

SORUS

Validación y optimización conjunta de RIS y vRANs

SORUS-RAN A2.2

PRIMERA VERSIÓN DE ALGORITMOS DE
OPTIMIZACIÓN CONJUNTA

Revisión	Autor	Fecha de entrega	Cambios
Versión 01	Jose Ayala Romero, Andrés García Saavedra	31/08/2023	Versión Inicial
Versión 02	Luis Roda Sánchez, Jorge San Martin Gomez	08/09/2023	revisión y actualización de tablas y resumen ejecutivo y conclusiones.

Exención de responsabilidad:

El apoyo de la Comisión Europea a la elaboración de esta publicación no constituye una aprobación de su contenido, que refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que se pueda hacer de la información aquí difundida.

CONTENIDOS

LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS	3
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	5
1 RESUMEN EJECUTIVO	6
2 INTRODUCCIÓN	7
2.1. RISS: AYUDANDO Y FAVORECIENDO EL ACCESO MASIVO DE IOT BASADO EN TECNOLOGÍA MMWAVE.....	7
2.2. RISS VS. REPETIDORES Y MIMO	8
2.3. CONTRIBUCIONES EN EL CONTEXTO DE ESTA ACTIVIDAD	10
3 DISEÑO DEL MODELO	11
3.1. NOTACIÓN.....	11
3.2. MODELO.....	12
3.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
4 CASO DE USO 1: USUARIO ÚNICO	15
5 CONCLUSIONES.....	18

LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

Tabla 1. Lista de abreviaturas y acrónimos

Abreviatura	Explicación/Definición
AF	Amplify and Forward
AoA	Angle of Arrival
AoD	Angle of Departure
BS	Base Station
CSI	Channel State Information
IA	Inteligencia Artificial
IoT	Internet of Things
LA	Learning Agent
LoS	Line of Sight
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
mmWave	millimeter Wave
MRT	Maximal Ratio Transmission
MSE	Mean Squared Error
NLoS	Non-Line of Sight
RAN	Radio Access Network
RIS	Reconfigurable Intelligent Surface
SDR	SemiDefinite Relaxation
SINR	Signal to Interference & Noise Ratio
SMSE	Sum of Mean Squared Errors
SNR	Signal-to-Noise Ratio
UE	User Equipment

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ESCENARIO DE ACCESO MASIVO A RECURSOS DE RADIOFRECUENCIA SUPERANDO PROBLEMAS NLOS MEDIANTE EL USO DE RISS INSTALADAS EN LOS CRISTALES DE LOS EDIFICIOS. PODRÍA SOPORTAR DIFERENTES CASOS DE USO, COMO GAFAS DE REALIDAD AUMENTADA (AR), E-SALUD, VIDEOVIGILANCIA E IOT INDUSTRIAL.....	12
--	----

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS..... 3

1 RESUMEN EJECUTIVO

Este entregable trata de los algoritmos creados para la optimización de redes IoT con la finalidad de proporcionar conectividad de bajo coste y gran ancho de banda. Para ello se ha desarrollado un algoritmo basado en superficies inteligentes reconfigurables (RISs), llamado RISMA, que optimiza conjuntamente los parámetros de la RIS y la estrategia de formación de haces en el transmisor desde una perspectiva teórica. A su vez, se presenta un algoritmo desarrollado a partir del anterior, denominado Lo-RISMA, que pretende dar solución a los casos donde se utilizan RISs de baja resolución a través del estudio del error cuadrático medio agregado (SMSE) para conseguir una optimización de la tasa de transmisión agregada del sistema en el enlace descendente.

En este escenario, se ha optado por una estrategia de pre-codificación en el transmisor y un ajuste de los parámetros de la RIS, lo que aporta una ventaja sobre trabajos anteriores porque permite diseñar algoritmos iterativos muy eficientes para el control de la RIS. El objetivo principal es optimizar la tasa de transmisión agregada minimizando el Error Cuadrático Medio (MSE) entre la estación base (*Base Station* o BS, por sus siglas en inglés) y los equipos de usuario (*User Equipments* o UEs). En este documento se propone una estrategia de precodificación adaptada al canal efectivo en condiciones de conocimiento perfecto del canal. Posteriormente, se optimizan los parámetros del RIS, teniendo en cuenta restricciones prácticas como la activación binaria de los elementos reflectantes y la cuantización de las fases. En concreto, en este documento, se tratará el caso de uso donde únicamente se tiene un usuario.

2 INTRODUCCIÓN

Impulsados por preocupaciones económicas y ambientales, el diseño de tecnologías inalámbricas de alta capacidad de banda y eficiencia energética se está convirtiendo en primordial; incluso las pequeñas mejoras son significativas a la escala de los sistemas de Internet de las Cosas (*Internet of Things* o IoT, por sus siglas en inglés) de próxima generación¹. En este artículo, argumentamos que la explotación conjunta del espectro de ondas milimétricas (mmWave), que puede proporcionar un ancho de banda de varios GHz, y las superficies inteligentes reconfigurables (RISs, por sus siglas en inglés), que pueden aliviar el coste energético asociado al primero, tiene el potencial de alcanzar este objetivo.

2.1. RISs: ayudando y favoreciendo el acceso masivo de IoT basado en tecnología mmWave

La búsqueda de bandas de radio más amplias ha llevado a los profesionales de las redes móviles a estudiar, con éxito, el uso de mmWave como medio para acomodar la conectividad de banda ultra-ancha. De hecho, mmWave es sin duda una de las piedras angulares de la tecnología 5G y seguirá siéndolo en los sistemas de futuras generaciones.

De todos modos, la naturaleza de baja potencia y bajo rendimiento de los dispositivos IoT convencionalmente desplegados ha provocado que estas bandas de alta frecuencia, con propiedades de propagación considerablemente más severas, sean en gran medida ignoradas al construir entornos IoT. No obstante, la aparición de aplicaciones masivas de IoT que generan un gran volumen de dispositivos pone presión en las tecnologías de banda sub-6GHz de baja capacidad y plantea mmWave como una solución candidata para escenarios casi nómadas, como redes eléctricas inteligentes, ciudades e industrias inteligentes². El principal desafío, en este caso, es que los transeceptores mmWave generalmente emplean formación de haz digital o híbrida, con múltiples cadenas RF y un gran número de matrices de antenas que permiten enfocar la energía electromagnética en ciertos ángulos (es decir, irradiar haces), para combatir la acuafofia y la alta atenuación de mmWave.

Sin embargo, esta estrategia está condenada al fracaso para los dispositivos IoT con restricciones energéticas, ya que integrar múltiples componentes activos que consumen energía se vuelve inviable³. Ante este desafío, *las RISs pueden ser la clave para aprovechar adecuadamente el uso de mmWave con sus vastos recursos de ancho de banda, al mismo tiempo que permiten escenarios avanzados de IoT masivo con una probabilidad significativamente baja de interrupción del servicio*⁴.

¹ S. Buzzi, C.-L. I, T. E. Klein, H. V. Poor, C. Yang, and A. Zappone, "A survey of energy-efficient techniques for 5G networks and challenges ahead," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 697–709, Apr. 2016

² B. P. S. Sahoo, C.-C. Chou, C.-W. Weng, and H.-Y. Wei, "Enabling millimeter-wave 5G networks for massive IoT applications: A closer look at the issues impacting millimeter-waves in consumer devices under the 5G framework," *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 49–54, Jan. 2019

³ O. Y. Kolawole, S. Biswas, K. Singh, and T. Ratnarajah, "Transceiver design for energy-efficiency maximization in mmWave MIMO IoT networks," *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 4, no. 1, pp. 109–123, Mar. 2020

⁴ M. Di Renzo et al., "Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and road ahead," 2020, arXiv:2004.09352. [Online]. Available: [HTTP://ARXIV.org/abs/2004.09352](http://arxiv.org/abs/2004.09352)

En efecto, las RISs, que aplican transformaciones controlables a las ondas de radio incidentes sin depender de amplificadores de potencia, crean una gran cantidad de oportunidades para la optimización de sistemas inalámbricos a bajo coste y con una huella energética reducida⁵. De hecho, están ganando mucho impulso^{6,7,8} debido a su capacidad para convertir la naturaleza estocástica del entorno inalámbrico —fundamentalmente pasivo— en un canal programable que desempeña un papel activo en la forma en que las señales se propagan. Recientemente se ha propuesto el uso de las RISs para una amplia variedad de aplicaciones, que van desde comunicaciones seguras⁹, acceso múltiple no ortogonal¹⁰, cálculo en el aire (over-the-air-computation)¹¹ o redes móviles eficientes en términos energéticos¹².

Una RIS es esencialmente una meta-superficie continua que puede modelarse como una rejilla de celdas unitarias discretas espaciadas a una distancia inferior a la longitud de onda, que pueden alterar su respuesta electromagnética, como la fase, la amplitud, la polarización y la frecuencia de manera programable. Por ejemplo, se pueden sintonizar de tal manera que las señales que rebotan en una RIS se combinen constructivamente para aumentar la calidad de la señal en el receptor pertinente o de manera destructiva para evitar que las señales se filtren a receptores no deseados.

2.2. RISs vs. repetidores y MIMO

Conceptualmente, una RIS puede recordar a algunos de los desafíos detrás de los métodos convencionales de retransmisión de Amplificar y Reenviar¹³ (AF, por sus siglas en inglés) y los métodos de formación de haces utilizados en MIMO¹⁴ (massive MIMO, en el caso de grandes cantidades de antenas). Existe una diferencia marcada entre los repetidores AF convencionales y las

⁵ M. D. Renzo et al., “Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: An idea whose time has come,” EURASIP J. Wireless Commun. Netw., vol. 2019, no. 1, pp. 1–20, May 2019

⁶ C. Huang, A. Zappone, G. C. Alexandropoulos, M. Debbah, and C. Yuen, “Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 18, no. 8, pp. 4157–4170, Aug. 2019

⁷ S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors, “Beyond massive MIMO: The potential of positioning with large intelligent surfaces,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 66, no. 7, pp. 1761–1774, Apr. 2018.

⁸ E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, and R. Zhang, “Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces,” IEEE Access, vol. 7, pp. 116753–116773, 2019.

⁹ M. Cui, G. Zhang, and R. Zhang, “Secure wireless communication via intelligent reflecting surface,” in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), Waikoloa, HI, USA, Dec. 2019

¹⁰ M. Fu, Y. Zhou, and Y. Shi, “Intelligent reflecting surface for downlink non-orthogonal multiple access networks,” in Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Dec. 2019, pp. 1–6

¹¹ T. Jiang and Y. Shi, “Over-the-air computation via intelligent reflecting surfaces,” in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), Dec. 2019, pp. 1–6

¹² C. Huang, G. C. Alexandropoulos, A. Zappone, M. Debbah, and C. Yuen, “Energy efficient multi-user MISO communication using low resolution large intelligent surfaces,” in Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Dec. 2018, pp. 1–6

¹³ M. Di Renzo et al., “Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison,” 2019, arXiv:1908.08747. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1908.08747>

¹⁴ E. Bjornson and L. Sanguinetti, “Demystifying the power scaling law of intelligent reflecting surfaces and metasurfaces,” in Proc. IEEE 8th Int. Workshop Comput. Adv. Multi-Sensor Adapt. Process. (CAMSAP), Dec. 2019, pp. 549–553

RISs¹⁵. De hecho, los primeros dependen de amplificadores de potencia de bajo ruido activos (que consumen energía) y otros componentes electrónicos activos, como convertidores digital-analógico (DAC) o analógico-digital (ADC), mezcladores y filtros. En contraste, las RISs tienen una huella de hardware muy baja, consistiendo en una sola o unas pocas capas de estructuras planas que pueden construirse utilizando métodos de litografía o nanoimpresión. En consecuencia, las RISs resultan ser particularmente atractivas para su integración perfecta en paredes, techos, carcasas de objetos, cristales de edificios o incluso ropa¹⁶.

Por otro lado, el MIMO (masivo) emplea un gran número de antenas para lograr grandes ganancias con estrategias de formación de haces (beamforming, en inglés). De hecho, bajo condiciones similares, tanto la tecnología MIMO masivo como las RIS pueden producir ganancias similares en la relación señal-ruido (SNR).¹⁷ Sin embargo, una RIS logra estas ganancias de formación de haces de manera pasiva, con un consumo de energía insignificante, lo que resulta en una alta eficiencia energética. En este trabajo sostenemos que *la formación de haces activa mediante un conjunto de antenas en el lado del transmisor y la formación de haces pasiva en el canal a través de una RIS pueden complementarse entre sí y proporcionar ganancias aún mayores cuando ambas se optimizan conjuntamente*, que es precisamente el objetivo de este proyecto. Con este fin, y en marcado contraste con trabajos anteriores^{18,19,20}, utilizamos el SMSE recibido como objetivo de optimización, lo que nos permite encontrar soluciones simples y eficientes para el problema en cuestión.

Mientras que el modelado teórico de las redes inalámbricas asistidas por RIS está bien estudiado, todavía hay muchos desafíos abiertos que deben abordarse, como la construcción de bancos de pruebas para la validación experimental^{21,22}, la tarea de estimar el canal combinado desde la BS hasta la RIS y hacia la unidad del UE²³, y la optimización conjunta de los parámetros de la BS multi-

¹⁵ K. Ntontin, J. Song, and M. Di Renzo, "Multi-antenna relaying and reconfigurable intelligent surfaces: End-to-end SNR and achievable rate," 2019, arXiv:1908.07967. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1908.07967>

¹⁶ O. P. Falade et al., "Design and characterisation of a screen-printed millimetre-wave flexible metasurface using copper ink for communication applications," *Flexible Printed Electron.*, vol. 3, no. 4, Dec. 2018, Art. no. 045005.

¹⁷ Aunque se ha demostrado que la SNR escala linealmente con el número de antenas M cuando se utiliza MIMO masivo y proporcional al cuadrado del número de elementos de antena equivalentes N^2 con la tecnología RIS, la falta de amplificación de potencia en esta última determina una pérdida de rendimiento tal que, en general, ambas tecnologías producen ganancias de SNR muy similares bajo las mismas condiciones.

¹⁸ X. Yu, D. Xu, and R. Schober, "MISO wireless communication systems via intelligent reflecting surfaces: (Invited paper)," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Shanghai, China, May 2019.

¹⁹ Q.-U.-U. Nadeem, A. Kammoun, A. Chaaban, M. Debbah, and M.-S. Alouini, "Asymptotic max-min SINR analysis of reconfigurable intelligent surface assisted MISO systems," 2019, arXiv:1903.08127. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1903.08127>

²⁰ Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: Joint active and passive beamforming design," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 11, pp. 5394–5409, Aug. 2019.

²¹ W. Tang et al., "Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter," *Electron. Lett.*, vol. 55, no. 7, pp. 417–420, Apr. 2019

²² V. Arun and H. Balakrishnan, "RFocus: Practical beamforming for small devices," in *Proc. 17th USENIX Symp. Netw. Syst. Des. Implement. (NSDI)*, 2020, pp. 1–17.

²³ Z.-Q. He and X. Yuan, "Cascaded channel estimation for large intelligent metasurface assisted massive MIMO," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 210–214, Feb. 2020

antena y la RIS²⁴. Particularmente relevante para este trabajo es esta última categoría, que se refiere a la optimización conjunta de la formación de haces activa en la BS y la formación de haces pasiva en la RIS. Yu et al.²⁵ analizan un caso de UE único y proponen maximizar la tasa de transmisión. El problema de optimización no convexo resultante se resuelve mediante iteración de punto fijo y optimización de variedades. Un entorno similar es analizado por Mishra et al.²⁶, que proponen una solución heurística para la maximización no convexa de la potencia de señal recibida con un rendimiento similar a la relajación semidefinida convencional (SDR). Karasik et al.²⁷ también estudian el escenario de UE único y proponen codificar información tanto en la señal transmitida como en la configuración de la RIS. Nadeem et al.²⁸ analizan el entorno multiusuario y proponen maximizar el SNR de recepción mínima entre todas las UEs en el régimen de sistema grande. Si bien este enfoque garantiza la equidad entre las UEs, es posible que no maximice la tasa de transmisión agregada del sistema. Wu et al.²⁹ diseñan conjuntamente la formación de haces en el lado de la BS y los parámetros de la RIS minimizando la potencia total de transmisión en la BS, dada una exigencia mínima de relación señal a interferencia más ruido (SINR, por sus siglas en inglés). Este marco se extendió más tarde para considerar RISs de baja resolución en un escenario de UE único³⁰.

2.3. Contribuciones en el contexto de esta actividad

La principal novedad de nuestro trabajo en esta actividad, que se desarrollará en el contexto de este entregable y el siguiente, surge de la explotación del SMSE como objetivo de optimización.

La elección de una función objetivo es de suma importancia, especialmente para escenarios de acceso masivo. Nuestra función objetivo se elige intencionadamente de manera que podamos derivar un mecanismo que proporcione soluciones de alto rendimiento mientras garantiza eficiencia y escalabilidad. Curiosamente, dicha métrica, que hasta ahora no se ha estudiado en el contexto de las redes asistidas por RIS, revela una estructura convexa en las dos variables de optimización por separado, a saber, la estrategia de pre-codificación en el transmisor y los parámetros de la RIS. Esto nos da una ventaja sobre trabajos anteriores porque permite diseñar algoritmos iterativos muy eficientes para el control de la RIS.

²⁴ C. Huang, R. Mo, C. Yuen, and S. Member, "Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MISO systems exploiting deep reinforcement learning," 2020, arXiv:2002.10072. [Online]. Available: [HTTP://ARXIV.ORG/abs/2002.10072](http://arxiv.org/abs/2002.10072)

²⁵ X. Yu, D. Xu, and R. Schober, "MISO wireless communication systems via intelligent reflecting surfaces: (Invited paper)," in Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC), Shanghai, China, May 2019.

²⁶ D. Mishra and H. Johansson, "Channel estimation and low-complexity beamforming design for passive intelligent surface assisted MISO wireless energy transfer," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP), May 2019, pp. 4659–4663.

²⁷ R. Karasik, O. Simeone, M. Di Renzo, and S. Shamai, "Beyond max-SNR: Joint encoding for reconfigurable intelligent surfaces," 2019, arXiv:1911.09443. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1911.09443>

²⁸ Q.-U.-U. Nadeem, A. Kammoun, A. Chaaban, M. Debbah, and M.-S. Alouini, "Asymptotic max-min SINR analysis of reconfigurable intelligent surface assisted MISO systems," 2019, arXiv:1903.08127. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1903.08127>

²⁹ Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: Joint active and passive beamforming design," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 18, no. 11, pp. 5394–5409, Aug. 2019.

³⁰ Q. Wu and R. Zhang, Beamforming Optimization for Intelligent Reflecting Surface with Discrete Phase Shifts. Brighton, U.K., May 2019

Específicamente, en esta actividad desarrollamos RISMA, un algoritmo de optimización alternante asistido por RIS que optimiza conjuntamente la estrategia de formación de haces en el transmisor (una BS) y los parámetros de la RIS para proporcionar conectividad de bajo coste y alto ancho de banda en escenarios de IoT masivo. El objetivo de RISMA es la optimización de sistemas con un único usuario (desarrollado en este entregable) y también entornos multi-usuario (que se desarrollará en un entregable posterior). En marcado contraste con trabajos anteriores, RISMA explota la naturaleza convexa del problema en cuestión en las dos variables de optimización por separado para garantizar escalabilidad, eficiencia y convergencia demostrable en el diseño sin la necesidad de establecer ningún parámetro del sistema.

Además, adaptamos RISMA, que proporciona una solución desde una perspectiva teórica, para acomodar restricciones prácticas al usar RISs de baja resolución que están compuestas por elementos de antena que pueden activarse de manera binaria. De esta manera, estas son meta-superficies que sólo admiten valores de desplazamiento de fase de un conjunto discreto, en lugar de cualquier valor real de un rango, y complican aún más nuestro problema.³¹

Para abordar este escenario, proponemos Lo-RISMA, que desacopla la optimización de los coeficientes de activación binaria y los desplazamientos de fase cuantizados. Los primeros se optimizan mediante SDR, mientras que los segundos se proyectan en el espacio cuantizado. A diferencia de otros trabajos anteriores que consideran RISs de baja resolución^{32,33}, Lo-RISMA se beneficiará de las propiedades clave de la métrica SMSE elegida. Específicamente, para cada iteración del algoritmo propuesto para una configuración RIS fija, se encuentra la estrategia de precodificación mediante una solución cerrada simple. Mientras que, una vez que la estrategia de precodificación está fija, el problema de encontrar los parámetros de la RIS se puede resolver eficientemente mediante SDR.

3 DISEÑO DEL MODELO

3.1. Notación

A lo largo de esta actividad, utilizamos letras en cursiva para denotar escalares, mientras que los vectores y matrices se denotan mediante letras en negrita minúsculas y mayúsculas, respectivamente. Dejamos que \mathbb{C} , \mathbb{R} y \mathbb{Z} denoten los conjuntos de números complejos, reales y enteros, respectivamente. Usamos \mathbb{C}^n y $\mathbb{C}^{n \times m}$ para representar los conjuntos de vectores complejos de n dimensiones y matrices complejas de tamaño $m \times n$, respectivamente. Por defecto, los vectores se denotan como vectores columna. Los subíndices representan un elemento en un vector y los superíndices elementos en una secuencia. Por ejemplo, $\mathbf{X}^{(t)} = [x_1^{(t)}, \dots, x_n^{(t)}]^T$ es un vector de \mathbb{C}^n , y $x_i^{(t)}$ es su i -ésimo componente. La operación $(\cdot)^T$ representa el operador de transposición, \otimes

³¹ R. Mendez-Rial, C. Rusu, N. Gonzalez-Prelcic, A. Alkhateeb, and R. W. Heath, "Hybrid MIMO architectures for millimeter wave communications: Phase shifters or switches?" IEEE Access, vol. 4, pp. 247–267, Jan. 2016

³² Q. Wu and R. Zhang, Beamforming Optimization for Intelligent Reflecting Surface with Discrete Phase Shifts. Brighton, U.K., May 2019

³³ B. Di, H. Zhang, L. Li, L. Song, Y. Li, and Z. Han, "Practical hybrid beamforming with finite-resolution phase shifters for reconfigurable intelligent surface based multi-user communications," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 69, no. 4, pp. 4565–4570, Apr. 2020.

representa el producto Kronecker mientras que $(\cdot)^H$ denota la operación de transposición Hermitiana. Finalmente, $\|\cdot\|$ y $\|\cdot\|_F$ denotan la norma L2 de un vector y la norma de Frobenio de una matriz, respectivamente.



Figura 1: Escenario de acceso masivo a recursos de radiofrecuencia superando problemas NLOS mediante el uso de RISs instaladas en los cristales de los edificios. Podría soportar diferentes casos de uso, como gafas de realidad aumentada (AR), e-salud, videovigilancia e IoT industrial.

3.2. Modelo

Consideremos el escenario descrito en la en la Figura 1 en el que una BS equipada con M antenas sirve a un conjunto de K nodos de UEs con una sola antena. Sin embargo, hay que destacar que el método propuesto no se limita a tal caso. Al considerar UEs con múltiples antenas, nuestro modelo se puede aplicar fácilmente permitiendo que cada UE active la antena con la mayor ganancia media de potencia del canal.

La conexión se establece con la ayuda de un conjunto de RISs instaladas en los vidrios de los edificios, cada una de las cuales consta de N elementos de antena equivalentes. Enfocándonos en la transmisión de datos en el enlace descendente, la BS se comunica con cada UE k a través de un enlace directo denotado por $\mathbf{h}_{d,k} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$, que consta de una trayectoria de línea de vista (LoS, por sus siglas en inglés) de longitud d_k y un ángulo de partida (*Angle of Departure*, o AoD, en inglés) θ_k cuando este último existe, además de un enlace de trayectoria múltiple sin línea de vista (NLoS, por sus siglas en inglés).

Adicionalmente, la BS puede aprovechar un enlace combinado de la BS al RIS denotado por $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times M}$, que a su vez refleja la señal entrante hacia el UE a través del canal $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$. Este último se

descompone en la trayectoria LoS BS-RIS de longitud $d_{1,k}$ y con AoD desde la BS y ángulo de llegada (Angle of Arrival, o AoA, en inglés) en el RIS denotados por ψ_D y ψ_A , respectivamente, más un conjunto de trayectorias NLoS dispersas y el enlace RIS-UE k que consta de una trayectoria LoS de longitud $d_{2,k}$ y AoD ψ_k cuando está disponible, más un enlace de trayectoria múltiple NLoS. Por último, debido a la alta pérdida de trayectoria, despreciamos todas las señales reflejadas dos veces o más por el RIS, como se ha hecho en trabajos previos^{34,35,36}.

Todos los canales siguen un modelo de desvanecimiento plano cuasiestático y, por lo tanto, permanecen constantes durante el tiempo de transmisión de una palabra de código. Además, suponemos que la información perfecta del estado del canal (CSI, por sus siglas en inglés) está disponible en la BS, es decir, esta última conoce $\{\mathbf{h}_{d,k}\}_{k=1}^K$, \mathbf{G} y $\{\mathbf{h}_k\}_{k=1}^K$. La BS opera en modo de dúplex por división de tiempo, de manera que los canales de subida y bajada son recíprocos. El canal físico de bajada, por lo tanto, se puede estimar a través del entrenamiento de subida desde los UEs a través de un canal de control separado³⁷.

Aunque nos centramos en la transmisión de datos en enlace descendente, nuestro marco propuesto podría extenderse de manera sencilla a la dirección de enlace ascendente considerando múltiples UEs y una única BS. Cada UE k recibe la suma de dos contribuciones, a saber, una trayectoria directa desde la BS y una trayectoria adecuadamente reflejada sobre el RIS. Por lo tanto, la señal recibida en el UE k se da por:

$$\begin{aligned} y_k &= (\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{W} \mathbf{s} + n_k \in \mathbb{C} \\ &= (\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_k s_k + \sum_{j \neq k} (\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_j s_j + n_k, \\ y_k &= (\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{W} \mathbf{s} + n_k \in \mathbb{C} \\ &= (\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_k s_k \\ &\quad + \sum_{j \neq k} (\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_j s_j + n_k, \end{aligned}$$

donde $\Phi = \text{diag}[\alpha_1 e^{j\phi_1}, \dots, \alpha_N e^{j\phi_N}]$ con $\phi_i \in [0, 2\pi)$ y $|\alpha_i|^2 \leq 1$, $\forall i$ representa los desplazamientos de fase y la atenuación de amplitud introducidos por el RIS³⁸, $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K] \in \mathbb{C}^{M \times K}$ es el pre-codificador de transmisión, $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ es el vector de símbolos de transmisión con $\mathbb{E}[|s_k|^2] = 1$, $\forall k$, y n_k es el término de ruido distribuido como $\mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$.

³⁴ S. Zhang and R. Zhang, "Capacity characterization for intelligent reflecting surface aided MIMO communication," 2019, arXiv:1910.01573. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1910.01573>

³⁵ Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: Joint active and passive beamforming design," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 18, no. 11, pp. 5394–5409, Aug. 2019.

³⁶ D. Mishra and H. Johansson, "Channel estimation and low-complexity beamforming design for passive intelligent surface assisted MISO wireless energy transfer," in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech Signal Process. (ICASSP), May 2019, pp. 4659–4663

³⁷ Cuando se trata de información de canal sesgada, se requiere un proceso de estimación del canal. Sin embargo, tal desafío en redes asistidas por RIS ya ha sido explorado y, por lo tanto, está fuera del alcance de este trabajo.

³⁸ E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, and R. Zhang, "Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces," IEEE Access, vol. 7, pp. 116753–116773, 2019

Por lo tanto, suponiendo una decodificación de un solo usuario en el lado del receptor, la tasa de transmisión agregada del sistema se puede definir como sigue:

$$R \triangleq \sum_k \log_2 \left(1 + \frac{|(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j \neq k} |(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_n^2} \right).$$

3.3. Formulación del problema

Nuestro objetivo es optimizar el rendimiento global del sistema de la red asistida por RIS considerada en términos de tasa de transmisión agregada del sistema, según se define en la ecuación anterior.

En particular, dada la complejidad de tratar tal expresión, proponemos optimizar conjuntamente la estrategia de pre-codificación en la BS y las reflexiones (como un parámetro ajustable) introducidas por el RIS minimizando el SMSE sobre todos los UEs conectados, que se sabe que está relacionado con la tasa de transmisión agregada³⁹. En particular, para una configuración dada del RIS, el sistema considerado en el enlace descendente es un canal de difusión y se mantiene la dualidad entre el canal de difusión y el canal de acceso múltiple en el enlace ascendente. En el canal de acceso múltiple dual, la relación clásica entre el error cuadrático medio mínimo (MSE) del UE k y la relación señal a interferencia más ruido máxima (SINR) del UE k se mantiene para filtros lineales⁴⁰. Por lo tanto, esto nos motiva a estudiar el SMSE como un medio para optimizar la tasa de transmisión agregada del sistema en el enlace descendente.

El MSE recibido del UE k se da por:

$$\begin{aligned} \text{MSE}_k &= \mathbb{E}[|y_k - s_k|^2] \\ &= |(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_k - 1|^2 + \sum_{j \neq k} |(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_n^2 \\ &= \sum_j |(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_j|^2 - 2 \text{Re}\{(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_k\} + 1 + \sigma_n^2. \end{aligned}$$

El SMSE sobre todos los UEs se expresa, por lo tanto, como:

$$\begin{aligned} \text{SMSE} &= \sum_k \text{MSE}_k \\ &= \sum_k \sum_j |(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_j|^2 - 2 \sum_k \text{Re}\{(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_k\} + K(1 + \sigma_n^2). \end{aligned}$$

Para facilitar la presentación, definamos

$$\mathbf{v} = [\alpha_1 e^{-j\phi_1}, \dots, \alpha_N e^{-j\phi_N}, 1]^T \in \mathbb{C}^{N+1 \times 1},$$

y

$$\bar{\mathbf{H}}_k \triangleq \begin{bmatrix} \text{diag}(\mathbf{h}_k^H) \mathbf{G} \\ \mathbf{h}_{d,k}^H \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{N+1 \times M},$$

³⁹ S. S. Christensen, R. Agarwal, E. De Carvalho, and J. M. Cioffi, "Weighted sum-rate maximization using weighted MMSE for MIMO-BC beamforming design," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, no. 12, pp. 4792–4799, Dec. 2008

⁴⁰ R. Hunger, M. Joham, and W. Utschick, "On the MSE-duality of the broadcast channel and the multiple access channel," IEEE Trans. Signal Process., vol. 57, no. 2, pp. 698–713, Feb. 2009

Tal que $\Phi = \text{diag}(\mathbf{v}[1:N]^H) \mathbf{y}^{41}$

$$(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_j = \mathbf{v}^H \bar{\mathbf{H}}_k \mathbf{w}_j \quad \forall k, j.$$

Entonces, nuestro problema de optimización se puede formular de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{v}, \mathbf{W}}{\text{minimizar}} && \sum_k \sum_j |\mathbf{v}^H \bar{\mathbf{H}}_k \mathbf{w}_j|^2 - 2 \sum_k \text{Re} \{ \mathbf{v}^H \bar{\mathbf{H}}_k \mathbf{w}_k \} \\ & \text{sujeto a} && |v_i|^2 \leq 1, \quad i = 1, \dots, N; \\ & && v_{N+1} = 1; \\ & && \|\mathbf{W}\|_F^2 \leq P; \end{aligned}$$

Ecuación 1. Formulación del problema RIS.

Con \mathbf{v} definido más arriba y P la potencia de transmisión disponible en la BS. Notamos que la restricción $|v_i|^2 \leq 1$ asegura que el i -ésimo elemento de RIS no amplifica la señal entrante, garantizando así una estructura pasiva en general. Observamos que, a diferencia de trabajos anteriores sobre optimización de formación de haces en redes asistidas por RIS, nuestro marco propuesto tiene la ventaja clave de ser convexo en las dos variables de optimización \mathbf{v} y \mathbf{W} de forma separada. Esto nos permite encontrar soluciones simples y eficientes al problema en cuestión. Además, gracias a esta propiedad clave antes mencionada, el uso de optimización alternante entre las dos variables de optimización \mathbf{v} y \mathbf{W} nos permite garantizar la convergencia a un punto crítico del problema, es decir, un punto que satisface las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) del problema⁴². Notamos que, dada la naturaleza no convexa del problema, las condiciones KKT son condiciones necesarias pero no suficientes para la optimalidad.

En el contexto de esta actividad, examinaremos profundamente nuestro problema para dos casos principales de uso: i) receptor UE único y ii) receptor multiusuario. En este entregable, nos centraremos en el primer caso de uso.

4 CASO DE USO 1: USUARIO ÚNICO

Para explotar por separado la convexidad en \mathbf{v} y \mathbf{W} de nuestra función objetivo en la Ecuación 1, dejamos que los parámetros del RIS en \mathbf{v} se fijen de tal manera que primero podamos enfocarnos en encontrar la estrategia de pre-codificación \mathbf{W} .

Dado que la CSI perfecta está disponible en la BS, cuando \mathbf{v} está fijo, se sabe que el vector de pre-codificación óptimo es el que está adaptado al canal (aquí, efectivo) entre la BS y el UE, maximizando la SNR recibida, que se da por transmisión de máxima relación (MRT, por sus siglas en inglés), es decir,

$$\mathbf{w}_{\text{MRT}} = \sqrt{P} \frac{\mathbf{G}^H \Phi^H \mathbf{h} + \mathbf{h}_d}{\|\mathbf{G}^H \Phi^H \mathbf{h} + \mathbf{h}_d\|}.$$

⁴¹ Note que el último elemento de \mathbf{v} se introduce para obtener una expresión más compacta de nuestros problemas de optimización.

⁴² L. Grippo and M. Sciandrone, "On the convergence of the block nonlinear Gauss–Seidel method under convex constraints," *Oper. Res. Lett.*, vol. 26, no. 3, pp. 127–136, Apr. 2000

Entonces, una vez que se obtiene la estrategia de pre-codificación, el problema se reduce a la optimización de los parámetros de configuración del RIS en Φ . Consideremos el MSE recibido después de la pre-codificación MRT como:

$$\text{MSE}_{\text{MRT}} = \mathbb{E}[|y - s|^2],$$

Donde la expectativa está sobre el símbolo s y el ruido n , que se suponen independientes. Por tanto, queda de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{MSE}_{\text{MRT}} &= \mathbb{E}[|(\mathbf{h}^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H) \mathbf{w}_{\text{MRT}} - 1|s + n|^2] \\ &= P \|\mathbf{h}^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H\|^2 - 2\sqrt{P} \|\mathbf{h}^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H\| + 1 + \sigma_n^2. \end{aligned}$$

En la Ecuación 2 formulamos el siguiente problema de optimización.

$$\begin{aligned} \underset{\Phi}{\text{minimize}} \quad & \|\mathbf{h}^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H\|^2 - 2\frac{\sqrt{P}}{P} \|\mathbf{h}^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{h}_d^H\| \\ \text{subject to} \quad & |[\Phi]_{ii}|^2 \leq 1 \quad \forall i \\ & [\Phi]_{ij} = 0 \quad \forall i \neq j. \end{aligned}$$

Ecuación 2. Problema de optimización RIS P1. Usuario único.

Replanteamos este último como un problema de optimización en la Ecuación 3.

$$\begin{aligned} \underset{\mathbf{v}}{\text{minimize}} \quad & \|\mathbf{v}^H \bar{\mathbf{H}}\|^2 - 2\frac{\sqrt{P}}{P} \|\mathbf{v}^H \bar{\mathbf{H}}\| \\ \text{subject to} \quad & |v_i|^2 \leq 1, \quad i = 1, \dots, N; \\ & v_{N+1} = 1. \end{aligned}$$

Ecuación 3. Problema de optimización RIS P2. Usuario único

Nótese que el problema P2 es no convexo en \mathbf{v} , pero puede ser resuelto eficientemente mediante programación convexo-cóncava, ya que es una suma de una función convexa, es decir, el término de norma al cuadrado, menos una segunda función convexa, es decir, el término de norma.

Un enfoque alternativo pero más simple define $\mathbf{V} = \mathbf{v}\mathbf{v}^H$ y resuelve el problema de optimización planteado en la Ecuación 4.

$$\begin{aligned} \underset{\mathbf{v}, \mathbf{V} \succeq \mathbf{0}}{\text{minimize}} \quad & \text{tr}(\bar{\mathbf{H}}\bar{\mathbf{H}}^H\mathbf{V}) - 2\frac{\sqrt{P}}{P} \sqrt{\text{tr}(\bar{\mathbf{H}}\bar{\mathbf{H}}^H\mathbf{V})} \\ \text{subject to} \quad & [\mathbf{V}]_{ii} \leq 1, \quad i = 1, \dots, N; \\ & [\mathbf{V}]_{N+1, N+1} = 1, v_{N+1} = 1; \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{V} & \mathbf{v} \\ \mathbf{v}^H & 1 \end{bmatrix} \succeq \mathbf{0}, \\ & \text{rank}(\mathbf{V}) = 1. \end{aligned}$$

Ecuación 4. Problema de optimización RIS P3. Usuario único

Cabe destacar que el problema P3 es no convexo en \mathbf{V} debido a la restricción de rango. Sin embargo, mediante la relajación semidefinida positiva, este último se puede convertir en un problema

convexo relajando la restricción de rango. El problema resultante puede entonces ser resuelto mediante programación semidefinida estándar, como, por ejemplo, CVX. Una solución aproximada al problema P3 puede obtenerse del problema convexo relajado mediante randomización gaussiana. Mientras que la optimalidad de la Randomización Gaussiana sólo está probada para una pequeña familia bien definida de problemas de optimización, garantiza una aproximación de $\frac{\pi}{4}$ del valor objetivo óptimo del problema original para un número suficientemente grande de randomizaciones.

Finalmente, nótese que los parámetros del RIS $\{\alpha_i\}_{i=1}^N$ y $\{\phi_i\}_{i=1}^N$ se pueden obtener estableciendo:

$$\begin{aligned}\alpha_i &= |v_i|, \quad y \\ \phi_i &= \arg(v_i^*), \quad i = 1, \dots, N.\end{aligned}$$

En sistemas prácticos, es difícil controlar exactamente el estado de cada elemento reflectante, ya que este control se implementa mediante variaciones sensibles de la impedancia equivalente de cada celda reflectante. Por lo tanto, no es práctico permitir cualquier estado posible para los coeficientes de absorción $\{\alpha_i\}_{i=1}^N$ y la fase de reflexión $\{\phi_i\}_{i=1}^N$ del i -ésimo elemento reflectante. En este sentido, proponemos una extensión del método anterior, denominado Lo-RISMA, que desacopla la optimización de $\{\alpha_i\}_{i=1}^N$ y $\{\phi_i\}_{i=1}^N$ para incluir restricciones de implementación prácticas, a saber, cada elemento reflectante se activa de manera binaria y cada cambio de fase puede variar en un conjunto dado de valores discretos.

Comenzamos tratando la suposición de activación binaria. Es decir, cada elemento reflectante solo puede tener uno de dos estados, es decir, $\alpha_i \in \{0,1\} \forall i$.

En el escenario de UE único considerado, la maximización de la tasa de transmisión agregada es equivalente a la minimización del MSE recibido o maximización del SNR recibido. Definimos el canal efectivo como

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \text{diag}(\mathbf{h}^H) \bar{\Phi} \mathbf{G} \\ \mathbf{h}_d^H \end{bmatrix} \in \mathbb{C}^{N+1 \times M},$$

con $\bar{\Phi} \triangleq \text{diag}[e^{j\phi_1}, \dots, e^{j\phi_N}]$ y el vector binario $\mathbf{b} \in \{0,1\}^{N+1}$, donde cada b_i indica si el elemento reflectante correspondiente está activo o no. Por lo tanto, tenemos que $\alpha_i = b_i \quad i = 1, \dots, N$ y $\Phi = \text{diag}(b_1 e^{j\phi_1}, \dots, b_N e^{j\phi_N})$. El SNR recibido después de la pre-codificación MRT viene dado por

$$\text{SNR}_{\text{MRT}} = \frac{\|\mathbf{b}^T \tilde{\mathbf{H}}\|^2}{\sigma_n^2},$$

que claramente se maximiza cuando $\mathbf{b} = \mathbf{1}$.

Consideremos ahora el caso en que las fases $\{\phi_i\}_{i=1}^N$ están cuantizadas con un número dado de bits. El conjunto factible ideal $[0, 2\pi)$ por lo tanto, se cuantiza en 2^b puntos discretos espaciados uniformemente como:

$$\phi_i \in \mathcal{Q} \triangleq \left\{ \frac{2\pi}{2^b} m \right\}_{m=0}^{2^b-1} \quad m \in \mathbb{Z}, \quad i = 1, \dots, N.$$

Para lograr tal cuantización, simplemente proyectamos los desplazamientos de fase obtenidos resolviendo los problemas P2 o P3 en el punto más cercano dentro de la constelación en \mathcal{Q} .

5 CONCLUSIONES

En redes asistidas por RIS, nuestro objetivo es optimizar la tasa de transmisión agregada minimizando el MSE entre la BS y los UEs. Se considera un precodificador en la BS y parámetros ajustables en el RIS. Con perfecta CSI, se propone en este documento una estrategia de precodificación adaptada al canal efectivo. Posteriormente, se optimizan los parámetros del RIS, teniendo en cuenta restricciones prácticas como la activación binaria de los elementos reflectantes y la cuantización de las fases. La optimización se maneja mediante programación convexa-concava y relajación semidefinida, lo que facilita la implementación y garantiza la convergencia hacia un punto crítico del problema.

En este entregable, se ha propuesto una solución para el primer caso de uso de esta actividad: redes asistidas por RIS con un único usuario. En el entregable posterior, se extenderá este caso de uso a otro con múltiples usuarios. Además, se evaluarán numéricamente los dos casos de uso y sus soluciones en un simulador realista.