



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

FORMACIÓN DE HAZ HÍBRIDO EN UN SISTEMA MIMO MASIVO

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Electrónico

AUTORES:

Dennis Paul Herrera Mendez

Leonel Adalberto Villagómez Álvarez

TUTORA:

Verónica Emma Soria Maldonado

Quito - Ecuador

2022

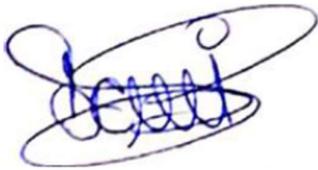
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Dennis Paul Herrera Mendez con documento de identificación N° 1721362570 y Leonel Adalberto Villagómez Álvarez con documento de identificación N° 1722127014; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 02 de marzo del año 2022

Atentamente,



Dennis Paul Herrera Mendez

1721362570



Leonel Adalberto Villagómez Álvarez

1722127014

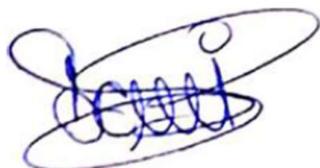
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Dennis Paul Herrera Mendez con documento de identificación No. 1721362570 y Leonel Adalberto Villagómez Álvarez con documento de identificación No. 1722127014, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico : “Formación de haz híbrido en un sistema MIMO masivo”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Electrónicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Quito, 02 de marzo del 2022

Atentamente,



Dennis Paul Herrera Mendez

1721362570



Leonel Adalberto Villagómez Álvarez

1722127014

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Verónica Emma Soria Maldonado con documento de identificación N° 1715185961, docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: FORMACIÓN DE HAZ HÍBRIDO EN UN SISTEMA MIMO MASIVO, realizado por Dennis Paul Herrera Mendez con documento de identificación N° 1721362570 y por Leonel Adalberto Villagómez Álvarez con documento de identificación N° 1722127014, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 02 de marzo del 2022

Atentamente,



Ing. Verónica Emma Soria Maldonado, Msc.

1715185961

FORMACIÓN DE HAZ HÍBRIDO EN UN SISTEMA MIMO MASIVO

Herrera Mendez Dennis Paul
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
dherreram3@est.ups.edu.ec

Villagómez Álvarez Leonel Adalberto
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
lvillagomez@est.ups.edu.ec

Soria Maldonado Verónica Emma
Departamento de Ingeniería
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Salesiana
Quito, Ecuador
vsoria@ups.edu.ec

Resumen— El presente artículo detalla el diseño y simulación de un sistema de formación de haz híbrido en un sistema MIMO masivo (multiple-input-multiple-output) esta tecnología tiene como objetivo principal generar una alta eficiencia espectral y evitar la pérdida de propagación en altas frecuencias, la cual se refleja en la capa física 5G. Al contrario de los sistemas MIMO convencionales, los flujos de datos se dispersan en diferentes direcciones provocando interferencia en el sistema y reduciendo la velocidad en la transmisión de información, donde el procesamiento de señales se lleva a cabo mediante una arquitectura digital o analógico que son diseñados mediante el algoritmo URA (Uniform Rectangular Array).

El procesamiento de señales híbridas analógico-digital o conocidas como Beamforming Híbrida tiene como característica principal disminuir el costo, el consumo de energía y reducir la interferencia. Se utiliza para la formación de haz, fundamentado en el algoritmo OMP (Orthogonal Matching Pursuit) en un sistema los dos usuarios tienen gran cantidad de antenas que son operadas por un número limitado de cadenas de radiofrecuencia tanto en el transmisor y receptor. Los resultados muestran la comparación del patrón de radiación de dos sistemas tanto convencional e híbrido tomando como referencia la eficiencia espectral como indicador de desempeño.

Palabras Clave— MIMO masivo, propagación Beamforming, patrón de radiación, HAD, URA, OMP, eficiencia.

Abstract— This paper details the design and simulation of a hybrid beamforming system in a massive MIMO (multiple-input-multiple-output) system. The main objective of this technology is to generate high spectral efficiency and avoid propagation loss at high frequencies, which is reflected in the 5G physical layer. Unlike conventional MIMO systems, data flows are dispersed in different directions causing interference in the system and reducing the speed of information transmission, where signal processing is carried out through a digital or analog architecture that are designed using the URA (Uniform Rectangular Array) algorithm.

The hybrid analog-digital signal processing or known as Hybrid Beamforming has as main characteristic to decrease the cost, power consumption and reduce interference. It is used for beamforming, based on the OMP (Orthogonal Matching Pursuit) algorithm in a system where the two users have a large number of antennas that are operated by a limited number of radio frequency chains in both the transmitter and receiver. The results show the comparison of the radiation pattern of two systems both conventional and

hybrid taking as reference the spectral efficiency as a performance indicator.

Keywords— Massive MIMO, Beamforming propagation, radiation pattern, HAD, URA, OMP, efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años los sistemas MIMO masivo se han ido desarrollando en beneficio de la tecnología 5G, la cual conlleva a tener un gran número de antenas en las estaciones base, lo que permite poseer mayor eficiencia espectral, energética [1] ayudando así a mejorar la conectividad inalámbrica, al aumentar la banda ancha móvil, la velocidad para satisfacer la demanda de servicios, de igual manera el incremento de dispositivos para cada usuario, genera la necesidad de tener mayor capacidad en las redes, sean fijas o inalámbricas, estableciendo una conectividad más segura con tiempos de latencia mejorados [2], sin embargo el implementar un sistema MIMO masivo produce complicaciones en varios factores como, el incremento de antenas innecesarias en los límites de transmisión y recepción, lo que genera un aumento en cuanto al costo, el consumo de energía y pérdidas de datos [3].

Es por ello que se requiere aplicar diferentes técnicas que ayuden a compensar estas pérdidas elevadas que se producen. Una de estas técnicas es Beamforming, mediante la cual se puede formar haces y apuntarlos en la dirección requerida lo que mejora la relación señal a ruido más interferencia (SINR) [4].

Beamforming se define como un tipo de técnica de filtrado espacial para explotar las propiedades espaciales de señales de múltiples sensores, en este artículo el término Beamforming se utiliza como una técnica tanto en el transmisor (Tx) como en el receptor (Rx) para incrementar la SNR recibida [5]. Beamforming tiene otra ventaja en las comunicaciones móviles y se trata de la precisión en la delimitación de la celda. Es decir, con Beamforming se va a poder ajustar el radio de cobertura de una forma más precisa que con un sistema SISO clásico que radie de forma isotrópica en toda la celda. De esta forma se consigue reducir la interferencia inter-célula y obtener una mayor eficiencia de la potencia radiada [6].

Este artículo está organizado en varias secciones, la primera sección consta de la introducción donde se ofrece una orientación de lo que se va a tratar el artículo. La segunda sección se define Beamformig y las diferentes arquitecturas que se pueden emplear para un sistema MIMO masivo. En la tercera sección se establecen los diferentes métodos que puede utilizar Beamforming con sus respectivas definiciones y

fórmulas que se aplican. La cuarta sección del artículo presenta el modelo del sistema y explica los algoritmos que se va a comparar, también se establece la notación matemática que se emplea en la simulación, de la misma manera el modelo del canal con el que se va a trabajar con sus respectivas fórmulas. La sección final muestra los resultados obtenidos en función de la eficiencia espectral y los patrones de radiación, así como su respectivo análisis y las conclusiones.

II. Beamforming

Es una técnica que se emplea en el procesamiento de señales para controlar el patrón de radiación de un arreglo de antenas, que permite el cambio de la forma del haz, aumentando la directividad de dicho arreglo de antenas al ubicarlo en una determinada dirección, minimizando la interferencia y reduciendo el ruido para el resto de las direcciones [7].

Arquitecturas de Beamforming.

Las arquitecturas que se proponen en este artículo representan una interesante solución para los sistemas MIMO masivo con el fin de reducir la dificultad en estos sistemas sin que afecte en su rendimiento.

Beamforming Analógico

En la Fig. 1 se muestra la estructura de un sistema analógico donde se modifica la señal, conectando cada cadena de RF con un grupo de antenas transmisoras, por lo general en esta clase de sistemas se controla la fase de la señal sin afectar la amplitud, el gran beneficio que se tiene en este sistema es que no requiere tanta potencia [8].

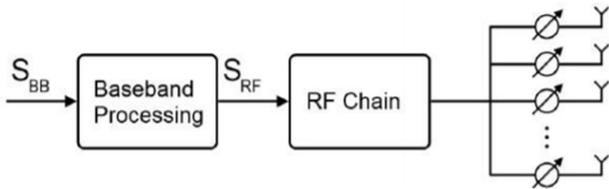


Fig. 1. Estructura general de Beamforming analógico.

Beamforming Digital

En la Fig. 2 se visualiza que este sistema permite una gran variedad de cambios en amplitud y fase estableciendo un mejor control de las entradas de los flujos de datos, el beneficio de Beamforming digital se ve reflejado en el hardware ya que la mayor parte de este procedimiento en la señal se realiza mediante el uso de matrices precodificadas y combinaciones calculadas en computadores [9].

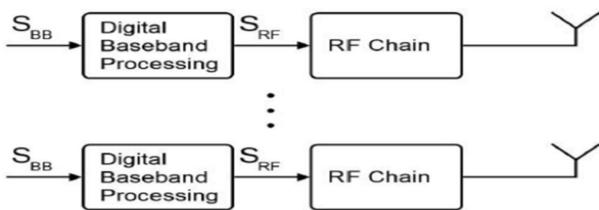


Fig. 2. Estructura general de Beamforming digital.

Beamforming Híbrido

Para la formación de haz híbrido (Beamforming), se combina la formación de haz analógico como se observa en la Fig. 3, para direccionar el haz con el sistema digital eliminando

las interferencias. Formando de una manera inteligente los patrones transmitidos mediante un arreglo de antenas [10].

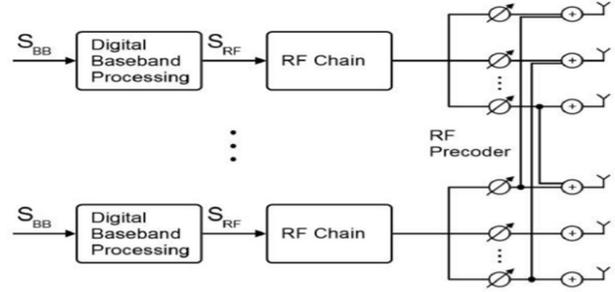


Fig. 3. Estructura general de Beamforming Híbrido.

III. Técnicas Beamforming Híbrido

Formación de haces híbrida basada en CSI (información del estado del canal) instantáneo

Se emplea el formador de haz analógico creando múltiples “sectores virtuales”, esto permite separar el procesamiento de banda base, entrenamiento de enlaces descendentes, retroalimentación de enlaces ascendentes, esto reduce la sobrecarga de señalización y la complejidad computacional. Para una estructura compleja, cada salida del precodificador analógico puede ser una combinación lineal de todas las señales de RF. Asumiendo una CSI instantánea en Tx, se torna complicado encontrar las matrices analógicas y digitales en la formación del haz que optimicen la velocidad de recepción de datos [11].

$$H = USV^* \quad (1)$$

Se utiliza para calcular la matriz del canal y los rayos dentro de cada grupo, donde H es la matriz del canal para CSI instantáneo, U es la matriz de orden unitaria $N_r \times N_r$, S es la matriz de valores singulares de orden $N_t \times N_t$ y V es una matriz de formación de haz digital pura que toma valores de la siguiente ecuación.

$$F_{opt}: F_{opt} = V(:, [1: N_s]) \quad (2)$$

Donde $F_{opt}: F_{opt}$ son los precodificadores del sistema de formación de haz en CSI, V es una matriz de formación de haz digital pura, N_s son los flujos de datos que tiene el sistema.

Formación de haces híbrida Basada en la CSI promediada

Se realiza estrategias de transmisión con CSI de dimensiones reducidas para moderar la sobrecarga de señalización, se propone un esquema denominado “multiplexación por división espacial conjunta” (JSDM), la interferencia entre grupos se suprime utilizando la representación karhunen-Loeve y el precodificador analógico (JSDM) [11].

$$\gamma = \sqrt{p} H F_{RF} F_{BB} s + n \quad (3)$$

Se utiliza para obtener los datos que se van a transmitir, donde γ es el vector de transmisión, p representa la potencia media recibida, H $c^{N_r \times N_t}$, es la matriz del canal para ondas milimétricas y mimo masivo y, $n \sim (0, \sigma^2 I_{N_r})$ es un vector de ruido blanco aditivo (AWNG).

Algoritmo URA (Uniform Rectangular Array)

Para analizar se escogió el algoritmo URA debido a la facilidad de despliegue de un gran número de antenas, éste se

caracteriza por tener una transmisión omnidireccional que construye una matriz de rango p para generar un patrón de radiación omnidireccional y se utiliza para una mayor eficiencia del amplificador de potencia.

Algoritmo OMP (Orthogonal Matching Pursuit)

Para un sistema de Beamforming Híbrido, el algoritmo OMP se utiliza y es sensible a los vectores de respuesta de la matriz. Este algoritmo posee unas reglas definidas de cálculo modificadas para que no seleccionen elementos que no tengan valor, con el fin de tener una representación excelente de las señales dispersas [11].

Sus principales propiedades son:

- Convergencia cuando el valor residual R_n tiende a 0 para cualquier señal f que se encuentre
- El error $\|R_n\|$ disminuye de forma autónoma.
- Su ecuación de conservación de energía es:

$$\|f\|^2 = \|R_{N+1}\|^2 + \sum_{n+1}^N |a_n|^2 \quad (8)$$

Donde a_n se denota como factor de ponderación escalar.

Formación de haces híbrida en banda ancha

Los sistemas de formación de haces en banda ancha se implementan bajo el algoritmo de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), este sistema tiene como objetivo facilitar a los operadores la entrega de servicios que trabajan con un gran ancho de banda para redes inalámbricas 5G, esta tecnología tiene un beneficio que es disminuir las interferencias en los enlaces ascendentes (uplink). De igual forma, ofrece un mayor alcance y capacidad para los enlaces descendentes (downlink), así como la eficiencia espectral [11]. La optimización que utiliza este sistema se representa en (4).

$$H = \sqrt{\frac{N_t N_R}{N_{sc} L}} \sum_{l=1}^L \sum_{r=1}^{N_{sc}} \alpha_{l,r} a_R(\theta_{l,r}) a_T^H(\phi_{l,r}) \quad (4)$$

Donde H es la matriz del canal, N_{sc} son los grupos de dispersión que cada l aporta números de propagación, L se define como longitud de onda $\alpha_{l,r} \in \mathbb{C}$ denota la ganancia compleja correspondiente a la trayectoria r -ésima en el clúster l -ésimo, que se supone que son variables aleatorias gaussianas independientes de $\mathbf{a}_R(\boldsymbol{\theta})$ y $\mathbf{a}_T^H(\boldsymbol{\phi})$ son los vectores de dirección donde $\boldsymbol{\theta}$ es el ángulo de inclinación en el receptor y $\boldsymbol{\phi}$ el ángulo de inclinación en el transmisor $N_R \times 1$ y $N_t \times 1$ que representan las respuestas del conjunto de antenas de recepción y de transmisión respectivamente [12].

IV. Modelo del sistema

El objetivo principal de este artículo consiste en comparar los algoritmos de formación de haz convencional e híbrido para determinar cuál es el más idóneo en la comunicación inalámbrica en un sistema MIMO masivo. Para lograr el objetivo se realizó simulaciones en el software Matlab usando distintos parámetros como, ángulo de apuntamiento hacia el receptor, cancelación de interferencia (MMSE) para determinar el número de iteraciones necesarias para encontrar los pesos óptimos de cada precodificador o combinador del array para la conformación del patrón de radiación. Concluyendo con el análisis de la gráfica de la eficiencia espectral vs SNR.

En la Fig.4 se observa el diagrama de bloques para un sistema de formación de haz convencional utilizando el URA este algoritmo se ha utilizado para estimar el patrón de radiación en la formación de haces convencionales, sin embargo, al implementar este tipo de sistemas los arreglos se encuentran descalibrados y los flujos de datos se dispersan en diferentes direcciones provocando interferencia en el sistema y reduciendo la velocidad en la transmisión de información, es por este motivo que se ha investigado varios métodos para mejorar la formación de haces, uno de estos métodos es mediante el algoritmo OMP que permite a los sistemas inalámbricos 5G la recuperación de datos con una elevada eficiencia y en un tiempo menor que los demás algoritmos, lo que mejorará el direccionamiento del espectro de radiación y reducirá la interferencia en el sistema. Adicional a esto los resultados obtenidos se mostrarán en la simulación. Por lo tanto, esta sección se enfoca principalmente en las técnicas de precodificación para mejorar la transmisión de datos en un sistema híbrido como se muestra en la fig. 8. [12].

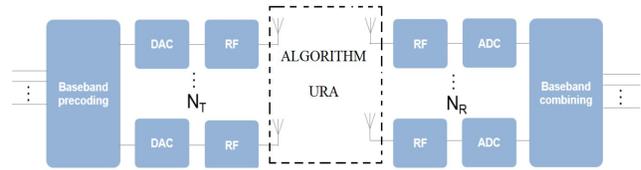


Fig. 4. Diagrama de bloques del modelo del canal MIMO MASIVO para sistemas Beamforming convencionales con algoritmo URA.

Para definir las antenas en transmisión y recepción se utilizó los parámetros $N_t = 64$ y $N_r = 16$, así como el canal que se utilizó se explicará en la sección B, la dispersión de los ángulos acimut y de elevación tanto en el transmisor y receptor se estableció $\sigma_\phi^t = \sigma_\theta^t = \sigma_\phi^r = \sigma_\theta^r = 5^\circ$. Suponiendo que la red de antenas transmisoras está ubicada en la estación base, el ancho del haz enfocado es de 60 grados en acimut y 20 grados en elevación. Se toman estos valores porque al momento de comparar en la gráfica de la eficiencia espectral vs SNR la señal es estable y es la que más se aproximan a los valores óptimos, si se cambian dichos ángulos por valores aleatorios los resultados en la gráfica se ven afectados ya que la señal se dispersa demasiado en relación con la señal óptima generando interferencia en la señal. Por otro lado, para el receptor se asume que el conjunto de antenas es más pequeño con un ángulo acimut de 180° y un ángulo de elevación de 90° para que la señal sea perpendicular, al momento de cambiar los ángulos por valores aleatorios, las señales se sobrepone con muchos desniveles creando interferencias y ruido en la señal de esa manera provoca que no se puedan tomar los valores necesarios para estimar resultados. El espacio entre los elementos del sistema d se deduce como $\lambda/2$ porque se hace relación como una antena dipolo. El patrón de radiación que se muestra en la Fig. 7 está realizado mediante una matriz de transmisión rectangular uniforme URA que se utiliza para los precodificadores convencionales óptimos, mientras que en la fig. 8 está realizado con el algoritmo OMP que muestra la formación de haz híbrida que tiene una gran similitud con la formación de haces digitales convencionales, es decir que los pesos digitales pueden transmitir con éxito los flujos de datos que se van a utilizar en pesos híbridos.

A. Modelo del sistema y notación.

Para analizar un sistema de Beamforming híbrido en MIMO masivo, usando uno y dos usuarios con el protocolo TDD (Time Division Duplex), se utiliza como método para la transmisión de datos que se realiza en ambas direcciones, tiene

un arreglo con una BS (Base Station) que se conecta con un UE (User Equipment), ambos abastecen una matriz rectangular uniforme (URA). En la Fig.5 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del programa realizado en el software en Matlab. Se tiene los parámetros de inicialización para definir el sistema con número de elementos $N_t \times N_t$ con flujo de datos $N_{RF}^t = N_{RF}^r$, la señal se modula mediante un conjunto de pesos de precodificación, se propaga a través del canal H y se recupera mediante un conjunto de pesos de combinación, posteriormente se precisan los ángulos azimut y de elevación $\sigma_\phi^t = \sigma_\theta^t = \sigma_\phi^r = \sigma_\theta^r$ tanto en el transmisor y el receptor, se calcula los rayos dentro de cada grupo, en esta sección es donde se calcula las matrices de los canales respectivamente para optimizar el precodificador y combinador del sistema, finalmente comparar la eficiencia espectral vs SNR.

En la Fig.4 se muestra el diagrama de bloques del algoritmo URA que denota una longitud de onda más pequeña visualizando un número menor de elementos para realizar una comunicación multistream, la BS con N_t antenas se provee con N_{RF}^t de cadenas de transmisión para transmitir N_s flujos de datos al receptor con N_r antenas equipadas con N_{RF}^r (como muestra la Fig. 6.) de tal manera $N_s \leq N_{RF}^t \leq N_t$ y $N_s \leq N_{RF}^r \leq N_r$, este diseño de hardware posibilita que el procesamiento con un $N_{RF}^t \times N_s$ precodificador de banda base F_{BB} utilizando sus N_{RF}^t cadenas de transmisión, siguiendo un $N_t \times N_{RF}^t$ precodificador analógico F_{RF} mediante circuitos de radiofrecuencia (RF). Es decir, la señal que se transmite en un tiempo discreto mediante la precodificación híbrida que viene dada por; [12].

$$x = F_{RF} F_{BB} s \quad (5)$$

Donde s es $N_s \times 1$ el vector del símbolo con las arquitecturas de Beamforming y MIMO masivo [4], el resultado de la señal procesada en la UE se expresa como.

$$y = \sqrt{p} W_{BB}^* W_{RF}^* H F_{RF} F_{BB} s + W_{BB}^* W_{RF}^* n \quad (6)$$

Donde y es el $N_r \times 1$ vector de medición que recibe en la UE, W_{RF} es la $N_r \leq N_{RF}^r$ matriz de combinación en Radiofrecuencia, W_{BB} es la matriz de combinación en banda base, H es la $N_r \times N_t$ matriz del canal, P representa la potencia media recibida, y n es la matriz de ruido en el UE luego de realizar un cálculo del combinador sigue una simétrica circular independiente y una distribución Gaussiana idéntica. *i. i. d* $CN(0, \sigma_n^2)$ con una varianza de ruido σ_n^2 . Se toma en cuenta que las matrices F_{RF} , F_{BB} , W_{RF} , W_{BB} están diseñados bajo las siguientes hipótesis. i) F_{RF} y W_{RF} son matrices unitarias donde las entradas tienen magnitud unitaria; ii) F_{BB} y W_{BB} son matrices diagonales.

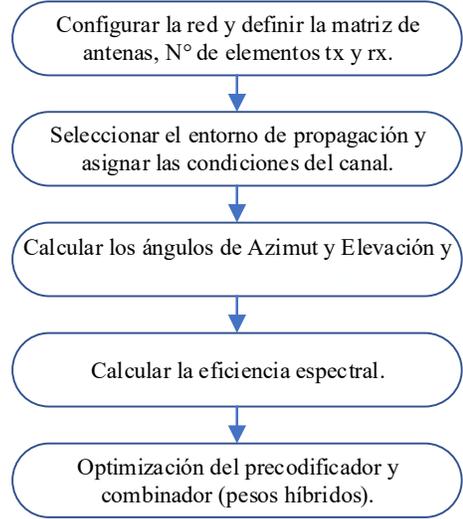


Fig. 5. Diagrama de flujo en el que se muestra el modelado general de un sistema de formación de haces híbrido MIMO.

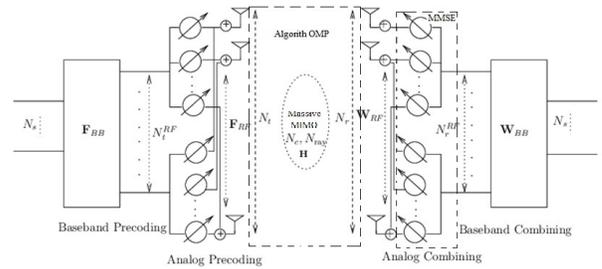


Fig. 6. Diagrama de bloques del modelo del canal MIMO MASIVO para sistemas Beamforming Híbrido con algoritmo OMP.

B. Modelo del canal

Debido a la dispersión limitada y al aumento del bloqueo, hay menos componentes de trayectos múltiples en el canal MIMO. Además, MIMO masivo utiliza una gran cantidad de antenas en la matriz, lo que conduce a una alta correlación de antena, lo que conduce a la dispersión en el canal MIMO. Por tanto, las características del entorno de propagación son muy importantes en el análisis y modelado de sistemas de MIMO masivo. Para obtener los beneficios de la tecnología de Beamforming, el modelo MIMO considera las características angulares del canal. Por esta razón, se utilizan representaciones de canales agrupados en esta investigación. Al tratar los canales como agrupaciones de dispersores, se obtiene un método más simple y atractivo.

Se considera que el canal H esta formado por N_{cl} grupos de dispersión, de los cuales cada uno aportan N_{ray} trayectorias de propagación que comprenden ángulos de salida semejantes en acimut y elevación $\phi_{il}^t(\theta_{il}^t)$ y ángulos de llegada $\phi_{il}^r(\theta_{il}^r)$ utilizando el modelo de canal agrupado. Siendo así la matriz del canal de banda estrecha H puede escribirse como: [13].

$$H = \sqrt{\frac{N_t N_r}{N_{cl} N_{ray}}} \left(\sum_{i=1}^{N_{cl}} \sum_{l=1}^{N_{ray}} \alpha_{il} A_r(\phi_{il}^r, \theta_{il}^r) A_t(\phi_{il}^t, \theta_{il}^t) \times \alpha_r(\phi_{il}^r, \theta_{il}^r) a_t(\phi_{il}^t, \theta_{il}^t)^H \right) \quad (7)$$

Donde α_{il} expresa la ganancia compleja de l^{th} en el rayo i^{th} de la agrupación. Las funciones $A_t(\phi_{il}^t, \theta_{il}^t)$ y $A_r(\phi_{il}^r, \theta_{il}^r)$ se definen como la ganancia de los elementos de la antena de transmisión y recepción mientras que las

funciones $a_r(\varphi_{il}^r \theta_{il}^r)$ y $a_t(\varphi_{il}^t \theta_{il}^t)$ representan los vectores de repuesta normal del grupo de recepción y transmisión en los correspondientes ángulos de salida y entrada $(\cdot)^H$ se considera el operador hermitiano. Además, los ángulos de acimut y elevación de llegada y salida se modelan como distribuciones laplacianas. Para simplificar, se asume que el transmisor y el receptor son plenamente conscientes del canal H . Sin embargo, en el sistema tranceptor real, el canal puede estimarse mediante el haz piloto vectorial.

El vector de respuesta de la matriz para un URA (Uniform Rectangular Array) viene determinado por:

$$a(\varphi, \theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left(\left[\begin{array}{c} 1, \dots, e^{jkd(m \sin(\varphi) \sin(\theta) + n \cos(\theta))}, \dots \\ \dots e^{jkd((x-1) \sin(\varphi) \sin(\theta) + (y-1) \cos(\theta))} \end{array} \right]^T \right) \quad (8)$$

Donde se estima que URA está en el plano y-z con las dimensiones de la matriz de la antena es igual a $N = XV$, $0 \leq M < m < x$ & $0 \leq n < V$ son los índices y,z de un elemento de la antena respectivamente $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ y d es la distancia entre elementos.

C. Eficiencia espectral

La descripción estadística de la señal se modela mediante un proceso aleatorio. Por lo tanto, asumiendo que una señal gaussiana (flujo de datos) se transmite a través de un canal MIMO, la eficiencia espectral del sistema se puede expresar como:

$$C = \log_2 \det \left(I + \frac{P}{N_s} R_n^{-1} W_{BB}^H W_{RF}^H H F_{RF} F_{BB} \times F_{BB}^H F_{RF}^H H^H W_{RF} W_{BB} \right) \quad (9)$$

Donde $R_n = \sigma_n^2 W_{BB}^H W_{RF}^H H F_{RF} F_{BB}$ es la covarianza del ruido en el receptor luego de la combinación l es la $N_s \times N_s$ matriz identidad.

D. Optimización del precodificador y combinador

Al observar el diseño simultáneo de todos los componentes $F_{RF}, F_{BB}, W_{RF}, W_{BB}$ para aumentar la eficiencia espectral obtenida en (9) se vuelve muy complejo. Se plantea algunos diseños subóptimos para elaborar una carga computacional baja. Se realiza un desacople del problema en dos partes i) Al inicio los precodificadores se forman utilizando el algoritmo OMP que se muestra en la Fig. 6 proporcionando más flexibilidad, cada elemento de la antena se conecten a uno o más módulos, debido a que este enfoque realiza la formación de haces tanto en dominios digitales como analógicos, se denomina formación de haces híbrida. ii) La matriz de combinación correspondiente se calcula realizando la minimización MMSE.

La información simultánea, conocida como ganancia de información obtenida por los precodificadores F_{RF}, F_{BB} la cual viene dada por:

$$I(F_{RF}; F_{BB}) = \log_2 \det \left(I + \frac{P}{N_s \sigma_n^2} H F_{RF} F_{BB} \times F_{BB}^H F_{RF}^H H^H \right) \quad (10)$$

donde $I(X; Y)$ representa la información mutua entre los pares de variables aleatorias $(X; Y)$. Luego, la optimización del problema de diseño en el precodificador se puede expresar como:

$$\begin{aligned} (F_{RF}^{opt}, F_{BB}^{opt}) &= \arg_{F_{RF}, F_{BB}} \max I(F_{RF} F_{BB}) \\ \text{s. t. } F_{RF} &\in F_{RF} \end{aligned} \quad (11)$$

donde F_{RF} es del conjunto de $N_t \times N_{RF}^t$ matrices de factibles precodificadores de RF con entradas de magnitud constante. Para tener en cuenta la restricción de potencia de transmisión, F_{BB} debería ser normalizado de modo que $\|F_{RF}, F_{BB}\|_F^2 = N_s$. Aquí $\|\cdot\|_F$.

Para reformular la optimización escrita en (11) el canal MIMO H se realiza usando la descomposición de valores singulares (SVD) ordenada como:

$$H = U \Sigma V^H \quad (12)$$

donde U y V son $N_r \times \text{rank}(H)$ y $N_t \times \text{rank}(H)$ son matrices unitarias respectivamente y Σ es $\text{rank}(H) \times \text{rank}(H)$ la matriz diagonal con entradas diagonales $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{\text{rank}(H)}$ establecidas en un orden descendente y V se divide como $[V_1 N_t \times N_s \quad V_2]$ donde las columnas de V_1 corresponden a los mayores valores singulares $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_t$.

empleando la aproximación dada en [10] para simplificar de mejor manera la expresión de información mutua en (10), la optimización del precodificador se reescribe como

$$(F_{RF}^{opt}, F_{BB}^{opt}) = \arg_{F_{BB}, F_{RF}} \min \|F_{opt} - F_{RF} F_{BB}\|_F \quad (13)$$

La base principal de la optimización en este artículo depende de la determinación del mínimo error residual entre la ganancia de información obtenida por los precodificadores $F_{RF} F_{BB}$ y el precodificador óptimo (convencional) totalmente digital F_{opt} es igual a V_1 .

En términos generales, los precodificadores discutidos anteriormente se pueden usar con cualquier combinador bien diseñado (combinadores totalmente digitales, combinadores híbridos) en el extremo receptor. La elección ideal para la implementación real en los sistemas MIMO es diseñando un receptor lineal de error medio cuadrático mínimo (MMSE) para reducir la complejidad del diseño en el receptor. El problema de estimación de MMSE para encontrar un combinador híbrido puede ser expresado minimizando el MSE entre Señal transmitida y procesada final (6).

$$\begin{aligned} (W_{RF}^{opt}, W_{BB}^{opt}) &= \arg_{W_{RF}, W_{BB}} \mathbb{E}[\|s - y\|_2^2] \\ \text{s. t. } W_{RF} &\in W_{RF} \end{aligned} \quad (14)$$

Donde $\mathbb{E}[\cdot]$ se describe como el valor esperado, W_{RF} es un conjunto de $N_r \times N_{RF}^r$ matrices de los combinadores en RF que posibilita la ganancia constante en fase. En el caso de la arquitectura digital (14) puede deducirse para obtener con mejor exactitud

$$W_{MMSE}^H = \frac{1}{\sqrt{P}} (F_{BB}^H F_{RF}^H H^H H F_{RF} F_{BB} + \frac{N_s \sigma_n^2}{P} I)^{-1} F_{BB}^H F_{RF}^H H^H \quad (15)$$

Donde W_{MMSE} es el combinador MMSE óptimo sin restricciones. Una ecuación matemática adicional utilizando la teoría de estimación, (14) se puede reformular como

$$\begin{aligned} (W_{RF}^{opt}, W_{BB}^{opt}) &= \arg_{W_{RF}, W_{BB}} \min \left(|E[y y^H]|^{1/2} (W_{MMSE} \right. \\ &\quad \left. - W_{RF} W_{BB}) \right|_F \end{aligned}$$

$$s. t. W_{RF} \in W_{RF} \quad (16)$$

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para analizar el comportamiento e identificar las características de un sistema de formación de haz híbrido se ha empleado el software MATLAB para la simulación, utilizando como referencia el patrón de radiación que se muestra en la fig. 7, donde el transmisor desplegó un URA 64*4 con cadenas de Radiofrecuencia y el receptor emplea un URA 16*4 para soportar N flujos de datos independientes.

Se establece los parámetros 256*64 en la matriz para el sistema de formación de haces en MIMO masivo con cadenas de radio frecuencia con $N_{RF}^t=N_{RF}^r=4$ cadenas de RF, para el sistema de propagación se ha modelado mediante $N_{cl}=6$ grupos de dispersión que se distribuyen aleatoriamente en el espacio. En cada grupo, hay 8 dispersores con un ángulo de apertura de 5 grados, para un total de 48 dispersores. La ganancia de la trayectoria de cada dispersor se obtiene a partir de una distribución gaussiana compleja de simetría circular.

En la Fig. 7, se visualizan los datos obtenidos mediante la simulación realizada en el programa Matlab correspondiente a la formación de un haz convencional e híbrido. En base al algoritmo de formación de haz convencional con el método URA, se obtiene el patrón de radiación que muestra los lóbulos primarios y secundarios, siendo estos últimos los que presentan ruido, interferencia y pérdidas de transmisión de datos que afectan la directividad de los lóbulos principales, lo que provoca que se alejen entre sí, generando menor cobertura en cuanto a distancia, formando un haz más sectorial y convirtiéndose en una antena más sectorial que directiva como se muestra en la Fig. 7 también se observa que el primer lóbulo principal tiene una ganancia aproximada de 0.95dB, mientras en el segundo lóbulo principal llega a una ganancia aproximada de 0.75dB, los lóbulos secundarios la mayoría llegan a una ganancia aproximada de 0.1dB a 0.5dB, provocando menos directividad y más interferencia en el sistema.

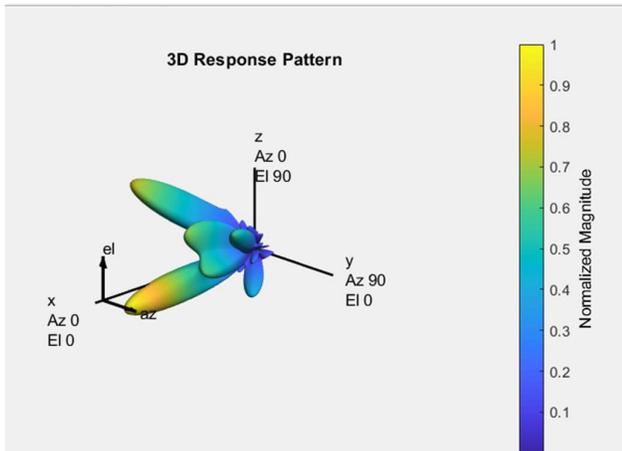


Fig. 7. Patrón de radiación 3D del vector de formación para un sistema de haz convencional con el método URA

En base al algoritmo de formación de haz híbrido con el método OMP, se obtiene el patrón de radiación que muestra los lóbulos primarios y secundarios, obteniendo como resultado un mejor direccionamiento de dichos lóbulos, reduciendo la interferencia y pérdidas de transmisión de datos que afectan la directividad de los lóbulos principales, lo que provoca que los

lóbulos no estén dispersos, generando mayor cobertura y estabilidad en el sistema, formando un haz más delgado y convirtiéndose en una antena más directiva como se muestra en la Fig. 8. Se puede apreciar que en los lóbulos principales se mejora la ganancia aproximada de 0.99dB mejorando la directividad y direccionamiento del sistema, logrando que los lóbulos secundarios lleguen a una ganancia aproximada de 0.1dB y 0.3dB reduciendo la interferencia, mejorando notablemente la estabilidad del patrón de radiación.

Como se muestra en la Fig.7 el algoritmo URA, los arreglos no se encuentran calibrados y los flujos de datos se dispersan aleatoriamente provocando interferencia en los lóbulos primarios y secundarios, se evidencia también que el ancho del haz es más prominente haciéndose sectorial, por este motivo el algoritmo OMP logra la recuperación de datos con una elevada eficiencia, en un tiempo menor y el ancho del haz se vuelve más directivo lo que mejorará el direccionamiento del espectro de radiación y reducirá la interferencia en el sistema, como se visualiza en la Fig. 8.

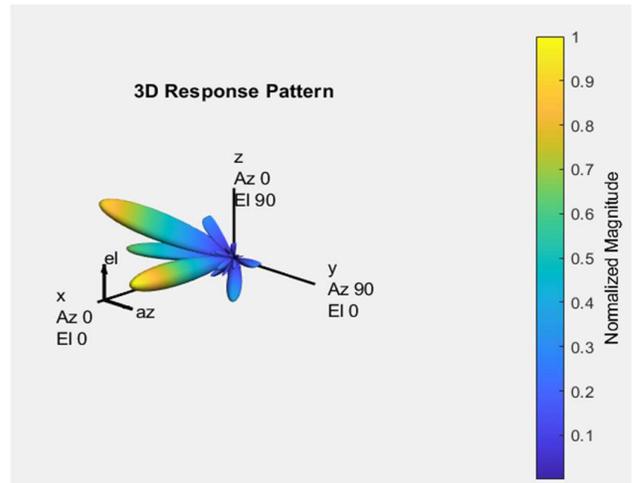


Fig. 8. Patrón de radiación 3D del vector de formación para un sistema de haz híbrido con el método OMP.

Para realizar una comparación entre el sistema de formación de haz híbrido y convencional, se asume que las cadenas de transmisión y recepción se transmiten con $N_s = 1, 2$ flujos de datos. En este artículo, la SNR se asume como $SNR = \frac{P}{\sigma_n^2}$. para la Fig. 9 los resultados obtenidos en la simulación se demostraron mediante el análisis de la parte C y D que se promedian sobre 1000 ensayos Monte-Carlo para cada SNR para establecer la eficiencia espectral resultante.

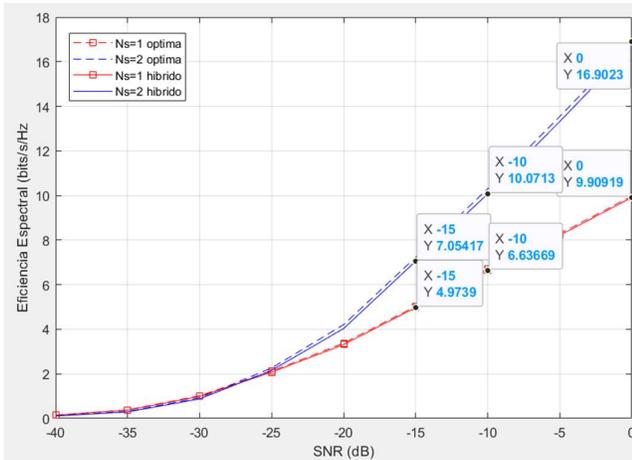


Fig. 9. Eficiencia espectral para un sistema de 256 x 64 para un $N_s = 1, 2$ flujo de datos utilizando pesos convencionales e híbridos.

La eficiencia espectral del precodificador híbrido para $N_s = 1$ se acerca al precodificador óptimo siendo esto el resultado de tres valores al azar de SNR en la línea de tendencia en este caso -15, -10 y 0 dB, en donde estos valores demuestran que el precodificador híbrido se acerca en un 98% al precodificador óptimo.

Para un SNR de -15dB se obtiene una eficiencia espectral de 4.9739bits/s/Hz, para valores de SNR de -10dB y 0dB se obtiene una eficiencia espectral de 6.6366 bits/s/Hz y 9.9091 bits/s/Hz respectivamente, es decir a medida que va disminuyendo el ruido existe un aumento de eficiencia espectral.

La eficiencia espectral del precodificador híbrido para $N_s = 2$ se acerca al precodificador óptimo siendo esto el resultado de tres valores al azar de SNR en la línea de tendencia en este caso -15, -10 y 0 dB, en donde estos valores demuestran que el precodificador híbrido se acerca en un 97% al precodificador óptimo.

Para un SNR de -15dB se obtiene una eficiencia espectral de 7.05417 bits/s/Hz, para valores de SNR de -10dB y 0dB se obtiene una eficiencia espectral de 10.0713 bits/s/Hz y 16.6729 bits/s/Hz respectivamente, es decir a medida que la eficiencia espectral aumenta el sistema se vuelve más estable y mejora la transmisión de datos.

VI. CONCLUSIONES

Para el desarrollo de la formación de haces híbridos es importante determinar los parámetros de inicio, ya que esto permite obtener los ángulos de acimut y elevación que en este caso se trabajó con 5° como un ángulo fijo, así mismo mediante la aplicación de la técnica URA se pueden manipular el patrón de radiación, formación de haz, directividad, rendimiento, direccionamiento, ruido e interferencia, logrando así un óptimo procesamiento de señales como se puede observar en la fig. 8.

En la comparación entre los algoritmos URA y OMP para MIMO masivo, como lo muestra la Fig. 7, existen curvaturas en los lóbulos secundarios lo que genera interferencia en la transmisión de datos. Los lóbulos principales tienen ganancias aproximadas de 0.95dB y 0.75dB respectivamente comparado con la Fig. 8 donde se muestra un mejor direccionamiento de los lóbulos principales con ganancias aproximadas de 0.99 dB siendo que este sea un patrón adecuado, el cual presenta una mejora del 4 % y 24% para su transmisión de datos.

En el precodificador híbrido el flujo de datos $N_s = 2$ para un SNR de -15dB, consigue una eficiencia espectral del 7.05417 bits/s/Hz que representa un 97% en relación al precodificador óptimo, con una eficiencia espectral de 7.2323 bits/s/Hz que es el 100%, a su vez el precodificador híbrido del flujo de datos $N_s = 1$ con igual valor de SNR, consigue una eficiencia espectral del 4.9739 bits/s/Hz que representa un 98% en relación al precodificador óptimo con una eficiencia espectral de 5.0309 bits/s/Hz que es el 100%. Al ser el mismo ruido se denota que entre $N_s = 1$ y $N_s = 2$ hubo una mejora en la eficiencia espectral de 2,08027 bits/s/Hz siendo necesario incrementar el número de flujos N_s ya que, a mayor flujo de datos, la banda es mejor aprovechada para la transmisión de información.

REFERENCIAS

- [1] C. Masterson, "Massive MIMO and Beamforming: The signal processing behind the 5G Buzzwords", AnalogDialogue, 06-2017 (fecha de última visita: 10 - 06 -2018).
- [2] F. M. T. d. Rosário, «Massive MIMO Processing for 5G Systems,» técnico Lisboa, Portugal, 2015.
- [3] EG Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson y TL Marzetta, "Massive MIMO para sistemas inalámbricos de próxima generación", en IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, págs. 186-195, febrero de 2014.
- [4] J. Nam, J. Ahn, A. Adhikary y G. Caire, "División y multiplexación espaciales conjuntas: Realización de ganancias MIMO masivas con información de estado de canal limitada", 46ª Conferencia Anual sobre Ciencias y Sistemas de la Información (CISS) de 2012, págs. 1-6.
- [5] Molisch, AF y col. "Formación de haces híbrida para MIMO masivo: una encuesta". Revista de comunicaciones IEEE®, vol. 55, núm. 9, septiembre de 2017, págs. 134-141.
- [6] E. Björnson, J. Hoydis, L. Sanguinetti et al., "Redes mimo masivas: energía espectral y eficiencia de hardware", Foundations and TrendsR en el procesamiento de señales, vol. 11, no. 3-4, págs. 154-655, 2017.
- [7] T. E. Bogale and L. B. Le, "Beamforming for multiuser massive MIMO systems: Digital versus hybrid analog digital," in IEEE Global Comm. Conf., 2017, pp. 4066-4071.
- [8] D. Zhang, Y. Wang, X. Li y W. Xiang, "Hybridly connected structure for hybrid beamforming in mmWave Massive MIMO systems", IEEE Transactions on Communications, Vol. 66, n.º. 2, pp. 662-674, febr. 2018.
- [9] C H. Q. Ngo, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Massive MU-MIMO downlink TDD systems with linear precoding and downlink pilots," in Proc. 51th Annu. Allerton Conf., Monticello, IL, USA, 2019, pp. 293-298.
- [10] L. Liang, W. Xu, and X. Dong, "Low-complexity hybrid precoding in massive multiuser MIMO systems," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 3, no. 6, pp. 653-656, Dec. 2019.
- [11] A. Molisch, V. Ratnam, S. Han, Z. Li, S. Nguyen, L. Li and K. Haneda "Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A Survey," IEEE Communications Magazine, vol. 1, no. 12, Sep. 2017, pp. 135-140
- [12] C802.20-04/08r1, "Channel Models for IEEE 802.20 MBWA System Simulations", March 2018.
- [13] T. L. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction," in Bell Labs Technical Journal, vol. 20, pp. 11-22, 2015, doi: 10.15325/BLTJ.2015.2407793.