.; Zhou, X.; Fan, S. Red Detección de intrusiones basada en el sistema de aprendizaje de ecualización amplia de Deep Belief Network. Electrónica 2024, 13, 3014. https://doi.org/10.3390/electrónica13153014

Editor académico: Rajendra V. Boppana

Recibido: 17 de junio de 2024
Revisado: 26 de julio de 2024
Aceptado: 28 de julio de 2024
Publicado: 31 de julio de 2024

Copyright: © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto. distribuido bajo los términos y condiciones de los Creative Commons Licencia de atribución (CC BY) (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introducción

Con el rápido desarrollo de la tecnología informática moderna y la tecnología de la información de redes, las redes afectan todos los aspectos de nuestras vidas, los ataques a las redes se han vuelto cada vez más complejos y la seguridad de las redes nunca ha sido más importante. Aunque Internet ha brindado muchas comodidades a las personas, también enfrenta muchos desafíos nuevos. Los problemas de seguridad de la red son cada vez más graves, como los sitios web de phishing, los ataques distribuidos de denegación de servicio y los gusanos de red que amenazan la seguridad de la red. Los sistemas de detección de intrusiones en la red (NIDS) fueron propuestos por Anderson [1] en 1980. El principio de funcionamiento de un sistema de detección de intrusiones es principalmente monitorear y filtrar los comportamientos de la red analizando los datos de auditoría del host, los datos del tráfico de la red y otras características , identificando accesos anormales en las comunicaciones de la red y notificando a los administradores de la red con prontitud, para lograr el propósito de garantizar la seguridad de la información de la red.

En los últimos años, debido al creciente desarrollo de la inteligencia artificial, los algoritmos de aprendizaje automático pueden manejar mejor datos complejos para el aprendizaje automatizado en comparación con los sistemas tradicionales de detección de intrusiones y tienen una mejor adaptabilidad y generalizació Por lo tanto, cada vez más investigadores han introducido tecnología de aprendizaje automático en el sistema de detección de intrusos [2] y han logrado éxitos [3]. Sin embargo, los modelos tradicionales de aprendizaje automático funcionan mal cuando se trata de problemas complejos y de alta dimensión.

Machine Translated by Google

datos [4], y la solidez del modelo de aprendizaje automático limita el rendimiento del modelo [5]. El aprendizaje profundo puede extraer automáticamente y aprender completamente las características complejas de los datos para lograr una alta precisión y solidez y, por lo tanto, las técnicas de aprendizaje profundo se utilizan ampliamente en los sistemas de detección de intrusos [6]. Sin embargo, el proceso de capacitación del modelo de aprendizaje profundo requiere muchos recursos computacionales, con tiempos de capacitación prolongados y un alto consumo de energía [7]. Además, los modelos de aprendizaje profundo suelen ser modelos de caja negra que carecen de interpretabilidad, lo que dificulta comprender y explicar su proceso interno de toma de decisiones, lo que dificulta el rendimiento de los sistemas de detección de intrusos. Además, la solidez de los modelos de aprendizaje profundo también limita la seguridad de los sistemas de detección de intrusos. Abbas et al. [8] realizó un estudio en profundidad sobre la solidez de los modelos y logró cierto éxito. Cada vez más investigadores [9] están empezando a adoptar nuevas técnicas en el campo de la detección de intrusiones.

Recientemente, Chen et al. [10] propusieron una nueva red neuronal aleatoria denominada sistema de aprendizaje amplio (BLS), que se basa en una arquitectura de red plana. Este modelo se diferencia de la estructura de aprendizaje profundo extendido a profundidad en que no necesita utilizar el descenso de gradiente para actualizar los pesos y la estructura de la red es de tamaño pequeño y, por lo tanto, computacionalmente más rápida [11]. Además, la actualización del peso de BLS se basa en operaciones pseudoinversas con mejor interpretabilidad y escalabilidad del modelo. Por lo tanto, algunas personas han introducido BLS en los sistemas de detección de intrusos con buenos resultados [12]. Sin embargo, por un lado, los conjuntos de datos NIDS tienden a estar muy desequilibrados y los modelos BLS tradicionales no pueden manejar bien los conjuntos de datos desequilibrados, lo que lleva a un rendimiento de detección muy pobre para clases minoritarias de ataques, lo que es fatal para los sistemas de detección de intrusiones que detectan ataques. Por otro lado, los conjuntos de datos NIDS tienden a tener una alta dimensionalidad y contener más información redundante, lo que puede llevar a un mayor consumo de tiempo y un menor rendimiento de detección del modelo BLS. Por lo tanto, se deben emplear ciertas medidas para abordar estos problemas y mejorar el rendimiento de detección del modelo.

Para el problema del desequilibrio del conjunto de datos en la detección de intrusiones, la solución tradicional es cambiar el número de muestras de clases minoritarias o de clases mayoritarias mediante sobremuestreo o submuestreo para ecualizar las muestras. Por ejemplo, la técnica de sobremuestreo sintético de minorías (SMOTE) [13] aumenta el número de muestras de clases minoritarias al sintetizar nuevas muestras de clases minoritarias para equilibrar el número de muestras de diferentes clases en el conjunto de datos. Sin embargo, las muestras generadas por SMOTE pueden expandir el espacio muestral original y cambiar la distribución de los datos muestrales, lo que lleva a una clasificación deficiente o incluso confusión del modelo en la región límite y, a menudo, genera más costos de tiempo debido a la introducción de nuevas muestras. . Para el problema de la alta dimensionalidad de los conjuntos de datos en la detección de intrusiones, el método tradicional se basa en la reducción de la dimensionalidad del análisis de componentes principales (PCA) [14]. Aunque puede reducir la dimensionalidad del conjunto de datos, como método de reducción de dimensionalidad lineal, solo puede encontrar la estructura de correlación lineal en los datos, y para la estructura no lineal de los conjuntos de datos de detección de intrusiones, PCA no puede capturar esta información de manera efectiva y su La reducción de dimensionalidad se logra proyectando los datos a un nuevo espacio de baja dimensión que a menudo resulta en una pérdida grave de información en los datos originales.

Para abordar los problemas anteriores, proponemos un sistema de aprendizaje de ecualización amplia de red de creencias profundas (DBELS), en el que la red de creencias profundas (DBN) realiza una reducción de la dimensionalidad de los datos en el conjunto de datos NIDS para eliminar información redundante. La idea de pérdida de ecualización v2 (EQL v2) se introduce en el BLS y el modelo equilibra las diferentes clases de muestras ajustando los factores de gradiente positivos y negativos para mejorar el rendimiento en la detección de muestras de ataque de clases minoritarias y clasifica conjuntos de datos de baja dimensión para lograr el propósito de clasificar y detectar ataques. Las principales contribuciones de este trabajo son las siguientes. •

Introducimos la idea de EQL v2 en el BLS y proponemos un nuevo modelo agregando factores de gradiente positivos y negativos y recalculando sus ponderaciones, lo que mejora la pobre capacidad de aprendizaje del modelo BLS para muestras de clases minoritarias al ajustar los factores de gradiente positivos y negativos y mitiga el defecto del modelo BLS en

Machine Translated by Google

que no es bueno para lidiar con conjuntos de datos desequilibrados, para mejorar el rendimiento de la detección de muestras de clases minoritarias. • Evaluamos dos
tipos de modelos de reducción de dimensionalidad basados en DBN (el modelo DBN tradicional y el modelo DeBN que introduce la idea de EQL v2) y comparamos experimentalmente los efectos de los dos modelos de reducción de dimensionalidad en el efecto de clasificación.

• Realizamos muchos experimentos en el modelo DBELS basados en el conjunto de datos de referencia disponible públicamente CICIDS2017, brindando configuraciones experimentales detalladas que incluyen clasificación binaria y múltiple, y evaluando el modelo en términos de precisión, recuperación, tasa de falsos positivos, tiempo y funcionamiento del receptor. curvas características, encontrando ventajas obvias sobre otros modelos. También probamos el efecto de los hiperparámetros en el modelo a través de muchos experimentos y realizamos análisis comparativos con otros modelos de última generación. • Validamos además la idoneidad y
escalabilidad del modelo propuesto con el conjunto de datos CI-CIDS2018. El desempeño y utilidad del modelo propuesto fueron evaluados mediante análisis comparativo con otros modelos.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera: La Sección 2 revisa la investigación actual sobre sistemas de detección de intrusiones basados en BLS, reducción de dimensionalidad de datos y desequilibrio de datos. En la Sección 3, describimos los detalles de los DBELS propuestos. Los resultados experimentales detallados se informan y analizan en las Secciones 4 y 5. La Sección 6 concluye este artículo.

2. Trabajos relacionados

Esta sección se centra en el estado actual de la investigación y las deficiencias del sistema de detección de intrusos en la red (NIDS) basado en el sistema de aprendizaje amplio (BLS). Damos soluciones tradicionales a las limitaciones del BLS tradicional y analizamos las ventajas y desventajas de estos métodos.

2.1. NIDS basado en BLS

El modelo BLS es un modelo de red superficial que transforma y aprende características mapeando nodos y nodos de mejora y calcula los pesos del modelo rápidamente mediante operaciones pseudoinversas, lo que hace que su entrenamiento sea simple y rápido. Cuando se propuso, el aprendizaje amplio despertó un interés generalizado y sus aplicaciones se están investigando en muchos campos de investigación, como la visión por computadora, el procesamiento de imágenes, el análisis de datos médicos y el procesamiento del lenguaje natural. También existen algunos trabajos en el campo de la detección de intrusiones en la red. Li y col. [15] propusieron un modelo híbrido de detección de intrusiones basado en la red neuronal recurrente (RNN) y BLS, y los resultados experimentales muestran que el modelo basado en BLS tiene un mejor efecto de entrenamiento y un tiempo de entrenamiento más corto. Laura et al. [16] implementaron la cascada de nodos de mapeo de características, una cascada de nodos de mejora y una cascada de nodos de mapeo de características y nodos de mejora.
Los autores concluyeron que la cascada de nodos de mejora requiere un tiempo de entrenamiento más prolongado que otras variantes de BLS. Posteriormente propusieron un sistema de detección de DDoS basado en un amplio aprendizaje para redes de comunicación [17]. Los autores concluyeron que el mejor rendimiento de detección generalmente se puede lograr utilizando un BLS en cascada. Li y col. [18] propusieron un sistema de aprendizaje tri-amplio (TBLS) basado en el modelo BLS, que aprende características de tres dimensiones de granularidad temporal, contenido de datos y granularidad espacial del conjunto de datos. Experimentalmente, se demostró que el modelo TBLS puede lograr un mejor rendimiento de detección al aprender características de las tres dimensiones.

Aunque el modelo BLS ha logrado cierto éxito en el campo de la detección de intrusiones, como red neuronal poco profunda, depende demasiado de la topología, el número de muestras y la información de clase de las muestras de entrenamiento y no puede hacer frente a conjuntos de datos desequilibrados.
Esto lleva a que preste demasiada atención a las muestras de clases mayoritarias y casi ignore el aprendizaje de las muestras de clases minoritarias cuando aprende la clasificación, lo que conduce a un rendimiento de detección deficiente en conjuntos de datos desequilibrados, especialmente para las minorías.

Machine Translated by Google

muestras de clase, que son peores o incluso indetectables. En segundo lugar, los conjuntos de datos de alta dimensión aumentan la complejidad de los modelos BLS y aumentan los costos computacionales y de almacenamiento. Además, cuanto mayor sea la dimensionalidad de los datos, mayor será la influencia del ruido y las características redundantes, que pueden enmascarar información útil y reducir la precisión y estabilidad del modelo BLS. Por lo tanto, se necesitan ciertas técnicas para adaptar el BLS a conjuntos de datos desequilibrados y de alta dimensión para la detección de intrusiones.

2.2. NIDS basado en desequilibrio de datos

El desequilibrio de datos se refiere al hecho de que en el mundo real, diferentes clases de datos tienen distribuciones diferentes, donde ciertos tipos de datos están significativamente subrepresentados, lo que tiene un impacto negativo grave en la clasificación del modelo. Los conjuntos de datos de detección de intrusiones suelen estar muy desequilibrados, lo que resulta fatal para el rendimiento de entrenamiento y detección del modelo; por ejemplo, en el caso de CICIDS2017, el comportamiento normal de Benign representa el 82,248% y el comportamiento anormal de Attack representa solo el 17,752%. Las muestras de ataques de DoS/DDoS representan el 14,571%, Port Scan representa el 2,607%, Brute Force representa el 0,389%, Web Attack representa el 0,096% y Botnet representa el 0,088%; por lo tanto, es obvio que la clase normal de muestras es mucho mayor que la clase de ataque de muestras, lo que hará que el modelo aprenda demasiado las muestras de clase mayoritaria. En respuesta al desequilibrio de los conjuntos de datos de detección de intrusiones, algunos académicos ya han realiz Wu T et al. [13] abordaron datos desequilibrados en la detección de intrusiones en la red utilizando agrupamiento de k-means y la técnica de sobremuestreo de minoría sintética (SMOTE). Agruparon datos, identificaron grupos de clases minoritarias y aplicaron SMOTE para generar muestras sintéticas, lo que demostró eficacia en los experimentos. Ahmad T et al. [19] desarrollaron un modelo híbrido que combina selección de características y minería de patrones. Utilizaron análisis basado en reglas para la reducción de dimensionalidad, SMOTE para equilibrar datos y refuerzo adaptativo (AdaBoost) para el aprendizaje, detectando eficazmente muestras de clases minoritarias. Con los avances en el aprendizaje profundo, Hao X et al. [20] utilizaron GAN para crear conjuntos de datos sintéticos, mejorando el rendimiento del clasificador en clases minoritarias mediante la generación de datos realistas.

Sin embargo, la mayoría de los métodos utilizados para resolver el problema del desequilibrio de datos en la detección de intrusiones se basan en la generación de datos, ya sea generando muestras de clases minoritarias mediante sobremuestreo o reduciendo muestras de clases mayoritarias mediante submuestreo, lo que equilibra las diferentes muestras. cambiando el número del conjunto de datos; sin embargo, esto cambia la distribución de los datos originales, lo que puede afectar el efecto del modelo de aprender a clasificar el conjunto de datos. Además, el método de sobremuestreo aumentará la cantidad de conjuntos de datos, lo que aumentará el costo computacional adicional del modelo y provocará un consumo adicional de tiempo. En los últimos años, Jin et al. [21] propusieron la pérdida de ecualización v2 (EQL v2), que se guía por gradientes positivos y negativos y reajusta los pesos para equilibrar el aprendizaje de cada tipo de tarea y mejorar el aprendizaje de muestras de clases minoritarias, y ha logrado ciertos resultados. . Dado que no cambia la distribución y el número de las muestras originales y ajusta los pesos para que el modelo aprenda cada clase de muestras de una manera más equilibrada, esto es de gran importancia para resolver el problema de desequilibrio de los sistemas de detección de intrusos e introducir esto. La idea en el BLS contribuye a mejorar el rendimiento de detección del modelo frente a conjuntos de datos desequilibrados.

2.3. NIDS basado en la reducción de la dimensionalidad

de los datos Los investigadores han propuesto algunas soluciones para hacer frente al problema de la alta dimensionalidad en el campo de la detección de intrusiones. Zhang B et al. [14] propusieron un método de detección de intrusiones utilizando un análisis de componentes principales (PCA) mejorado combinado con el algoritmo bayesiano simple gaussiano. Al ponderar los vectores de características principales en PCA, el método reduce la contaminación de los datos. Este enfoque, seguido del algoritmo bayesiano para la detección, reduce significativamente el tiempo de detección en comparación con el uso exclusivo de clasificadores. Shen Z y col. [22] introdujeron un algoritmo de clasificación bayesiano ingenuo mejorado que integra el análisis de componentes principales con el análisis discriminante lineal para reducir la dimensionalidad del espacio muestral y refina el cálculo bayesiano inc

Machine Translated by Google

correlación. Este enfoque permite al clasificador tener en cuenta tanto la frecuencia de los atributos como los problemas de correlación, abordando los desafíos de precisión y tiempo real en la detección de intrusiones con numerosas características. Saló F et al. [23] desarrollaron una técnica de integración de procesamiento de características que combina la ganancia de información y el análisis de componentes principales para extraer un subespacio óptimo de baja dimensión. Luego fusionan múltiples clasificadores utilizando máquinas de vectores de soporte, algoritmos de aprendizaje de instancias y estrategias de decisión de perceptrones multicapa, empleando una regla de combinación de medias de probabilidad para la votación. Las pruebas en varios conjuntos de datos demostraron que este método no solo logra una alta precisión sino que también reduce significativamente los costos computacionales, lo que lo hace más efectivo para la detección de datos a gran esca

Sin embargo, la mayoría de las soluciones actuales al problema de la alta dimensionalidad en los conjuntos de datos NIDS son algoritmos de aprendizaje automático, que reducen la dimensionalidad del conjunto de datos hasta cierto punto, pero aún tienen mayores limitaciones frente a características no lineales de alta dimensionalidad . , lo que resulta en una menor tasa de detección del modelo. Dado que los algoritmos de aprendizaje profundo son eficaces en el aprendizaje de alta dimensionalidad y las características no lineales pueden completar de forma autónoma el aprendizaje y la extracción de características de datos sin procesar sin demasiada intervención humana, se han introducido algoritmos de aprendizaje profundo en los sistemas de detección de intrusiones a gran escala , que pueden mejorar completar la extracción y reducción de dimensionalidad de las características de los datos. La red de creencias profundas (DBN), como modelo representativo de aprendizaje profundo, fue propuesta por Geoffrey Hinton et al. [24] en 2006. A partir de los datos sin procesar, se pueden aprender las representaciones de características abstractas de múltiples capas que capturan de manera efectiva la estructura compleja y los patrones cambiantes de los datos. Este proceso de extracción de características jerárquicas ayuda a mapear datos de entrada de alta dimensión a un espacio de representación de baja dimensión, preservando al mismo tiempo la información importante de los datos para la reducc En comparación con los métodos tradicionales de reducción de dimensionalidad, la reducción de dimensionalidad DBN no solo mantiene mejor la estructura y relevancia de los datos, sino que también aprende de forma adaptativa las relaciones no lineales en los datos, lo que mejora la capacidad expresiva y el rendimiento de clasificación de los datos reducidos. Por tanto, el DBN es superior en la tarea de reducción de dimensionalidad para modelos de detección de intrusiones.

3. Metodología Esta

sección construye en detalle el sistema de aprendizaje de ecualización amplia (DBELS) de la red de creencias profundas basado en BLS, EQL v2 y DBN en tres etapas: preprocesamiento de datos, reducción de la dimensionalidad de los datos y clasificación del modelo.

3.1. Arquitectura DBELS

El marco de DBELS se muestra en la Figura 1, que se divide en tres etapas.
La primera etapa es el preprocesamiento de datos, que procesa principalmente los datos originales en un formato de datos adecuado para la reducción de dimensionalidad del DBN. El conjunto de datos CICIDS2017 contiene 79 características que contienen muchas características redundantes que dificultan el entrenamiento y la clasificación del modelo. En este artículo, el preprocesamiento de datos incluye dos partes: limpieza de datos y estandarización de datos. El propósito de la limpieza de datos es reducir las características redundantes calculando la contribución de las características a la clasificación mediante coeficientes de correlación, eliminar los valores incorrectos de los datos y evitar su efecto de interferencia negativa en el modelo.
El propósito de la estandarización de datos es hacer que el modelo se centre en diferentes características de los datos de manera equilibrada, ignorando al mismo tiempo la influencia de características con diferentes pesos en el modelo debido al tamaño del valor. Debido al grave desequilibrio de datos en el conjunto de datos CICIDS2017, el método de sobremuestreo SMOTE se puede utilizar para aumentar las muestras de ataques minoritarios cuando el DBN reduce la dimensionalidad para aliviar el problema de muy pocas muestras para la clase minoritaria.

La segunda etapa es la reducción de dimensionalidad de DBN, cuyo objetivo es representar los datos originales de alta dimensión como datos óptimos de baja dimensión. El modelo de reducción de dimensionalidad DBN que utilizamos adopta una estructura clásica, que maximiza la retención de las características principales al tiempo que reduce las dimensiones de las características tanto como sea posible. El modelo entrena completamente cada máquina Boltzmann restringida (RBM) mediante un entrenamiento previo y ajusta todo el DBN

Machine Translated by Google

tz
estructura a través del ajuste de peso y aprende completamente las características del conjunto de datos estandarizado, que se representa como un conjunto de datos óptimo de baja dimensión. La tercera etapa utiliza el sistema de aprendizaje de ecualización amplia (BELS) para clasificar los datos óptimos de baja dimensión. El modelo BELS iguala el aprendizaje del modelo de las muestras de clases minoritarias ajustando los factores de gradiente positivos y negativos y aumentando sus ponderaciones para mejorar la clase de detección y reconocimiento de las muestras de clases minoritarias.

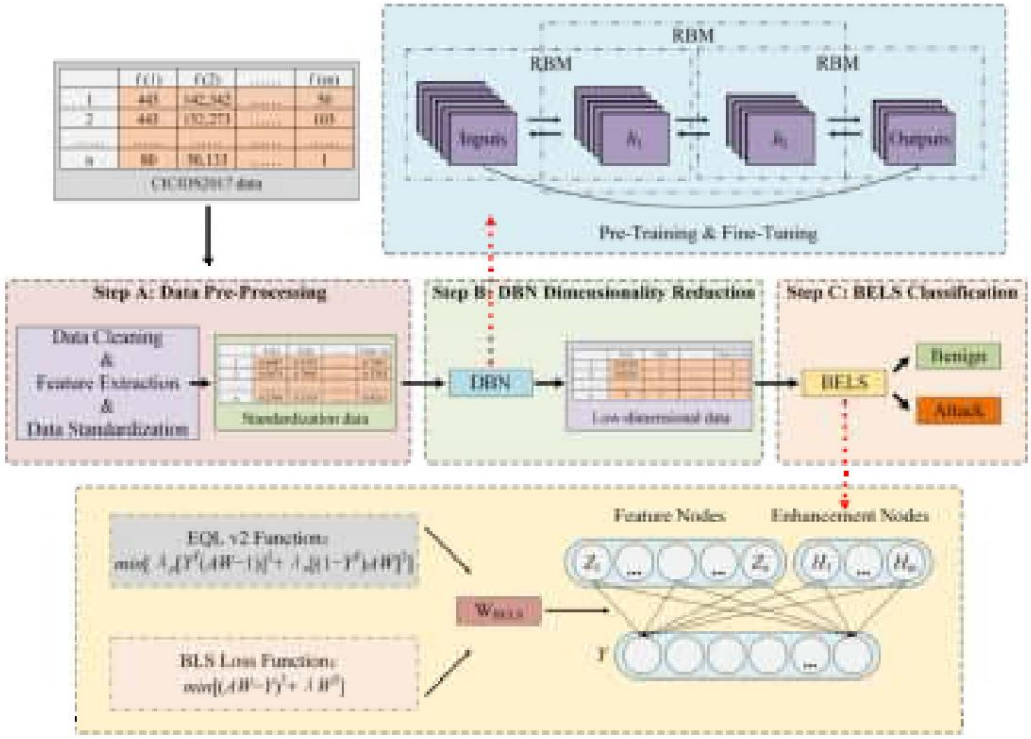


Figura 1. La estructura de DBELS.

3.2. Red de Creencias
Profundas 3.2.1. Máquina Boltzmann restringida

t2
La máquina restringida de Boltzmann [24] es la estructura básica de la DBN, que es una red neuronal poco profunda y consta de una estructura de dos capas de capas visibles y ocultas.
Las conexiones en un RBM no están dirigidas y no hay conexiones entre neuronas en la misma capa; su estructura se puede ver en la Figura 2. Los GBR de uso común son generalmente binarios. Ya sea que estén en la capa oculta o en la capa visible, su neurona toma el valor de 0 o 1 únicamente. El principio de funcionamiento de un RBM se basa en la función de energía, y la función de energía de la capa visible y la capa oculta está dada por ,

$$E(v, h) = -\sum bivi - \sum cjhj - \sum vihjwij \quad (1)$$

donde i pertenece a la capa visible y j pertenece a la capa oculta, b y c son sesgos del modelo, w es el peso del modelo, la primera parte representa la contribución de los nodos de la capa visible a la energía del sistema, la la segunda parte representa el aporte de los nodos de la capa oculta a la energía del sistema, y la última parte representa el aporte de la energía del sistema debido a la interacción entre la capa visible y la capa oculta.

Machine Translated by Google

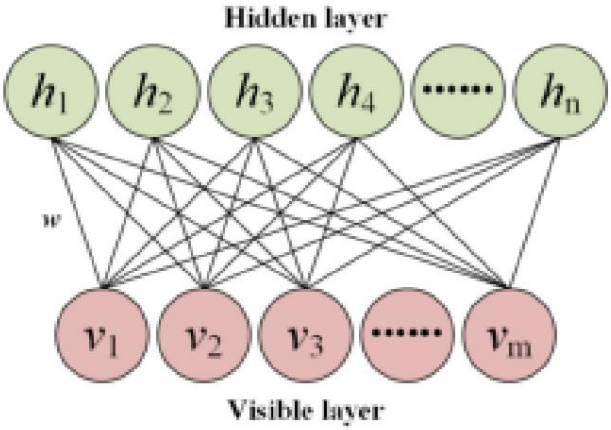


Figura 2. La estructura de la GBR.

El RBM define la densidad de probabilidad conjunta de las capas visible y oculta en términos de una función de energía. La probabilidad conjunta de la capa visible y la capa oculta viene dada como

$$p(v, h) = \frac{1}{z}^{mi} - mi(v,h) \quad (2)$$

donde Z es la función de partición, que se utiliza para normalizar la distribución de probabilidad y garantizar que la suma de las distribuciones de probabilidad sea igual a 1:

$$Z = \sum_{v,h}^{mi} - mi(v,h) \quad tt \quad (3)$$

Con la densidad de probabilidad conjunta de las capas visible y oculta, sumando h produce la distribución de densidad marginal de la capa visible:

$$(v) = \frac{1}{Z\sum_{h}} p^{mi} - mi(v,h) \quad (4)$$

Durante el proceso de entrenamiento del modelo RBM, la variable de capa oculta h1 se muestrea y calcula utilizando la probabilidad posterior p (h1 | v), y la nueva variable de capa visible v1 se muestrea mediante la probabilidad posterior p (v1 | h1); posteriormente, se vuelve a muestrear la nueva variable de capa oculta h2 de manera repetitiva para obtener la capa visible v2. Los pasos anteriores se repiten varias veces hasta que los parámetros convergen o alcanzan el número predefinido de iteraciones, la distribución de probabilidad conjunta se acerca a la distribución suave y se completa el entrenamiento RBM.

3.2.2. Formación de la Red de Creencias Profundas

La red de creencias profundas [24] es una red neuronal profunda apilada por múltiples RBM. La estructura DBN se muestra en la Figura 3. Durante el proceso de entrenamiento, DBN primero utiliza un algoritmo de entrenamiento codicioso capa por capa no supervisado para cada capa de RBM, excepto para la primera y última capa de la estructura DBN, donde cada capa La capa oculta de RBM sirve como capa visible de la siguiente capa de RBM, para transferir información de características e información de aprendizaje (esta fase también se denomina fase de preentrenamiento de DBN). Una vez completado el entrenamiento previo, se adjunta una pequeña cantidad de datos etiquetados a la última capa del modelo DBN y se realiza un entrenamiento supervisado en cada capa del RBM. El algoritmo de propagación hacia atrás propaga la información de error a cada capa del RBM y utiliza la función de máxima verosimilitud para la función objetivo, que puede optimizar todo el DBN, obteniendo así la representación óptima de baja dimensión de los datos originales.

Machine Translated by Google

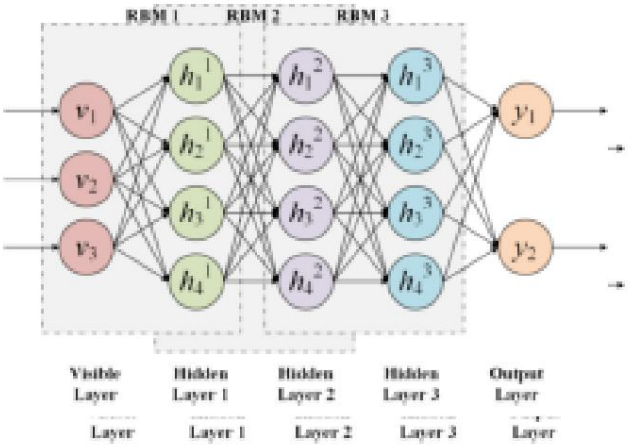


Figura 3. La estructura de DBN.

3.3. Amplio sistema de aprendizaje

El portador de un sistema de aprendizaje amplio [10] es una función vectorial aleatoria vinculada neuronal red. En comparación con el método de aprendizaje profundo, el BLS tiene solo dos capas de neuronas. red, y su estructura tiene la forma de extensión de ancho. Se muestra la estructura del modelo. en la Figura 4. En primer lugar, el BLS asigna los datos de entrada a una matriz de nodos de características a través del función de mapeo. En segundo lugar, la matriz de nodos de características forma una matriz de nodos de mejora mediante utilizando la función de mejora. Luego, los nodos de mapeo de características y la mejora. Los nodos se utilizan juntos como entrada de la capa oculta. Finalmente, la pseudoinversa La operación se utiliza para calcular la matriz de peso entre la capa oculta y la salida. capa para lograr el propósito de entrenar el modelo BLS.

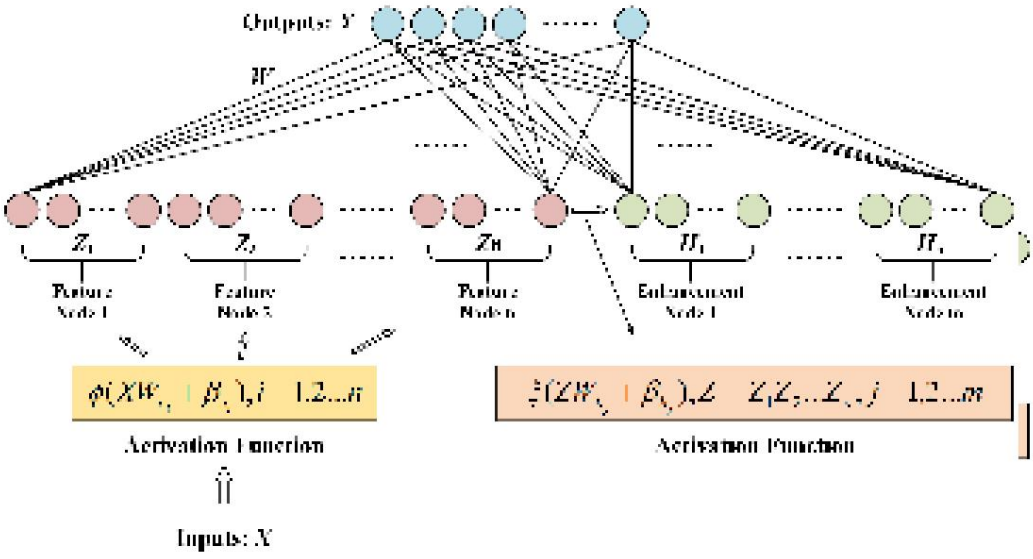


Figura 4. La estructura de BLS.

Supongamos que los datos de entrada X = [x1, x2, . . . , xn] pertenecen a R(N M) y la salida matriz, Y = [y1, y2, . . . , yn], pertenece a R(N C), donde N es la muestra de datos total, M es la dimensión de la muestra, C es el número de categorías de la muestra de datos, Z1, Z2 ,. . . , zinc características, H1, H2 ,. . . , Hn es la matriz de nodos de mejora y W es la matriz de peso de salida entre la capa oculta y la capa de salida.

El procedimiento específico del BLS es el siguiente. Primero, se asignan los datos de muestra X. por características del grupo i para obtener la matriz de nodos de características del grupo i Zi , donde i (1, 2, . . , n):

$$Z_i = \phi_i(XW_{ei} + \beta_{ei}) \quad R^{N\times q}\ i = 1, 2, \ldots, n \tag{5}$$

Machine Translated by Google

donde i es la función de activación, q es el número de nodos de características correspondientes a cada mapeo de características, Wei es la matriz de peso del iésimo mapeo de características y βei es la matriz de sesgo del iésimo mapeo de características. Tanto Wei como βei se generan aleatoriamente. Luego, todas las matrices de nodos de características se integran para obtener la matriz de nodos de características total:

$$Z^{norte} = [Z1, Z2, \cdots, Zn] \quad R\ N\times nq \tag{6}$$

En segundo lugar, la matriz de nodos de características total Zn se somete a un mapeo de mejora del grupo j para obtener la matriz de nodos de mejora del grupo j Hj , donde j (1, 2,..., m), es el siguiente:

$$Hj = \xi j\ Z\ iWhj + \beta hj \quad R^{N\times r} \quad j = 1, 2, \cdots, ^{metro} \tag{7}$$

donde ξj es la función de activación, r representa el número de nodos de mejora correspondientes a cada grupo de transformaciones de mejora, Whj es la matriz de peso de mapeo de mejora del grupo j y βhj es la matriz de sesgo de mapeo de mejora del grupo j . La matriz de nodos de mejora total se obtiene integrando todas las matrices de nodos de mejora:

$$h^{metro} = [H1, H2, \cdots, Hm] \quad R^{N\times señor} \tag{8}$$

Luego, los nodos de mapeo de características se fusionan con los nodos de mejora como entradas al BLS, definido como A:

$$A = [Z^{norte} | H\ m] \quad R\ N\times(nq+mr) \tag{9}$$

Finalmente, el valor predicho del algoritmo de aprendizaje amplio se puede dar como

$$Y\hat{} = [Z\ norte\ |H\ m]W = AW \tag{10}$$

donde W es la matriz de peso de los nodos de características y los nodos de mejora de la capa de salida.

Para minimizar el error entre el valor predicho Yˆ y el valor verdadero Y y encontrar una W adecuada , el modelo BLS se optimiza con la siguiente función:

$$\arg\min_{W.} FBLS = \left\| Y - Y\hat{} \right\|_2^2 + \lambda \left\| W \right\|_2^2 = \left\| Y - AW \right\|_2^2 + \lambda \left\| Wm \right\|_2^2 \tag{11}$$

donde el primer término se usa para controlar la minimización del error de entrenamiento, el segundo término se usa para evitar que el modelo se sobreajuste y el valor λ denota las restricciones adicionales sobre la suma de los pesos al cuadrado; Tomamos la derivada de la función anterior y dejamos que tome el valor de cero, obteniendo W como

$$W = (A\ TA + \lambda I)^{-1}\ UN\ TY \tag{12}$$

donde A es la matriz de mapeo y mejora, λ es un factor de penalización, I es una matriz de identidad e Y es la etiqueta verdadera.

3.4. Pérdida de ecualización

v2 La idea básica de la pérdida de ecualización v2 [21] es igualar el grado de aprendizaje del modelo para diferentes clases de muestras ponderando los gradientes positivos y negativos de cada clasificador de acuerdo con las relaciones de gradiente acumuladas de los gradientes positivos y negativos. del clasificador, respectivamente. Para resolver el problema de los conjuntos de datos desequilibrados, una estrategia clásica es la estrategia focal, y Eqlv2 se mejora sobre esta base. Sin embargo, EQL v2 ofrece claras ventajas sobre la pérdida focal, particularmente en el manejo del desequilibrio de clases sin introducir sesgos hacia las clases minoritarias. A diferencia de la pérdida focal, que ajusta la contribución de la pérdida según la dificultad de predicción, EQL v2 equilibra dinámicamente los gradientes durante el entrenamiento, lo que reduce el sobreajuste en categorías raras y al mismo tiempo mantiene el enfoque en las clases comunes. Este enfoque mejora la estabilidad y el rendimiento del modelo en diversos conjuntos de datos,

Machine Translated by Google

proporcionando una respuesta más matizada a los desafíos del desequilibrio. Los gradientes positivos y negativos para la salida Z de cada clasificador con respecto a la pérdida L son

$$\frac{pos}{zj}(L) = \frac{1}{|yo|}\sum_{j\,i\;l} i_y\,(pag_j^i - 1) \tag{13}$$

$$\frac{neg}{zj}(L) = \frac{1}{|yo|}\sum_{i\;l}(1 - y_j^i)_{pag}{}_j^i \tag{14}$$

donde l es el número total de muestras, p j ^{i} es la probabilidad de que se prediga la iésima muestra ser de clase j, y la muestra ^{i} es el valor de la matriz de etiquetado veraz One-Hot en la que el iésimo yj es de clase j .

Las ponderaciones de EQL v2 se actualizan definiendo primero gj como la relación entre el gradiente positivo acumulativo y el gradiente negativo de la tarea j hasta la iteración t. En esta iteración, los pesos del gradiente positivo qt y el gradiente negativo rt se pueden calcular de la siguiente manera:

$$(t)\,(t) = 1 + \alpha\,1 - f(g)\,q\,jj \tag{15}$$

$$_{rj}(t) = f(g\,j^{t}) \tag{dieciséis}$$

donde f es una función de mapeo como

$$f(x) = \frac{1}{-\gamma(x-\mu)\;1 + mi} \tag{17}$$

Se obtienen el gradiente positivo $^{(t)}_{jj}$ q y el gradiente negativo r y luego se aplican $^{(t)}$ a los gradientes positivo y negativo del lote actual, respectivamente, y el gradiente reponderado es

$$\frac{pos'}{zj}(L\,(t)\,) = q_j^{(t)}\,\frac{pos}{zj}(L\,(t)\,) \tag{18}$$

$$zj\;\frac{neg'}{}(L\,(t)\,) = r_j^{(t)}\,\frac{neg}{zj}(L\,(t)\,) \tag{19}$$

Finalmente, la relación $^{t+1}$ del gradiente positivo acumulado al gradiente negativo de g j la iteración t + 1 actualización se calcula y se denota como

$$g_j^{t+1} = \frac{\sum_{t=0}^{t}\;\frac{pos'}{zj}(L\,(t)\,)}{T\sum t=0\;\frac{neg'}{zj}(L(t)\,)} \tag{20}$$

EQL v2 elige la estadística de gradiente como una medida de si una tarea se encuentra en un estado de entrenamiento equilibrado, equilibrando el modelo en función de qué tan fácil o difícil es entrenar cada clasificación para el modelo, en lugar de simplemente considerar el número de muestras positivas y negativas. . La introducción de la idea de ponderación guiada por gradiente en DBN y BLS ayuda a entrenar el modelo prestando más atención a las características de las clases minoritarias de muestras, lo que hace que el modelo sea más completo y equilibrado al evaluar cada clase de muestras.
El modelo ajusta la contribución de peso óptima de la iteración en función del impacto de diferentes categorías de muestras en el rendimiento de la clasificación.

3.5. Amplio sistema de aprendizaje de ecualización

La W del sistema de aprendizaje de ecualización amplia se resuelve de la siguiente manera; basado en el gradientes positivos y negativos de EQL v2, los gradientes positivos y negativos de muestra se pueden dar de la siguiente manera:

$$p(W) = Y^{t}\,(AA - 1) \tag{21}$$

$$norte(W) = (1 - Y^{t})AW \tag{22}$$

Machine Translated by Google

donde A es la matriz de características de los nodos mapeados y de mejora, Y es la etiqueta verdadera y W es la matriz de peso.

La función de gradiente se puede construir a partir de los gradientes positivos y negativos como

$$G(W) = \lambda p[Y^{t}(AW - 1)]2 + \lambda n[(1 - Y^{t})AW]^{2} \quad (23)$$

donde λp es el factor de gradiente positivo y λn es el factor de gradiente negativo. Cuanto menor sea G (W) , mayor será la probabilidad de muestras positivas y menor la probabilidad de muestras negativas. Ajustar los parámetros λp y λn puede ajustar el efecto de aprendizaje del modelo en diferentes muestras para lograr la igualación del grado de contribución de cada clase de muestras a la clasificación de aprendizaje del modelo.

Basado en la función de pérdida BLS,

$$L(W) = (AW - Y)^{2} + \lambda W2 \quad (24)$$

donde λ es el factor de penalización; entonces, el objetivo de optimización de BELS es la función de gradiente EQL v2 y la función de pérdida BLS:

$$\text{argmín} : F(W) = (AW - Y)^{2} + \lambda W2 + \lambda p[Y^{t}(AW - 1)]2 + \lambda n[(1 - Y^{t})AW]^{2} \quad (25)$$

Entre ellos, la primera parte es la función de pérdida, que se utiliza para controlar el error de clasificación del modelo. La segunda parte es el término de penalización, que principalmente evita que el modelo se sobreajuste. La tercera parte es el término de gradiente, que se utiliza para equilibrar el grado de aprendizaje de diferentes muestras y aliviar el bajo rendimiento del modelo en la detección de muestras de clases minoritarias. $\partial F(W)$

El F(W) existente se expresa tomando la derivada parcial de W: ∂W

$$W = [\lambda pA\,TYYTA + \lambda nA^{t}(J1 - Y)(J2 - Y^{t})A + A\,TA + \lambda I]^{-1}(\lambda pA\,TYYT\,J3 + A\,TY) \quad (26)$$

donde J es una matriz con todos los elementos iguales a 1, λp es un factor de gradiente positivo, λn es un factor de gradiente negativo, los factores de gradiente positivo y negativo se utilizan para controlar el grado de aprendizaje del modelo en diferentes muestras y λ es un factor de penalización para evitar el sobreajuste del modelo causado por la W excesivamente grande.

4. Experimentos

Esta sección presenta los experimentos detallados. Analizamos en detalle el efecto de los hiperparámetros en el modelo. Empleamos búsqueda de cuadrícula para fijar los factores de gradiente positivos y negativos dentro de rangos apropiados, buscando la combinación óptima de parámetros que maximice el rendimiento de detección del modelo. Para evaluar la efectividad del método propuesto, realizamos experimentos de ablación completa. Finalmente, damos un análisis comparativo del modelo propuesto con otros métodos del estado del arte.

4.1. Conjuntos de datos CICIDS2017

El conjunto de datos CICIDS2017 [25] propuesto por el instituto canadiense de ciberseguridad es uno de los conjuntos de datos de referencia importantes para evaluar los modelos de detección de intrusiones. Los autores utilizaron el sistema de perfil de comportamiento para analizar el comportamiento abstracto de las interacciones humanas basándose en diferentes protocolos, construyendo 25 comportamientos abstractos de los usuarios y generando un tráfico de fondo natural y amigable. El conjunto de datos contiene ataques comunes nuevos y benignos e incluye siete tipos de ataques de red, a saber, ataques de denegación de servicio, ataques de fuerza bruta de shell seguro, ataques de botnet, ataques distribuidos de denegación de servicio, ataques de aplicaciones web, exploits heartbleed y penetración. ataques de prueba. La distribución de la muestra y las características del conjunto de datos se muestran en la Tabla 1.

Machine Translated by Google

Tabla 1. Distribución de clases del conjunto de datos CICIDS2017.

Categoría	Etiqueta	Muestra	Característica
Benigno	Benigno	2.273.097	Puerto de destino, duración del flujo, Tot Fwd|Bwd Pkts, Tot Len Fwd|Bwd Paquetes, Fwd|Bwd Pkt Len Máx.|Mín.|Media|Estándar, Mín.|Máx. Len. paquete, Len. paquete Media|Estándar|Var, Tamaño promedio del paquete, Avg promedio|Seg atrás Tamaño, bytes de flujo|Paquetes, Fwd|Bwd Paquetes, Fwd|Bwd Velocidad masiva promedio, avance|Bytes promedio hacia adelante|Paquetes, flujo IAT Media|Estándar|Máx|Mín, Fwd|Bwd IAT Total|Media|Estándar|Máx|Mín, relación descendente-arriba, Activo|Inactivo Media|Std|Max|Min, Fwd|Bwd PSH Banderas, Fwd|Bwd Banderas URG, Init Win Bytes Fwd|Bwd, Fwd|Bwd Longitud del encabezado, Act Data Pkt Desvío, FIN|SYN|RST|PSH|ACK|URG|CWE|ECE Banderas, tamaño mínimo de segmento hacia adelante, subflujo hacia adelante|atrás Paquetes|Bytes, Etiqueta
DoS/DDoS	DoS Hulk, DDoS, DoS GoldenEye, DoS Loris lento, prueba DoS Slowhttp, Sangrado del corazón	380.699	
Escaneo de puertos	Escaneo de puertos	158.930	
Fuerza bruta	Patator FTP, Patator SSH	13.835	
Ataque web	Ataque web: fuerza bruta, Ataque web: XSS, Ataque web: inyección SQL	2180	
Red de bots	Bot	1966	
Total	-	2.830.707	79

4.2. Detalles de implementacion

Los parámetros del modelo DBELS se establecieron como en la Tabla 2, incluidos los parámetros de entrenamiento. del modelo de reducción de dimensionalidad DBN, la función de activación BELS, el número de nodos en cada uno de los grupos de mapeo, el número de nodos en cada uno de los grupos de mejora grupos, y el coeficiente de penalización, λ. El modelo de reducción de dimensionalidad DBN consistió en una pila de tres RBM, (49,64), (64,32) y (32,16). Todos los experimentos se realizaron utilizando una CPU Intel(R) Core (TM) i7-11700 de 64 bits con 32 GB de RAM en el entorno Windows 11. Los modelos se implementaron en Python v3.9.16 utilizando la biblioteca PyTorch v2.1.0.

Tabla 2. Los parámetros de DBELS.

Parámetro	Pre-entrenamiento	Sintonia FINA	Descripción
Épocas	30	100	-
Tasa de aprendizaje	0.0001	0.00001	-
Tamaño del lote	64	128	-
optimizador	SGD	Adán	-
paso de gibbs	-	-	5
Mapeo|Recuento de nodos del grupo de mejora	-	-	diecisés
Mapeo|Función de activación de mejora	-	-	Relu
λ	-	-	0.001

4.3. Métricas de rendimiento

Las métricas de evaluación para la detección de intrusiones incluyen principalmente precisión, recuperación y tasa de falsos positivos (FPR). En la fórmula, el verdadero positivo (TP) representa el número de muestras correctamente identificadas como positivas, el verdadero negativo (TN) es el número de muestras identificadas correctamente como negativas, el falso positivo (FP) es el número de muestras negativas identificado incorrectamente como positivo, y el falso negativo (FN) es el número de positivos muestras identificadas incorrectamente como negativas. La precisión denota la relación entre el número de muestras correctamente clasificadas por el modelo sobre el número total de muestras:

$$\text{Precisión} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (27)$$

Machine Translated by Google

El retiro denota la proporción de casos positivos en la muestra que son correctamente predicho, también conocido como tasa de detección:

$$\text{Recordar} = \frac{TP}{TP + FN} \tag{28}$$

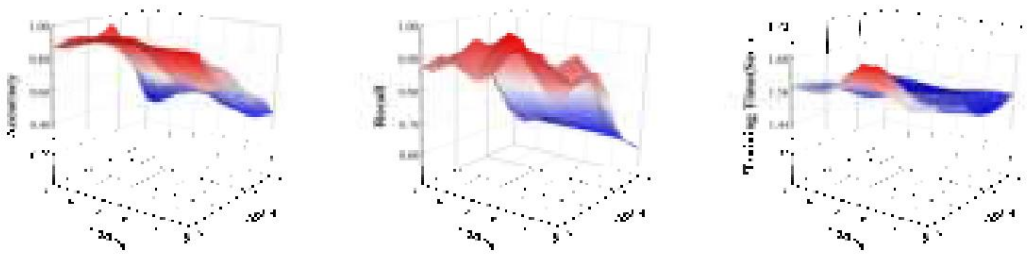
La tasa de falsos positivos es la proporción de muestras verdaderamente negativas que el modelo clasifica incorrectamente como positivo:

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \tag{29}$$

4.4. Análisis de hiperparámetros

4.4.1. Efecto de λp y λn en la clasificación binaria

Para los dos parámetros λp y λn en el modelo DBELS, sus efectos sobre el rendimiento Se exploraron las características del modelo en diferentes tareas de clasificación. Sus efectos sobre el rendimiento. de precisión, recuperación y tiempo en la tarea de clasificación binaria se muestran en la Figura 5. Para precisión y recuperación, el rendimiento tiende a aumentar al disminuir λp y λn. Diferente combinaciones de parámetros conducen a diferencias mayores porque el modelo es más sensible a la dos parámetros en la tarea de clasificación binaria y, a medida que mejora el orden de magnitud, el rendimiento del modelo cambia drásticamente. Los experimentos muestran que cuando λp es alrededor de 10-5 órdenes de magnitud y λn es alrededor de 10-4 órdenes de magnitud, el modelo puede mantener una mayor precisión y recuperación, alrededor de 0,99 y 0,98, respectivamente. Para el tiempo de entrenamiento del modelo con el cambio en λp y λn, el tiempo de entrenamiento fluctúa ligeramente por encima y por debajo de 1,6 s, lo que indica que el tiempo de entrenamiento del modelo en la clasificación binaria La tarea no es sensible a los factores positivos y negativos.



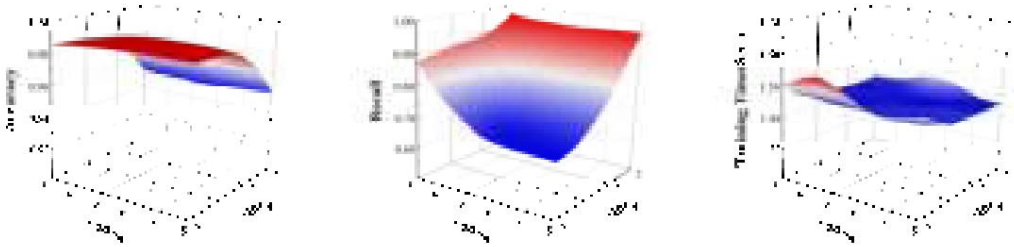
(a) (b) (C)

Figura 5. El efecto de λp y λn en la clasificación binaria. Los efectos sobre el desempeño: (a) el efecto sobre la precisión; (b) el efecto sobre la recuperación; (c) el efecto sobre el tiempo de entrenamiento.

4.4.2. Efecto de λp y λn en la clasificación múltiple

En la tarea de clasificación múltiple, su efecto sobre la precisión, la recuperación y el rendimiento del tiempo. se muestran en la Figura 6. Para mayor precisión, el modelo es casi insensible a λn y casi tiende ser estable cuando λn cambia; cuando $10^{-3} < \lambda p < 10^{-2}$, la precisión aumenta a medida que aumenta λp . Para recordar, a medida que λp y λn aumentan, la recuperación del modelo tiende a aumentar. Cuando el λp el orden de magnitud del valor es 10^{-2} y el orden de magnitud del valor de λn es aproximadamente 10^{-3}, El recuerdo crece hasta un máximo de aproximadamente 0,95. Para el tiempo de entrenamiento del modelo con el cambio en λp y λn, el tiempo del modelo fluctúa de 1,4 sa 1,6 sy casi se estabiliza, lo que muestra que el tiempo de entrenamiento no es sensible a los parámetros de los factores positivos y negativos. Para lograr un mejor rendimiento general, el orden de magnitud de λp es alrededor de 10^{-4}, y el orden de magnitud de λn es alrededor de 10^{-3}, lo que puede hacer que la precisión se estabilice a 0,96 y el retiro se estabiliza en 0,95.

Machine Translated by Google

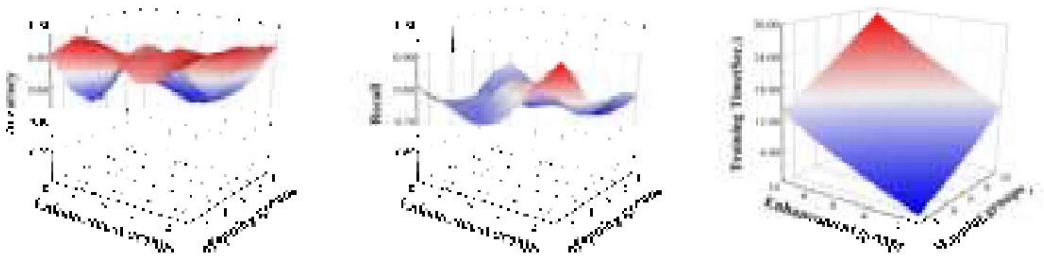


(a) (b) (C)

Figura 6. El efecto de λp y λn en la clasificación múltiple. Los efectos sobre el desempeño: (a) el efecto sobre la precisión; (b) el efecto sobre la recuperación; (c) el efecto sobre el tiempo de entrenamiento.

4.4.3. Efecto de los grupos de mapeo y mejora en la clasificación binaria

Los experimentos exploraron los efectos de los grupos de mejora del modelo DBELS y mapeo de grupos sobre el desempeño del modelo para diferentes tareas de clasificación. Para la tarea de clasificación binaria, los efectos de los grupos de mejora y los grupos de mapeo en precisión, recuperación y tiempo de entrenamiento se muestran en la Figura 7. Para precisión y recuperación, el modelo flota más con el cambio de parámetros porque el modelo de tarea de clasificación binaria es más sensible a estos dos parámetros. Con el aumento de la matriz de mapeo Z y la matriz de mejora H, su matriz de entrada A aumenta y el rendimiento de detección del modelo depende en gran medida de la matriz, A. Para el tiempo de entrenamiento, aumenta con el aumento de grupos de mejora y grupos de mapeo, porque la matriz de entrada A aumenta con la aumento de parámetros. A partir de los resultados experimentales, se sabe que cuando se mejora Los grupos y grupos de mapeo se seleccionan como 1, puede garantizar menos tiempo de capacitación y mayor precisión y recuperación.



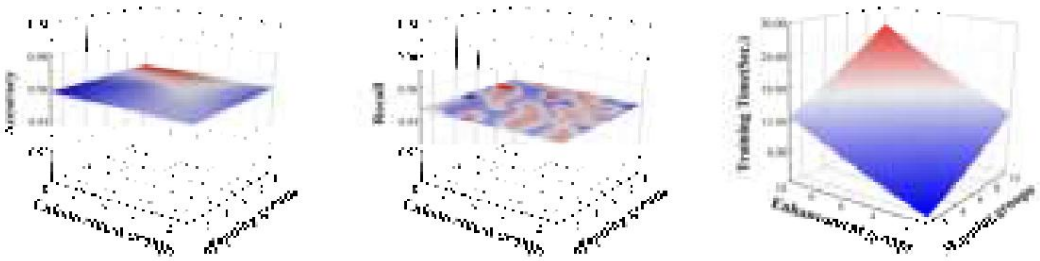
(a) (b) (C)

Figura 7. El efecto de los grupos de mejora y los grupos de mapeo en la clasificación binaria. Los efectos sobre el desempeño: (a) el efecto sobre la precisión; (b) el efecto sobre la recuperación; (c) el efecto sobre el tiempo de entrenamiento.

4.4.4. Efecto de los grupos de mapeo y mejora en la clasificación múltiple

Para la tarea de clasificación múltiple, los efectos sobre la precisión y el recuerdo se muestran en la Figura 8. Con el aumento de grupos de mejora y grupos de mapeo, la precisión y la recuperación casi tienden a estabilizarse, lo que indica que para la tarea de clasificación múltiple, estas dos métricas de El modelo DBELS no es sensible a los grupos de mapeo y mejora. El entrenamiento tiempo muestra una tendencia ascendente en el consumo de tiempo tanto con el aumento en el mapeo grupos y grupos de mejora. La razón es que el aumento de grupos de mapeo y Los grupos de mejora aumentan el tamaño de la matriz de mapeo Z y la mejora matriz H, lo que resulta en un aumento de la matriz A, aumentando la carga y el consumo del modelo. Se puede concluir que desde el aumento de grupos de mejora y Los grupos de mapeo tienen menos impacto en el rendimiento de detección del modelo y aumentan. el consumo de tiempo cuando se seleccionan grupos de mejora y grupos de mapeo como 1, la precisión y la recuperación mantienen un mayor rendimiento y el consumo de tiempo se minimiza.

Machine Translated by Google



(a) (b) (C)

Figura 8. El efecto de los grupos de mejora y los grupos de mapeo en la clasificación múltiple. Los efectos sobre el desempeño: (a) el efecto sobre la precisión; (b) el efecto sobre la recuperación; (c) el efecto sobre el tiempo de entrenamiento.

4.5. Estudios de ablación

Para evaluar la efectividad del método propuesto, realizamos experimentos de ablación basados en modelos de reducción de tridimensionalidad y dos modelos de clasificación. Los modelos de reducción de tridimensionalidad son PCA tradicional, DBN tradicional y DeBN con la introducción de EQL v2. Los métodos de clasificación son BLS tradicional y nuestros BELS mejorados, respectivamente. Evaluamos el rendimiento de detección de un total de ocho métodos bajo una tarea de clasificación binaria y una tarea de clasificación múltiple basada en Conjunto de datos CICIDS2017. Todos los experimentos se realizaron en el mismo ambiente con formas idénticas de procesamiento de datos y el rendimiento de detección de diferentes modelos se muestra en las Tablas 3 y 4. La tasa de reconocimiento de cada muestra bajo diferentes clasificaciones tareas se muestra en las Tablas 5 y 6.

Tabla 3. Rendimiento de diferentes métodos en clasificación binaria.

Método	Algoritmo					Métrica de evaluación		
	BLS	BELS	PCA	DBN	DeBN	Exactitud	Recordar	Veces)
BLS						0.88105	0.63062	1.83126
PBLS						0.86780	0.59044	0,75575
DBLS						0.91531	0.73711	0.60949
DeBLS						0.29939	0.58103	0.60531
BELS						0.96670	0.92483	4.86849
PBELS						0.92279	0,85250	1.64884
DBELS						0.99240	0.98579	1.63914
DEBELS						0.98896	0.97516	1.57186

El en la tabla indica que el método contiene el algoritmo.

Tabla 4. Rendimiento de diferentes métodos en clasificación múltiple.

Método	Algoritmo					Métrica de evaluación		
	BLS	BELS	PCA	DBN	DeBN	Exactitud	Recordar	Veces)
BLS						0,97450	0.47382	1.74388
PBLS						0.93755	0.29756	0.51006
DBLS						0.99286	0.65797	0.51341
DeBLS						0.98936	0.67712	0.50913
BELS						0.97060	0.52527	5.00825
PBELS						0.93848	0.47024	1.77999
DBELS						0.98719	0.80346	1.49983
DEBELS						0.95790	0.94741	1.63619

El en la tabla indica que el método contiene el algoritmo.

Machine Translated by Google

Tabla 5. El retiro de cada muestra en clasificación binaria.

Categoría	Método							
	BLS	PBLS	DBLS	DeBLS	BELS	PBELS	DBELS	DEBELS
Benigno	0.99983	0.99934	0.99983	0.16582	0.98655	0.95613	0.99554	0.99551
Ataque	0.26141	0.18154	0.47439	0.99625	0.86312	0.74888	0.97604	0.95480

Tabla 6. El retiro de cada muestra en clasificación múltiple.

Categoría	Método							
	BLS	PBLS	DBLS	DeBLS	BELS	PBELS	DBELS	DEBELS
Benigno	0.99094	0.99252	0.99787	0.99665	0.99057	0.95042	0.98886	0.95903
Red de bots ARES	0	0	0	0.13660	0	0	0	0.94845
Fuerza bruta	0	0	0.98480	0.98655	1	0	0.99766	0.98830
DoS/DDoS 0.91515 Escaneo		0.79286	0.97416	0.95507	0.87920	0.89234	0.98244	0.94544
de puertos 0.93683		0	0.99101	0.98787	0.85313	0.97871	0.99093	0.98709
Ataque web	0	0	0	0	0	0	0.86085	0.85613

4.5.1. Análisis de rendimiento en clasificación binaria

En la tarea de clasificación binaria, la estructura BLS tradicional es menos efectiva para reconocer el conjunto de datos CICIDS2017, principalmente debido a la información redundante de alta dimensión. en el conjunto de datos que afecta el rendimiento de la clasificación, lo que resulta en una menor precisión y Recordemos, especialmente la falta de atención a las muestras de clases minoritarias en los países desequilibrados. conjunto de datos. Después de la introducción de EQL v2, la precisión y la recuperación del modelo BELS mejoraron significativamente, lo que indica que EQL v2 mejora la capacidad de reconocer las clases minoritarias. muestras para abordar el problema del desequilibrio. El modelo del sistema amplio de aprendizaje de la red de creencias profundas (DBLS) reduce la redundancia de datos a través de la dimensionalidad DBN. reducción, que mejora la precisión y la recuperación, que se mejoraron en 0.034 y 0,106, respectivamente. El modelo DeBLS se centra demasiado en muestras de clases minoritarias durante Reducción de la dimensionalidad de DeBN, lo que resulta en una disminución en el rendimiento de detección de muestras de clase mayoritaria.

DBELS tiene el rendimiento de detección más alto en la tarea de clasificación binaria, y La introducción de EQL v2 sobre DBLS mejora la precisión y la recuperación al 0,077 y 0,249, respectivamente, lo que indica que la combinación de dimensionalidad DBN La reducción y EQL v2 mejoran significativamente el rendimiento del modelo. Aunque los DeBELS El modelo introduce EQL v2 al conjunto de datos de reducción de dimensionalidad de DeBN y mejora el rendimiento del modelo ajustando los parámetros de gradiente positivo y negativo factores, la precisión y el recuerdo disminuyeron ligeramente en 0,004 y 0,01, respectivamente, en comparación con DBELS, que refleja el impacto negativo del sobreaprendizaje de muestras anormales en rendimiento de clasificación. Para el análisis de componentes principales del sistema de aprendizaje amplio. (PBLS), después de la reducción de dimensionalidad de PCA, la precisión y la recuperación disminuyeron en 0,014 y 0,040, respectivamente, en comparación con el BLS, debido principalmente a una mayor información pérdida durante la reducción de dimensionalidad de PCA y la incapacidad de lidiar con desequilibrios conjuntos de datos de manera eficiente. El análisis del componente principal del sistema de aprendizaje de ecualización amplia. (PBELS) tuvo una precisión de 0,923 y una recuperación de 0,853, en comparación con PBLS, con una mejora de 0,055 y 0,262, lo que indica que EQL v2 aún puede mejorar significativamente el rendimiento de detección de muestras de clases minoritarias incluso cuando la dimensionalidad PCA la reducción es ineficaz. Sin embargo, el PBELS redujo la precisión y la recuperación en 0,070 y 0,106, respectivamente, en comparación con DBELS, lo que demuestra aún más que la dimensionalidad de DBN La reducción supera la reducción de dimensionalidad PCA en tareas de clasificación binaria.

Machine Translated by Google

4.5.2. Análisis de rendimiento en clasificación múltiple En

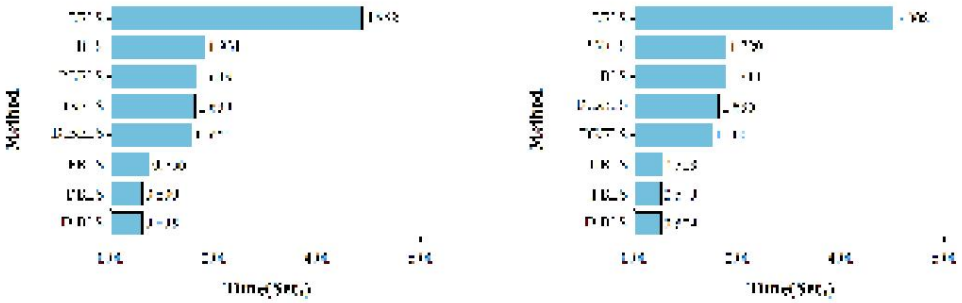
la tarea de clasificación múltiple, el BLS tradicional tuvo un desempeño deficiente, con una precisión de 0,975 y una recuperación de solo 0,474, principalmente debido al grave desequilibrio del conjunto de datos que afecta el desempeño de la clasificación. El modelo BELS después de la introducción de EQL v2 tuvo una recuperación mejorada de 0,051, principalmente porque EQL v2 mejora el problema del desequilibrio de datos, lo que permite al modelo aumentar el peso de las muestras de ataque para clases minoritarias y, por lo tanto, mejora la tasa de detección. El modelo DBLS, después de la reducción de dimensionalidad por parte de DBN, tuvo una precisión mejorada de 0,018 y una recuperación mejorada de 0,184, lo que se atribuye al hecho de que la reducción de dimensionalidad de DBN reduce la redundancia de datos, mitiga el impacto negativo de los datos sin procesar y mejora la rendimiento de detección del modelo. El modelo DeBLS mejoró el recuerdo en 0,02 en comparación con DBLS, lo que se atribuye al hecho de que DeBN aprende más sobre las muestras de clases minoritarias, elimina la redundancia entre diferentes muestras y, al mismo tiempo, conserva las características clave de las muestras de clases minoritarias. lo que mejora el rendimiento de clasificación y detección. El modelo DBELS mejoró en 0,018 en la reducción de dimensionalidad de DBN y, con la introducción de EQL v2, la precisión mejoró en 0,017 y la recuperación mejoró en 0,278; en comparación con DBLS, la recuperación mejoró de 0,658 a 0,803, lo que se atribuye al hecho de que EQL v2 equilibra el peso del aprendizaje de las muestras de clases minoritarias y aumenta el enfoque en las

La precisión del modelo DeBELS de 0,957 y la recuperación de 0,947 fue el mejor rendimiento en la tarea de clasificación múltiple, y la recuperación mejoró significativamente en 0,27 en comparación con DeBLS, lo que se debe a que el modelo BLS mejorado es más capaz de lidiar con situaciones desequilibradas. conjuntos de datos y mejora la capacidad de reconocer ataques de clases minoritarias. La retirada de DeBELS mejoró en 0,144 en comparación con DBELS y el rendimiento general de la clasificación mejoró significativamente. La precisión del modelo PBLS disminuyó en 0,037 y el recuerdo disminuyó en 0,176 después de la reducción de la dimensionalidad de PCA, ya que la reducción de la dimensionalidad de PCA conduce a una mayor pérdida de información, lo que afecta el efecto de clasificación múltiple . La precisión del modelo PBELS fue de 0,938 y el recuerdo fue de 0,470; en comparación con PBLS, la precisión y la recuperación mejoraron en 0,001 y 0,173, respectivamente, lo que indica que la introducción de EQL v2 mejora la tasa de detección de muestras de clases minoritarias. Sin embargo, en comparación con DeBELS, la precisión y la recuperación de PBELS se redujeron en 0,019 y 0,477, respectivamente, lo que indica que la reducción de dimensionalidad de DBN es mucho mejor que el modelo de reducción de dimensionalidad de PCA en términos de rendimiento de detección, y demuestra una vez más la superioridad del modelo propuesto en tareas de clasificación múltiple.

4.5.3. Análisis Tiempo-Costo

La comparación de los tiempos de entrenamiento para los diferentes modelos se muestra en la Figura 9. Para la clasificación binaria y la clasificación múltiple, el tiempo de entrenamiento del BLS tradicional fue de aproximadamente 1,8 s, lo que refleja la ventaja de las redes poco profundas con menores costos de tiempo en la clasificación de modelos. El tiempo de entrenamiento de BELS fue de aproximadamente 5 s y el aumento de tiempo se debió a que la introducción de EQL v2 requiere el rendimiento adicional de múltiples operaciones matriciales. El tiempo de entrenamiento del modelo DBLS fue de aproximadamente 0,5 s, lo cual es una reducción significativa en comparación con el modelo BLS, lo que indica que los datos de alta dimensión tienen un efecto negativo significativo en el tiempo de entrenamiento del modelo, y la dimensionalidad reducida del conjunto de datos reduce el tiempo de entrenamiento al 25% del original. El tiempo de entrenamiento de DeBLS también fue de aproximadamente 0,5 s, lo que indica que la introducción de EQL v2 después de la reducción de dimensionalidad de DBN casi no tiene efecto en el tiempo de entrenamiento. El tiempo de entrenamiento para DBELS fue de aproximadamente 1,5 s, lo que se reduce considerablemente en comparación con BELS, gracias a la reducción de dimensionalidad del modelo DBN para datos de alta dimensión. Sin embargo, hubo un aumento en comparación con DBLS debido a algunos cálculos adicionales requeridos por el modelo BELS mejorado. El tiempo de entrenamiento de DeBELS fue de aproximadamente 1,6 s, que es casi el mismo que el de DBELS, lo que indica que la introducción del conjunto de datos de baja dimensión con EQL v2 no tiene un impacto significativo en el tiempo de entrenamiento y hay un ligero aumento. en el costo de tiempo debido a una pequeña cantidad de cálculos adicionales de las matrices de gradiente positivo y negativo en comparación con DeBLS.

Machine Translated by Google



(a) (b)

Figura 9. Comparación del tiempo de entrenamiento para diferentes métodos: (a) clasificación binaria; (b) clasificación múltiple.

Los resultados muestran que los modelos híbridos DBN y BLS basados en DBELS y DeBELS mantuvieron un bajo consumo de tiempo en comparación con los modelos BLS tradicionales, siguiendo las ventajas de las redes BLS poco profundas que son computacionalmente rápidas y fáciles de entrenar. Aunque el modelo de reducción de dimensionalidad PCA también reduce parte del tiempo de entrenamiento, su rendimiento de detección se degrada considerablemente, lo que confirma nuevamente las ventajas del modelo de reducción de dimensionalidad basado en DBN. El modelo propuesto es comparable al modelo tradicional de aprendizaje profundo, que tiene una ventaja significativa en el consumo de tiempo y costos, lo que favorece el ahorro de una cierta cantidad de recursos computacionales en aplicaciones prácticas.

4.5.4. Análisis de resultados para la recuperación de cada muestra en clasificación binaria

La tasa de detección de muestras benignas y de ataque bajo la tarea de clasificación binaria se muestra en la Tabla 5. El BLS tradicional tuvo un desempeño deficiente en la detección de muestras de ataque con una recuperación de solo 0,261, lo que se debe al sobreaprendizaje de las muestras de clase mayoritaria al tratar con conjuntos de datos desequilibrados, lo que resulta en una baja tasa de detección para muestras de clases minoritarias . Con la introducción del modelo BELS con EQL v2, la tasa de detección de ataques mejoró significativamente a 0,863, lo que mejora significativamente la identificación de muestras de clases minoritarias. El modelo DBLS con reducción de dimensionalidad DBN mejoró la tasa de detección de ataque en 0,213, lo que sugiere que la reducción de dimensionalidad DBN reduce la redundancia de datos y tiene un impacto positivo en la clasificación del modelo posterior. En el modelo DeBLS , la tasa de detección de Ataque fue tan alta como 0,996, pero la tasa de detección de Benigno fue solo 0,165, lo que muestra que la reducción de dimensionalidad de DeBN se centra excesivamente en clases minoritarias de muestras, lo que resulta en una disminución en el rendimiento de reconocimiento de la mayoría de clases de muestras.

El modelo DBELS, después de la reducción de dimensionalidad mediante la introducción de EQL v2, tuvo una tasa de detección de 0,996 para Benign y 0,976 para Attack, lo que mejoró la tasa de detección de las dos clases de muestras en 0,009 y 0,113, respectivamente, en comparación con el modelo BELS. Debido a que la reducción de dimensionalidad de DBN reduce las características redundantes y mejora el rendimiento de clasificación del modelo, en comparación con DBLS, DBELS mejoró significativamente la tasa de detección de ataque de 0,474 a 0,955, lo que se atribuye al hecho de que EQL v2 equilibra los pesos de muestra para que El modelo se centra en cada clase de muestras de una manera más equilibrada. Las tasas de detección de Benign y Attack para el modelo DeBELS fueron 0,995 y 0,955, respectivamente, y en comparación con DeBLS, la tasa de detección de Benign fue sustancialmente mayor y la tasa de detección de Attack fue ligeramente menor, pero EQL v2 mejoró el rendimiento de detección al hacer que el modelo más equilibrado al centrarse en cada clase de muestras. En comparación con DBELS, la tasa de detección de Benign para DeBELS se mantuvo casi sin cambios, y la tasa de detección de Attack disminuyó ligeramente, lo que se atribuye al sobreaprendizaje de muestras de clases minoritarias traídas por DeBN, pero la clasificación aún tuvo un buen desempeño mediante el ajuste de positivos. y factores de gradiente negativos.

Machine Translated by Google

La tasa de detección de ataques para el modelo PBLS fue solo de 0,182 después de la reducción de dimensionalidad de PCA, lo que supone una disminución con respecto a la del modelo BLS de 0,080. La reducción de la dimensionalidad de PCA conduce a la pérdida de información, lo que afecta negativamente el efecto de detección de clasificación de muestras de clases minoritarias. La tasa de detección de ataques del modelo PBELS fue de 0,749, lo que mejoró en 0,567 en comparación con el PBLS. La introducción de EQL v2 hace que el modelo se centre en cada clase de muestra de una manera más equilibrada, lo que mejora el rendimiento de detección de las muestras de clases minoritarias. A pesar de la mejora del modelo PBELS, su tasa de detección de ataques todavía era 0,227 menor que la de DBELS, lo que demuestra aún más la superioridad del modelo de reducción de dimensionalidad DBN en el rendimiento de detección.

4.5.5. Análisis de resultados para la recuperación de cada muestra en clasificación múltiple

Las tasas de detección de diferentes métodos para cada tipo de muestra bajo la tarea de clasificación múltiple se muestran en la Tabla 6. El BLS tradicional no funcionó bien al tratar con el conjunto de datos desequilibrado de CICIDS2017, y aunque tuvo un mejor rendimiento de detección para un mayor número de muestras (por ejemplo, Benign, DoS/DDoS, Port Scan), fue deficiente en la detección de muestras de algunas clases (por ejemplo, Botnet ARES, Fuerza Bruta, Ataque Web). Esto se debe a que el modelo BLS no puede equilibrar las contribuciones de varias clases de muestras cuando se trata de conjuntos de datos desequilibrados, lo que da como resultado una tasa de detección muy baja para muestras de clases minoritarias. La introducción del modelo BELS con EQL v2 mejoró significativamente la tasa de detección de ataques de Fuerza Bruta, lo que a su vez mejoró la identificación de ataques.
Sin embargo, Botnet ARES y Web Attack aún eran indetectables porque las características de estas muestras de clase minoritaria son muy similares a otras muestras, que el modelo no puede diferenciar, lo que genera falsos positivos. El modelo DBLS elimina ciertas redundancias de datos después de la reducción de dimensionalidad mediante DBN, lo que mejora el rendimiento de detección. La tasa de detección de Brute Force se mejoró a 0,985, pero Botnet ARES y Web Attack aún no se detectaron. Esto indica que la reducción de dimensionalidad por sí sola no puede resolver el problema de los conjuntos de datos desequilibrados, especialmente para clases con una cantidad muy pequeña de muestras.

El modelo DeBLS mejoró aún más el rendimiento de detección y se detectaron la mayoría de los tipos de ataques, incluido Botnet ARES. Esto se debe a que la reducción de dimensionalidad de DeBN aprende más sobre las muestras de clases minoritarias y preserva sus características clave, pero Web Attack aún era indetectable, lo que requiere un mayor enfoque en las muestras de clases minoritarias . El modelo DBELS mostró una mejora significativa en la tasa de detección de la mayoría de los tipos de ataques en comparación con BELS y DBLS, especialmente Web Attack, de 0 a 0,856.
Esto se debe a que la reducción de la dimensionalidad de DBN reduce la redundancia de datos, mientras que EQL v2 hace que el modelo se centre mejor en las muestras de clases minoritarias. Sin embargo, todavía no se detectó Botnet ARES, lo que sugiere que la reducción de la dimensionalidad de DBN no es suficiente para resolver el problema. El modelo DeBELS mantuvo una alta tasa de detección en todos los tipos de ataques. En comparación con DeBELS, la tasa de detección de Botnet ARES mejoró de 0,137 a 0,948 y Web Attack mejoró de 0 a 0,856. Esto se debe a que la introducción de EQL v2 mejora la capacidad de reconocer y aprender mejor las muestras de clase minoritaria, lo que mejora significativamente la tasa de detección. DeBELS mejoró aún más la tasa de detección de Botnet ARES en comparación con DBELS porque la reducción de dimensionalidad de DeBN preserva las características clave de las muestras de clase minoritaria con una granularidad más fina y mitiga el problema del desequilibrio de datos.

El modelo PBLS que utiliza la reducción de dimensionalidad PCA solo detectó la mayor cantidad de ataques DoS/DDoS, mientras que Port Scan, Botnet ARES, Brute Force, Web Attack y otros ataques no fueron detectados. En comparación con el modelo BLS, Port Scan no se pudo detectar debido a la pérdida de información causada por la reducción de dimensionalidad de PCA, lo que afecta el efecto de clasificación múltiple. Después de la introducción de EQL v2 al modelo PBELS, la tasa de detección de Port Scan mejoró a 0,978, pero las otras pocas clases de ataques (por ejemplo, Botnet ARES, Brute Force y Web Attack) aún no fueron detectadas. Esto sugiere que la reducción de la dimensionalidad del PCA conduce a la pérdida de características clave. Comparado con

Machine Translated by Google

DeBELS, el rendimiento de detección de PBELS fue peor, lo que indica que la reducción de dimensionalidad basada en DBN supera la reducción de dimensionalidad PCA tradicional en términos de rendimiento de detección.

4.6. Análisis de ROC-AUC La

Figura 10 muestra las curvas de características operativas del receptor (ROC) para la clasificación binaria DBELS. La curva ROC promedio general tiene un área bajo la curva (AUC) de 0,9949, lo que indica que el clasificador DBELS tuvo un desempeño excelente en todo el conjunto de datos y está cerca de ser un clasificador perfecto. En segundo lugar, se pueden observar las curvas ROC para las dos categorías (Ataque y Benigno), cada una de ellas con un AUC de 0.9916, lo que indica que el clasificador también tuvo un alto desempeño al considerar cada categoría individualmente, especialmente cuando se trata de un número minoritario de muestras. El AUC cercano a 1 implica que el clasificador tiene una tasa de verdaderos positivos (TPR) muy alta en sus predicciones para la categoría mientras mantiene un FPR relativamente bajo. Esto significa identificar tantas muestras verdaderamente positivas como sea posible y, al mismo tiempo, mantener la tasa de diagnóstico erróneo lo más baja posible. En conjunto, el clasificador DBELS tuvo un rendimiento excelente en todo el conjunto de datos de desequilibrio tanto para muestras de clases minoritarias como de clases mayoritarias.

tt

La curva ROC de clasificación múltiple de DeBELS se muestra en la Figura 11. La curva ROC promedio general tiene un AUC de 0,9760, lo que indica que el clasificador tuvo un buen desempeño en todo el conjunto de datos. Las detecciones de Benign, Botnet ARES, Brute Force, DoS/DDoS y Port Scan tuvieron un buen desempeño; sus áreas AUC eran todas superiores a 0,9700, aunque Web Attack tenía el área AUC más baja de 0,9100, pero ya es mejor que otros modelos del mismo nivel. En general, después de la introducción de los factores de gradiente positivo y negativo de EQL v2, al ajustar las ponderaciones de los parámetros, el modelo puede prestar más atención a las clases minoritarias de muestras frente a conjuntos de datos desequilibrados, mejorando así el rendimiento de la detección.

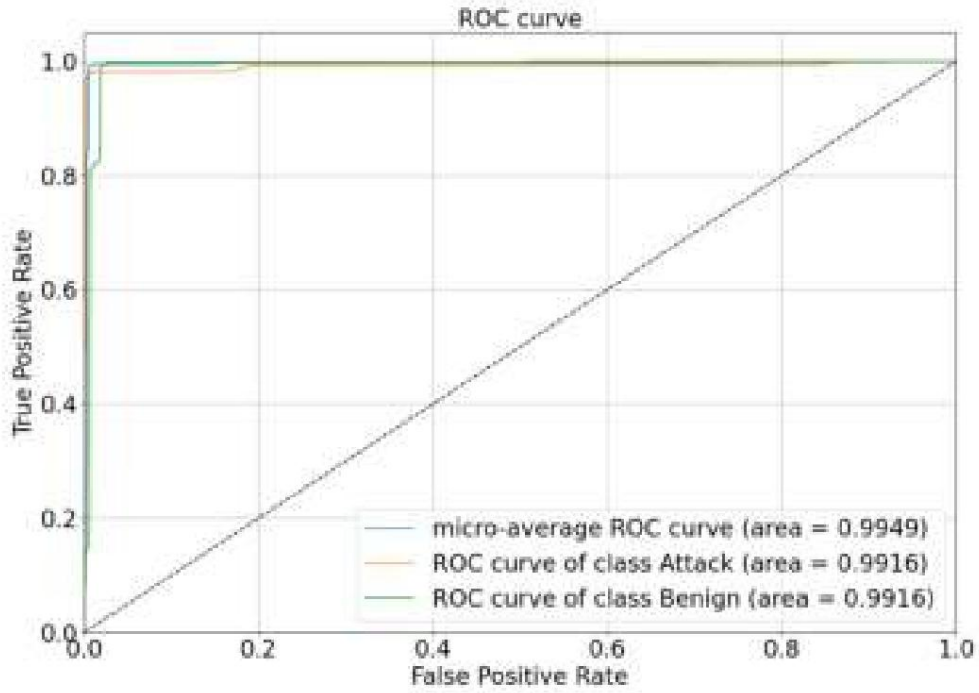


Figura 10. La República de China de DBELS sobre clasificación binaria.

tt

tt

Machine Translated by Google

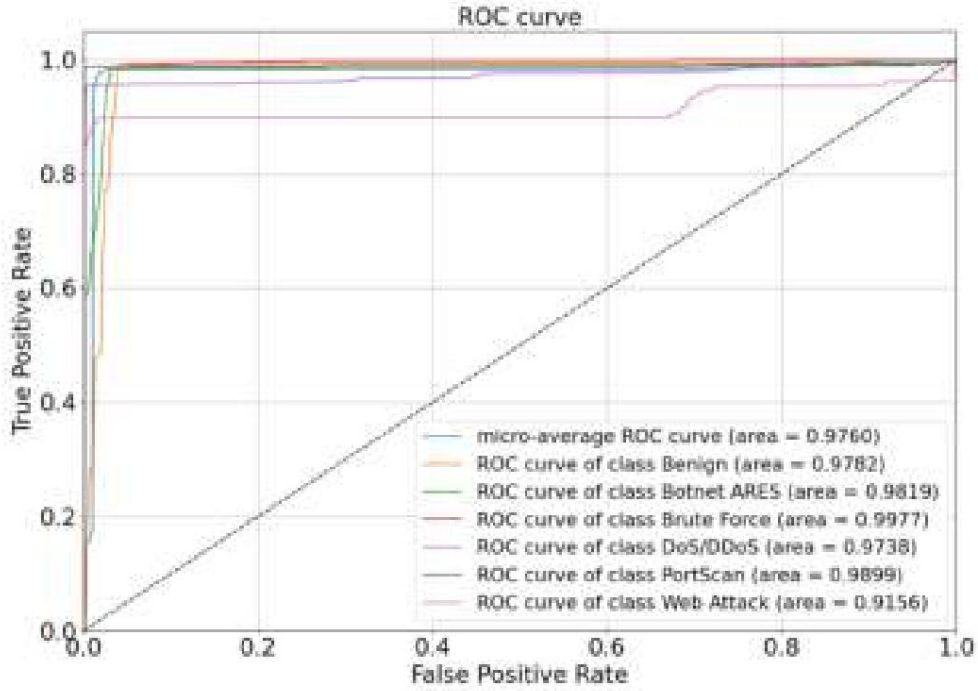


Figura 11. La República de China de DeBELS sobre clasificación múltiple.

4.7. Comparación con métodos de última generación

4.7.1. Clasificación binaria La

tasa de falsas alarmas y el costo de tiempo de todos los algoritmos se compararon en la tarea de clasificación binaria, como se muestra en la Figura 12. Para FPR, el modelo propuesto tuvo una tasa de falsas alarmas más baja de 0,014, que fue mejor que los otros modelos. Esto indica que el modelo propuesto etiqueta incorrectamente situaciones normales como anormales con menos frecuencia e identifica y clasifica correctamente situaciones normales con mayor frecuencia, en comparación con otros métodos. Para el tiempo de entrenamiento del modelo , el modelo propuesto requirió menos tiempo de entrenamiento y tiempo de detección en la tarea de clasificación binaria, con un consumo de tiempo de alrededor de 1 s. El costo de tiempo del modelo es mucho menor que el del modelo de aprendizaje profundo y tiene una ventaja sobre otros algoritmos de aprendizaje automático, que pueden reducir significativamente el costo de tiempo y garantizar un entrenamiento más rápido del modelo para conjuntos de datos a gran escala.

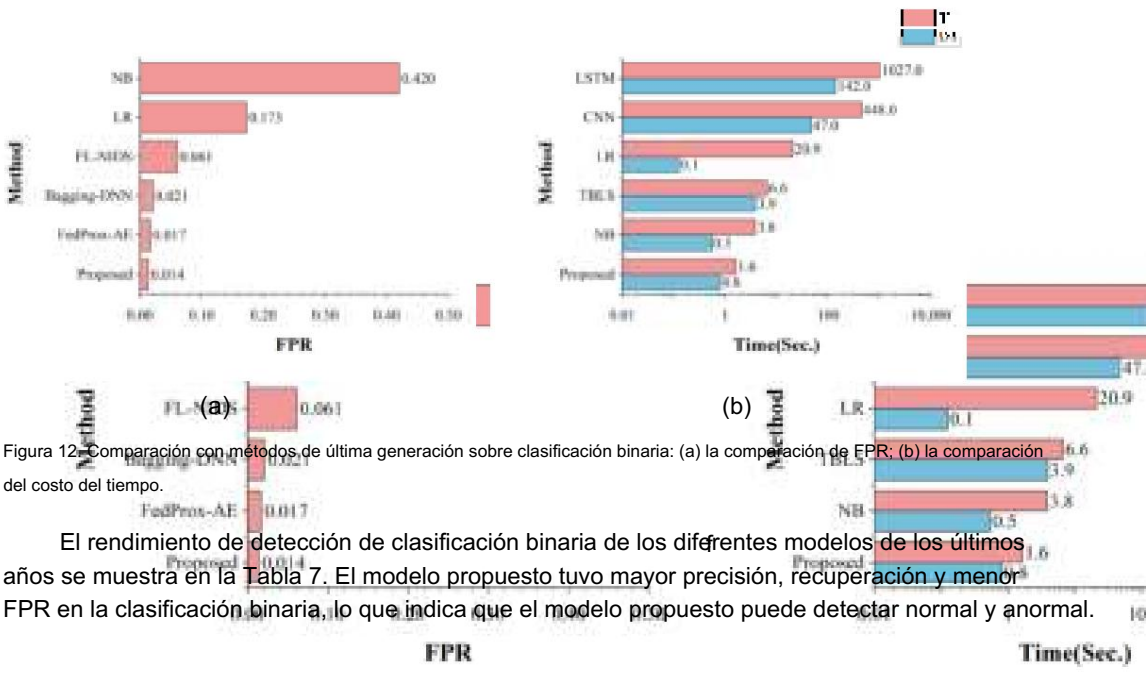


Figura 12. Comparación con métodos de última generación sobre clasificación binaria: (a) la comparación de FPR; (b) la comparación del costo del tiempo.

El rendimiento de detección de clasificación binaria de los diferentes modelos de los últimos años se muestra en la Tabla 7. El modelo propuesto tuvo mayor precisión, recuperación y menor FPR en la clasificación binaria, lo que indica que el modelo propuesto puede detectar normal y anormal.

Machine Translated by Google

comportamientos bien. En comparación con los modelos tradicionales de aprendizaje automático, el modelo propuesto supera a la regresión logística (LR) y al ingenuo bayes (NB) en precisión, recuperación y FPR. En comparación con otros modelos basados en BLS, la precisión y la recuperación son mejores que TBLS. En comparación con los modelos de aprendizaje profundo, el modelo propuesto supera a la mayoría de los modelos. y el rendimiento de la fusión de la red neuronal profunda estadística (FS-DNN) y la red neuronal convolucional evolutiva multiobjetivo (MECNN) es ligeramente superior a el modelo propuesto; sin embargo, dado que ambos modelos se basan en modelos de aprendizaje profundo, sus El tamaño del modelo y el costo del tiempo de capacitación son mucho más altos que los del modelo basado en BLS. Considerando En el modelo de red neuronal profunda de aprendizaje conjunto de ensacado (Bagging-DNN), su precisión es más bajo que el modelo propuesto, y su recuperación es ligeramente mayor que el modelo propuesto, pero además de la mayor complejidad espacial y temporal que aporta su modelo de aprendizaje profundo, la tasa de falsas alarmas también es mayor que la del modelo propuesto. En resumen, la propuesta El modelo tiene un mejor rendimiento de detección y una menor tasa de falsas alarmas en la clasificación binaria. y tiene ventajas obvias sobre los otros modelos.

Tabla 7. Comparación con métodos de clasificación binaria de última generación.

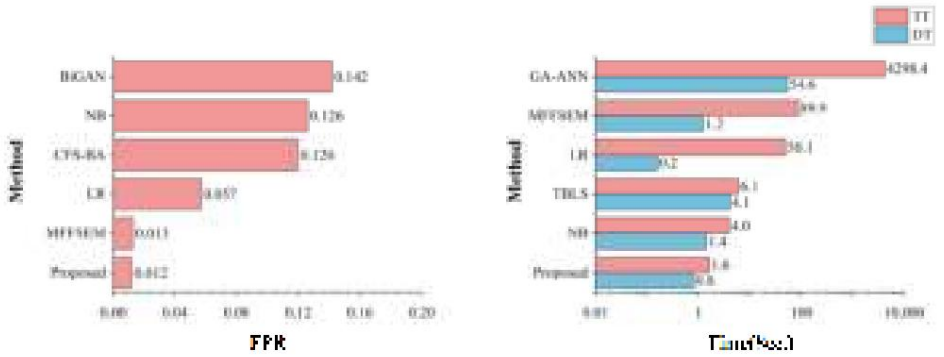
Método	Exactitud	Recordar	FPR
Nuestro estudio	0,992	0.986	0.014
LR	0.934	0,827	0,173
NÓTESE BIEN	0.307	0.580	0.420
DCAE	0,925	0,925	-
TBLS(W) [18]	0.982	0.975	-
DNN [18]	0,868	-	-
CNN [18]	0.844	-	-
LTM [18]	0.365	-	-
2D-CNN [26]	0.980	-	-
CNN-LSTM [27]	0.930	0,768	-
FS-DNN [28]	0,998	0,999	0.012
MECNN [29]	0,998	0,998	-
Embolsado-DNN [30]	0,987	0,999	0.021
FL-NIDS [31]	0,943	0,947	0.061
FedProx-AE [32]	0,935	-	0,017

4.7.2. Clasificación múltiple

La tasa de falsos positivos y el costo de tiempo de todos los demás algoritmos en la clasificación múltiple La tarea se muestra en la Figura 13. Los gráficos de FPR muestran que el modelo propuesto tenía solo un Tasa de falsos positivos de 0,012, que es más baja que la de otros modelos. Esto significa que el modelo Puede reconocer mejor diferentes categorías de ataques y clasificarlos erróneamente con menos frecuencia durante el proceso. tarea de clasificación múltiple y realizar la tarea de detectar e identificar muestras de ataques mejor. El modelo requirió menos tiempo de entrenamiento y tiempo de detección en comparación con otros modelos, que ofrecen ventajas en el manejo de datos a gran escala y mejoran su idoneidad para entornos de conjuntos de datos del mundo real.

El rendimiento de detección de clasificación múltiple de diferentes modelos en los últimos años es dado en la Tabla 8. El modelo propuesto tiene mayor precisión y recuperación y menor FPR en condiciones tarea de clasificación múltiple, lo que indica que el modelo propuesto puede detectar tanto normal y comportamientos anormales y detectar mejor cada clase específica de ataques. Comparando los algoritmos tradicionales de aprendizaje automático, vemos que el modelo propuesto supera LR y NB en términos de precisión, recuperación y FPR. En comparación con otros modelos BLS, el El modelo TBLS(W) tiene una precisión y recuperación ligeramente mayores que el modelo propuesto, ya que, Para el TBLS, los autores solo seleccionaron el conjunto de datos de un solo día, miércoles, para el modelo. entrenamiento y pruebas. Solo representa el 30% del conjunto total de datos y los tipos de ataques son todos los ataques de tipo DoS/DDoS, que están mejor equilibrados en comparación con el conjunto de datos total, y el rendimiento de detección del modelo se verá afectado hasta cierto punto.

Machine Translated by Google



(a) (b)

Figura 13. Comparación con métodos de última generación sobre clasificación múltiple: (a) la comparación del FPR; (b) la comparación del costo del tiempo.

Tabla 8. Comparación con métodos de última generación sobre clasificación múltiple.

Método	Exactitud	Recordar	FPR
Nuestro estudio	0.958	TT 0,947	0.012
LR	0.934	0.301	0.057
NÓTESE BIEN	0.286	0,746	0.126
GA-ANN	0.815	-	-
GSPSO-ANN	0.840	-	-
TBLS(W) [18]	0.978	0,977	-
BiGAN [33]	0,823	0.763	0,142
MFFSEM(W) [2]	0,999	0,999	0.013
DNN [34]	0.946	0,846	-
MECNN [29]	0,997	0,791	-
AdaBoost [35]	0,889	0,234	-
SDAE-SVM [36]	0.954	0,444	-
GRU [37]	0,985	0,742	-
LTM [38]	0,989	0,748	-
CSA-BA(W) [39]	0,999	0,999	0.120

En comparación con otros algoritmos de aprendizaje automático, para el multidimensional Mecanismo de conjunto de apilamiento y fusión de características (MFFSEM) y característica basada en correlación. En los modelos de algoritmo de selección de murciélagos (CFS-BA), el rendimiento de detección es mejor que el de del modelo propuesto, pero sus FPR son más altos que el modelo propuesto, lo que conducirá para ellos juzgar demasiado mal el comportamiento normal como un ataque. Los dos modelos también están entrenados. con el mismo conjunto de datos de un solo día, el miércoles. En comparación con el largo plazo modelo de memoria (LSTM), su precisión es ligeramente mayor que la del modelo propuesto, pero su El recuerdo es mucho menor que el modelo propuesto, lo que significa que el modelo LSTM no logra reconocer bien los ataques. En resumen, en comparación con otros modelos, el modelo propuesto Tiene ventajas como un mejor rendimiento de detección y una menor tasa de falsas alarmas cuando realizar la tarea de clasificación múltiple.

5. Validación del modelo

El tráfico de red en entornos reales es grande y complejo; para evaluar el DBELS modelar mejor y simular el efecto de entornos reales, seleccionamos el CICIDS2018 conjunto de datos para probar y validar el rendimiento del modelo en diferentes entornos de datos. El El conjunto de datos CICIDS2018 es un conjunto de datos ampliamente utilizado en la investigación de ciberseguridad y fue creado por el instituto canadiense de investigación de ciberseguridad, que simula la red del mundo real tráfico, incluido el tráfico normal y muchos tipos de ataques. Comparado con la CICIDS2017 conjunto de datos, su tamaño ha aumentado aproximadamente cuatro veces y contiene más de ocho millones registros de tráfico; sin embargo, también tiene un grave desequilibrio de datos. El conjunto de datos contiene más

Machine Translated by Google

ocho millones de registros de tráfico con hasta 80 funciones por muestra. Estos datos cubren tanto tráfico normal y una amplia gama de tráfico de ataque, con tipos de muestra que incluyen principalmente Benigno, DoS/DDoS, Fuerza Bruta, Botnet e Infiltración. La diversidad y complejidad de Los tipos de muestra en el conjunto de datos CICIDS 2018 hacen que el conjunto de datos refleje mejor las amenazas cibernéticas del mundo real, lo que permite evaluar exhaustivamente el desempeño. y capacidades de generalización de los sistemas de detección de intrusos.

Los experimentos de validación del modelo utilizando el conjunto de datos CICIDS2018 incluyeron preprocesamiento de datos y reducción de dimensionalidad de datos, y la forma de las operaciones se mantuvo consistente con CICIDS2017. Los modelos para sus experimentos de comparación incluyen BLS, DT, NB, MLP y CNN. Para garantizar la validez de los experimentos, el preprocesamiento de datos es lo mismo, y todos los experimentos se llevan a cabo en un entorno de consentimiento. La evaluación Las métricas para el experimento de comparación incluyeron precisión, recuperación, tasa de falsos positivos y tiempo de entrenamiento. El desempeño de diferentes modelos bajo la tarea de clasificación binaria. se muestra en la Tabla 9, y el desempeño bajo la tarea de clasificación múltiple se muestra en la Tabla 10.

Tabla 9. Rendimiento de diferentes métodos de clasificación binaria para el conjunto de datos CICIDS2018.

Método	Métrica de evaluación			
	Exactitud	Recordar	FPR	Veces)
Nuestro estudio	0.981	0.956	0.044	5.295
BLS	0.958	0.931	0,069	18.826
DT	0.917	0.862	0.138	16.770
NÓTESE BIEN	0,791	0,742	0.258	2.556
MLP	0.963	0.933	0.067	861.788
cnn	0,957	0.926	0,074	949.476

Tabla 10. Rendimiento de diferentes métodos de clasificación múltiple para el conjunto de datos CICIDS2018.

Método	Métrica de evaluación			
	Exactitud	Recordar	FPR	Veces)
Nuestro estudio	0.946	0.923	0,016	4.731
BLS	0.953	0.702	0.031	12.729
DT	0.891	0,499	0.060	17.266
NÓTESE BIEN	0,828	0.860	0,047	2.694
MLP	0.934	0,485	0,046	1025.025
cnn	0.966	0,785	0.026	916.550

Los resultados muestran que nuestro modelo propuesto supera a la mayoría de los otros modelos en precisión, recuperación, FPR y costo de tiempo bajo diferentes tareas de clasificación. Para la clasificación binaria tarea, en comparación con la estructura BLS tradicional, la precisión y la recuperación mejoran en 0,023 y 0,025, respectivamente, y la tasa de falsas alarmas se reduce en 0,025. En comparación con el Los algoritmos tradicionales de aprendizaje automático DT y NB, ambos tienen una mejora significativa en el rendimiento de detección, mientras que la tasa de falsas alarmas se reduce significativamente. Para los algoritmos de aprendizaje profundo MLP y CNN, se mejora el rendimiento de detección y el tiempo de entrenamiento del modelo se reduce significativamente. Para la tarea de clasificación múltiple, el El modelo propuesto también mantiene un alto rendimiento de detección y un bajo tiempo de entrenamiento del modelo. y en comparación con el modelo NB, tiene una ventaja significativa en el rendimiento de detección, aunque el tiempo de entrenamiento del modelo mejora ligeramente. En comparación con el modelo CNN, aunque la precisión disminuye ligeramente en 0,02, es mejor que el modelo CNN en términos de recuperación, FPR y tiempo de entrenamiento del modelo.

Machine Translated by Google

A partir de los resultados experimentales anteriores, se puede concluir que el modelo propuesto aún puede mostrar un mejor rendimiento de detección cuando se enfrenta al conjunto de datos CICIDS2018 con una escala más grande y compleja, lo que indica además que el modelo tiene un cierto grado de escalabilidad y adaptabilidad. La escala de este conjunto de datos aumenta considerablemente en comparación con el conjunto de datos CICIDS2017; sin embargo, el modelo propuesto aún puede mantener un bajo consumo de tiempo , lo que verifica aún más que el modelo tiene un cierto grado de adaptabilidad y ligereza para entornos reales complejos. Nuestro modelo propuesto demuestra consistentemente un sólido rendimiento de detección y un bajo consumo de tiempo en varios conjuntos de datos, ya sea para clasificación binaria o de clases múltiples. Esta eficiencia es crucial para aplicaciones del mundo real, donde mantener una alta precisión y velocidad es esencial. Además, la adaptabilidad del modelo a diferentes entornos de datos y su solidez frente a diversas amenazas aumentan su valor práctico. Su escalabilidad garantiza que pueda manejar volúmenes de datos cada vez mayores, lo que la convierte en una solución versátil en panoramas dinámicos de ciberseguridad.

6. Conclusiones

En este artículo, basado en el modelo BLS e introduciendo la idea de reponderación de EQL v2, proponemos un modelo DBELS, que tiene como objetivo resolver el problema del BLS tradicional que enfrenta bajas tasas de detección para conjuntos de datos desequilibrados y de alta dimensión en el campo de los NIDS. así como el escaso reconocimiento de los ataques de clases minoritarias. Primero, el modelo aprende completamente el conjunto de datos de alta dimensión a gran escala a través de DBN, entrena completamente cada estructura RBM, captura la estructura óptima y la información clave del conjunto de datos de alta dimensión y lo representa como un conjunto de datos óptimo de baja dimensión. Posteriormente, se aplica el modelo BELS para aprender la clasificación del conjunto de datos de baja dimensión, y el grado de aprendizaje del modelo en las muestras de clases minoritarias se mejora ajustando los factores de gradiente positivos y negativos para aumentar el peso de clasificación del modelo y mejorar el reconocimiento de los ataques de las clases minoritarias. El DBELS se prueba completamente experimentalmente utilizando el conjunto de datos CICIDS2017 y nuestro modelo propuesto supera a otros algoritmos en precisión, recuperación, FPR y tiempo. Finalmente, la utilidad del modelo propuesto se prueba y valida más a fondo con el conjunto de datos CICIDS2018. Los resultados muestran que nuestro modelo DBELS propuesto tiene ventajas significativas para resolver el problema de los datos de detección de intrusiones de red desequilibrados y de alta dimensión y alivia los problemas del largo tiempo de entrenamiento de los sistemas de detección de intrusiones y el bajo reconocimiento de ataques de clase minoritaria, lo que lo convierte en un método práctico de detección de intrusiones. Planeamos introducir estrategias de inicialización y técnicas de aprendizaje de flujo en el futuro para mejorar la estabilidad y el rendimiento de detección del BLS. Además, planeamos utilizar algoritmos avanzados para mejorar la solidez del modelo y mejorar su adap

Contribuciones de los autores: Conceptualización, MD; metodología, MD y CS; software, MD, CS y YK; validación, médico de cabecera; investigación, CS, MD y SF; recursos, XZ; curación de datos, CS y SF; redacción: preparación del borrador original, MD y HX; redacción: revisión y edición, MD y HX; visualización, MD y YK; supervisión, XZ y HX Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China (62276091).

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos estarán disponibles previa solicitud.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Anderson, JP Monitoreo y vigilancia de amenazas a la seguridad informática; Reporte técnico; Compañía James P. Anderson: Washington, DC, Estados Unidos, 1980.
2. Zhang, H.; Li, J.-L.; Liu, X.-M.; Dong, C. Mecanismo de conjunto de apilamiento y fusión de características multidimensionales para redes Detección de intrusiones. Generación del futuro. Computadora. Sistema. 2021, 122, 130-143. [Referencia cruzada]
3. Saín, H.; Purnami, SW Combine la máquina de vectores de soporte de muestreo para la clasificación de datos desequilibrados. Computación de procedimiento. Ciencia. 2015, 72, 59–66. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

4. Thapa, N.; Liu, Z.; Kc, DB; Gokaraju, B.; Roy, K. Comparación de modelos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo para redes.
sistema de deteccion de intrusos. Internet del futuro 2020, 12, 167. [CrossRef]
5. Namakshenas, D.; Yazdinejad, A.; Dehghantanha, A.; Srivastava, G. Modelo federado de detección de amenazas que preserva la privacidad y basado en cuánticos para el Internet de las cosas del consumidor. Traducción IEEE. Consumir. Electrón. 2024. [Referencia cruzada]
6. Almiani, M.; AbuGhazleh, A.; Al-Rahayfeh, A.; Atiewi, S.; Razaque, A. Red neuronal recurrente profunda para la detección de intrusiones de IoT
sistema. Simultáneo. Modelo. Practica. Teoría 2020, 101, 102031. [CrossRef]
7. Wu, P. Aprendizaje profundo para la detección de intrusiones en la red: reconocimiento de ataques con inteligencia computacional; UNSW: Sídney, Australia, 2020.
8. Yazdinejad, A.; Dehghantanha, A.; Karimipour, H.; Srivastava, G.; Parizi, RM Un modelo de aprendizaje federado robusto que preserva la privacidad contra ataques de envenenamiento de modelos. Traducción IEEE. Inf. Seguridad forense. 2024, 19, 6693–6708. [Referencia cruzada]
9. Yazdinejad, A.; Dehghantanha, A.; Srivastava, G.; Karimipour, H.; Parizi, RM Privacidad híbrida que preserva el aprendizaje federado frente a usuarios irregulares en el Internet de las cosas de próxima generación. J. Sistema. Arquitecto. 2024, 148, 103088. [Referencia cruzada]
10. Chen, CP; Liu, Z. Sistema de aprendizaje amplio: un sistema de aprendizaje incremental eficaz y eficiente sin necesidad de aprendizaje profundo.
arquitectura. Traducción IEEE. Red neuronal. Aprender. Sistema. 2017, 29, 10–24. [Referencia cruzada] [PubMed]
11. Gong, X.; Zhang, T.; Chen, CP; Liu, Z. Revisión de investigaciones para un sistema de aprendizaje amplio: algoritmos, teoría y aplicaciones.
Traducción IEEE. Cibern. 2021, 52, 8922–8950. [Referencia cruzada]
12. Li, Z.; Ríos, ALG; Xu, G.; Trajkovi´c, L. Técnicas de aprendizaje automático para clasificar anomalías e intrusiones en la red. En Actas del Simposio Internacional sobre Circuitos y Sistemas (ISCAS) del IEEE de 2019, Sapporo, Japón, 26 a 29 de mayo de 2019; págs. 1 a 5.
13. Wu, T.; Fan, H.; Zhu, H.; usted, C.; Zhou, H.; Huang, X. El sistema de detección de intrusiones combinó un bosque aleatorio mejorado con SMOTE
algoritmo. EURASIP J. Adv. Proceso de señal. 2022, 2022, 39. [Referencia cruzada]
14. Zhang, B.; Liu, Z.; Jia, Y.; Ren, J.; Zhao, X. Método de detección de intrusiones en la red basado en PCA y algoritmo Bayes.
Seguro. Comunitario. Neto. 2018, 2018, 1914980. [Referencia cruzada]
15. Li, Z.; Batta, P.; Trajkovic, L. Comparación de algoritmos de aprendizaje automático para la detección de intrusiones en la red. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE sobre Sistemas, Hombre y Cibernética (SMC) de 2018, Miyazaki, Japón, 7 a 10 de octubre de 2018; págs. 4248–4253.
16. Ríos, ALG; Li, Z.; Xu, G.; Alonso, AD; Trajkovi´c, L. Detección de anomalías e intrusiones en redes de comunicación.
En Actas de la 23.ª Conferencia Internacional del IEEE sobre Sistemas de Ingeniería Inteligentes (INES) de 2019, Gödöll˝o, Hungría, 25 a 27 de abril de 2019; págs. 000029–000034.
17. Ríos, ALG; Li, Z.; Bekshentayeva, K.; Trajkovi´c, L. Detección de Ataques de Denegación de Servicio en Redes de Comunicaciones.
En Actas del Simposio Internacional sobre Circuitos y Sistemas (ISCAS) del IEEE 2020, Sevilla, España, 12 a 14 de octubre de 2020; págs. 1 a 5.
18. Li, J.; Zhang, H.; Liu, Z.; Liu, Y. Detección de intrusiones en la red mediante un sistema de aprendizaje tri-amplio basado en granularidad espacio-temporal.
J. Supercomputadora. 2023, 79, 9180–9205. [Referencia cruzada]
19. Ahmad, T.; Aziz, MN Preprocesamiento de datos y selección de funciones para sistemas de detección de intrusiones de aprendizaje automático.
ICIC Express Lett. 2019, 13, 93-101.
20. Hao, X.; Jiang, Z.; Xiao, Q.; Wang, Q.; Yao, Y.; Liu, B.; Liu, J. Producir más con menos: un enfoque de detección de ataques de red basado en GAN para datos desequilibrados. En actas de la 24.ª Conferencia internacional del IEEE de 2021 sobre trabajo cooperativo en diseño asistido por computadora (CSCWD), Dalian, China, 5 a 7 de mayo de 2021; págs. 384–390.
21. Tan, J.; Lu, X.; Zhang, G.; Yin, C.; Li, Q. Pérdida de ecualización v2: un nuevo enfoque de equilibrio de gradiente para la detección de objetos de cola larga.
En Actas de la Conferencia IEEE/CVF sobre visión por computadora y reconocimiento de patrones, Nashville, TN, EE. UU., 20 a 25 de junio de 2021; págs. 1685-1694.
22. Shen, Z.; Zhang, Y.; Chen, W. Un método de detección de intrusiones de clasificación bayesiana basado en la fusión de PCA y LDA.
Seguro. Comunitario. Neto. 2019, 2019, 6346708. [Referencia cruzada]
23. Saló, F.; Nasif, AB; Essex, A. Reducción de dimensionalidad con IG-PCA y clasificador de conjunto para la detección de intrusiones en la red.
Computadora. Neto. 2019, 148, 164-175. [Referencia cruzada]
24. Hinton, GE; Osindero, S.; Teh, Y.-W. Un algoritmo de aprendizaje rápido para redes de creencias profundas. Computación neuronal. 2006, 18, 1527–1554. [Referencia cruzada] [PubMed]
25. Belarbi, O.; Khan, A.; Carnelli, P.; Spyridopoulos, T. Un sistema de detección de intrusiones basado en redes de creencias profundas. En Actas de la Conferencia Internacional sobre Ciencia de la Seguridad Cibernética, Shimane, Japón, 10 a 12 de agosto de 2022; págs. 377–392.
26. Andresini, G.; Appice, A.; Malerba, D. Detección de intrusiones basada en clústeres más cercanos a través de redes neuronales convolucionales.
Conocimiento. Sistema basado. 2021, 216, 106798. [Referencia cruzada]
27. Kim, A.; Parque, M.; Lee, DH AI-IDS: Aplicación del aprendizaje profundo a la detección de intrusiones web en tiempo real. Acceso IEEE 2020, 8,
70245–70261. [Referencia cruzada]
28. Thakkar, A.; Lohiya, R. Fusión de importancia estadística para la selección de funciones en la detección de intrusiones basada en redes neuronales profundas
Sistema. Inf. Fusión 2023, 90, 353–363. [Referencia cruzada]
29. Chen, Y.; Lin, Q.; Wei, W.; Ji, J.; Wong, K.-C.; Coello, CAC Detección de intrusiones utilizando una red neuronal convolucional evolutiva multiobjetivo para Internet de las cosas en la informática de niebla. Conocimiento. Sistema basado. 2022, 244, 108505. [Referencia cruzada]
30. Thakkar, A.; Lohiya, R. Clasificación de ataques de datos de intrusión desequilibrados para redes de IoT utilizando aprendizaje profundo basado en conjuntos
red neuronal. IEEE Internet Things J. 2023, 10, 11888–11895. [Referencia cruzada]

Machine Translated by Google

31. Mulyanto, M.; Faisal, M.; Prakosa, suroeste; Leu, J.-S. Efectividad de la pérdida focal para la clasificación de minorías en la intrusión de la red sistemas de detección. Simetría 2020, 13, 4. [CrossRef]
32. Idrissi, MJ; Alami, H.; El Mahdaouy, A.; El Mekki, A.; Oualil, S.; Yartaoui, Z.; Berrada, I. Fed-anids: aprendizaje federado para Sistemas de detección de intrusiones en la red basados en anomalías. Sistema experto. Aplica. 2023, 234, 121000. [Referencia cruzada]
33. Yao, W.; Shi, H.; Zhao, H. Detección de intrusiones escalable basada en anomalías para una Internet de las cosas segura utilizando redes generativas adversarias en un entorno de niebla. J. Net. Computadora. Aplica. 2023, 214, 103622. [Referencia cruzada]
34. José, J.; Jose, DV Algoritmos de aprendizaje profundo para sistemas de detección de intrusiones en Internet de las cosas utilizando el conjunto de datos CIC-IDS 2017. En t. J. Electr. Computadora. Ing. (IJECE) 2023, 13, 1134–1141. [Referencia cruzada]
35. Rojas, R. AdaBoost y el super bowl de clasificadores: un tutorial de introducción al impulso adaptativo. Universidad Freie. Berl. Tecnología. Representante 2009, 1, 1–6.
36. Lv, Z.; Qiao, L.; Li, J.; Song, H. Problemas de seguridad basados en el aprendizaje profundo en Internet de las cosas. IEEE Internet Things J.2020 , 8, 9531–9538. [Referencia cruzada]
37. Assis, MV; Carvalho, LF; Lloret, J.; Proença Jr, ML Un sistema de aprendizaje profundo de GRU contra ataques en redes definidas por software. J. Net. Computadora. Aplica. 2021, 177, 102942. [Referencia cruzada]
38. Imrana, Y.; Xiang, Y.; Un poco.; Abdul-Rauf, Z. Un enfoque de aprendizaje profundo LSTM bidireccional para la detección de intrusiones. Sistema experto. Aplica. 2021, 185, 115524. [Referencia cruzada]
39. Zhou, Y.; Cheng, G.; Jiang, S.; Dai, M. Construcción de un sistema eficiente de detección de intrusos basado en la selección de características y el clasificador de conjuntos. Computadora. Neto. 2020, 174, 107247. [Referencia cruzada]

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.