

Análisis experimental del canal MIMO masivo en un entorno de oficina en ondas milimétricas

Cristina Avellán⁽¹⁾, Lorenzo Rubio⁽¹⁾, Rafael P. Torres⁽²⁾, Bernardo Bernardo⁽¹⁾,
Vicent M. Rodrigo-Peñarrocha⁽¹⁾, Juan Reig⁽¹⁾, Jesús R. Pérez⁽²⁾, Luis Valle⁽²⁾ y Hermán Fernández⁽³⁾

⁽¹⁾Antennas and Propagation Lab, iTEAM, Universitat Politècnica de València, Valencia. España

⁽²⁾Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria, Santander. España

⁽³⁾Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia. Colombia

E-mail: lrubio@dcom.upv.es

Resumen—Massive multiple-input multiple-output (MIMO) is considered an enabling technology to achieve large capacities in multi-user scenarios in the upcoming mobile networks (5G and beyond). In this paper, the performance of the massive MIMO concept is investigated from measurement data at millimeter wave (mmWave) frequencies. The measurements were collected in an indoor office environment from 25 to 40 GHz in the frequency domain, using a virtual uniform rectangular array (URA) at the base station consisting of 144 (12×12) antennas. Line-of-Sight (LOS) and Obstructed-LOS (OLOS) propagation conditions have been considered. Both the favorable propagation condition and the achievable capacity are analysed in terms of active users and number of antennas placed at the base station. The results are particularised at the 26, 28 and 38 GHz bands adopted for the deployment of future wireless communication networks.

I. INTRODUCCIÓN

El concepto MIMO masivo, del inglés *massive multiple-input multiple-output* (*massive MIMO*), hace referencia al aumento de antenas en el transmisor (Tx) y/o receptor (Rx) para proporcionar un mejor rendimiento y eficiencia del espectro [1]. En el contexto de los sistemas de comunicaciones móviles de quinta y sexta generación, 5G y 6G, MIMO masivo se presenta como una tecnología habilitante que contribuirá a aumentar considerablemente la tasa de transmisión. Con MIMO masivo se posibilita la implementación de sistemas MIMO multiusuario [2], del inglés *multiuser MIMO* (MUMIMO), donde las estaciones base están equipadas con un número elevado (de decenas a centenares) de antenas. En MIMO masivo una estación base puede servir a varios usuarios, equipados con una única antena, en el mismo recurso tiempo-frecuencia. El empleo de frecuencias en la banda de milimétricas (mmWave, *millimeter wave*) hace especialmente atractivo el concepto de MIMO masivo al poder integrar en un espacio reducido un número elevado de antenas.

Se ha comprobado teóricamente que los sistemas MIMO masivo pueden mejorar la fiabilidad del enlace radio, así como la eficiencia espectral y energética [1], [3], [4]. Las mejoras introducidas por los sistemas MIMO masivo están basadas en el concepto de propagación favorable (del inglés *favorable propagation*) al poder conseguir caminos de propagación ortogonales entre la estación base y los diferentes usuarios, que hace que los esquemas de precodificación y detección puedan alcanzar un comportamiento próximo al óptimo [1].

El interés de los sistemas MIMO masivo está basado en

condiciones de propagación optimistas, junto con la disponibilidad tecnológica que permita la integración de un elevado número de antenas en la estación base. Los estudios teóricos están basados en la hipótesis de *scattering* isotrópico, canales con desvanecimiento tipo Rayleigh, y un número de antenas que aumenta sin restricciones. Sin embargo, la implementación práctica de esta nueva tecnología requiere evaluar sus prestaciones en condiciones reales de propagación, que a veces se alejan del concepto de propagación favorable, y con implementaciones prácticas de *arrays* en la estación base, equivalente a un número finito de antenas.

En esta comunicación se analizan las prestaciones de un sistema MIMO masivo en un escenario de interiores de oficina, en lo que se correspondería con una picocelda de elevada densidad de tráfico, a partir de medidas realizadas en condiciones de propagación con visión directa (LOS, *Line-of-Sight*) y obstrucción de la componente directa (OLOS, *Obstructed-LOS*). Las medidas se han realizado en la banda de 25 a 40 GHz, lo que permite comparar los resultados obtenidos en las bandas de 26, 28 y 38 GHz, que han sido adoptadas en la última Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones, celebrada en octubre de 2019, para el despliegue de los sistemas 5G en mmWave [5].

II. CAMPAÑA DE MEDIDAS

A. Entorno de propagación

Las medidas se han realizado en un entorno típico de oficina. El mobiliario está constituido por archivadores metálicos, sillas y mesas de trabajo equipadas con pantallas planas de ordenador, así como diverso material de escritorio, entre otros objetos. El edificio es de construcción moderna, con techos y suelos de hormigón armado, las paredes interiores están formadas por placas de yeso laminadas, tipo pladur, y grandes cristaleras al exterior. Las dimensiones en planta del entorno de propagación son 9,68×6,93 m². El techo está situado a una altura de 2,63 m.

B. Equipamiento y procedimiento de medida

La función de transferencia compleja del canal (CTF, *Channel Transfer Function*) se ha medido en el dominio de la frecuencia a través de una sonda basada en el analizador de redes vectorial (VNA, *Vector Network Analyzer*) Keysight

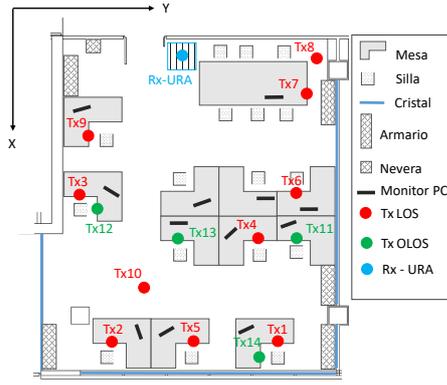


Fig. 1. Vista en planta del escenario de propagación. Se han indicado las posiciones del Rx (URA) y del Tx, distinguiendo entre LOS y OLOS.

N5227A. Se han utilizado las antenas QPAR QOM-SL-0.8-40-K-SG-L, omnidireccionales en el plano horizontal y con polarización vertical (lineal). El subsistema Tx se ha conectado al VNA a través de un enlace de radio sobre fibra (RoF, *Radio-over-Fiber*), modelo Optica OTS-2 de Emcore, evitando así las elevadas pérdidas que introducen los cables.

La antena Rx se ha ubicado sobre un sistema de posicionamiento XY, implementando un array rectangular uniforme (URA, *Uniform Rectangular Array*) de dimensiones 12×12 . La separación entre los elementos del URA ha sido 3,04 mm, menor que $\lambda/2$ a 40 GHz ($\approx 3,7$ mm). Se ha medido el parámetro de *scattering* $s_{21}(f)$, equivalente a la CTF del canal radio, entre 25 y 40 GHz, usando 8192 muestras en frecuencia. El ancho de banda del filtro de frecuencia intermedia fue de 100 Hz, como compromiso entre el tiempo de medida y el nivel de ruido. Previamente a la adquisición de las medidas se realizó un calibrado en respuesta de todos los elementos que forman el sistema de medida, excepto las antenas. Puesto que las antenas no pueden ser consideradas en el proceso de calibración, el parámetro $s_{21}(f)$ medido tiene en cuenta la respuesta conjunta del canal de propagación y las antenas utilizadas en Tx y Rx, en lo que se denomina canal radio [6].

En las medidas, la antena Tx se ha ubicado en diferentes posiciones a lo largo de la sala, emulando la posición de un equipo de usuario. El subsistema Rx permaneció en la misma posición, cerca de una de las paredes, emulando la posición de un punto de acceso o estación base. La antena Rx se situó a una altura de 1,62 m, y la antena Tx a 0,90 m. En la Fig. 1 se muestra la vista en planta de la sala, junto con la ubicación de la antena Rx y las diferentes posiciones de la antena Tx. Las medidas se han realizado en condiciones de visión directa (LOS, *Line-of-Sight*) y obstrucción de la componente directa (OLOS, *Obstructed-LOS*), como consecuencia del bloqueo de la componente directa por los monitores de los ordenadores. Se ha medido en 10 posiciones con LOS y 4 en OLOS, siempre en condiciones de estacionariedad.

III. MODELO DE CANAL MIMO MASIVO

El modelo de MIMO masivo a utilizar considera un escenario de propagación de una celda donde se implementa un sistema MIMO multiusuario con transmisión multiportadora, en lo que viene a ser un sistema MIMO-OFDM multiusuario. La estación base, o punto de acceso, está equipada con M

antenas y sirve a K usuarios, con $K \leq M$, en el mismo recurso tipo-frecuencia. Se asume que la estación base tiene un conocimiento perfecto del canal radio y que el canal puede considerarse de banda estrecha en cada subportadora. A partir de la Fig. 2, el vector que contiene la señal recibida por los K usuarios en la portadora f -ésima, \mathbf{y}_f , viene dado por:

$$\mathbf{y}_f = \sqrt{\frac{\rho K}{M}} \mathbf{H}_f \mathbf{z}_f + \mathbf{n}_f, \quad (1)$$

donde \mathbf{H}_f es la matriz de canal normalizada, de dimensiones $K \times M$ a la frecuencia f -ésima; \mathbf{z}_f es el vector que contiene las M señales transmitidas, normalizado de forma que $E\{\|\mathbf{z}_f\|^2\} = 1$; y \mathbf{n}_f es el vector que contiene las muestras de ruido blanco gaussiano aditivo, cuyos elementos tienen varianza unidad, son independientes y están idénticamente distribuidos (i.i.d., *independent and identically distributed*). El término $\rho K/M$ hace referencia a la energía transmitida, donde ρ corresponde a la relación señal a ruido (SNR, *signal-to-noise ratio*) media por usuario activo.

A partir de las medidas, para cada frecuencia se dispone de una matriz $\mathbf{H}_f^{\text{raw}}$ de K filas y M columnas, donde la fila k indica la señal medida en cada antena del URA para la posición k -ésima de la antena Tx. Asumiendo reciprocidad en el canal¹, la matriz \mathbf{H}_f se construye a partir de una versión normalizada de la matriz medida $\mathbf{H}_f^{\text{raw}}$. En nuestro estudio se ha considerado dos tipos de normalización:

Normalización 1. El vector de canal del usuario k -ésimo, correspondiente a la fila k -ésima de $\mathbf{H}_f^{\text{raw}}$ se normaliza para que la energía media sobre las M antenas y las N subportadoras (número de puntos medidos en frecuencia) sea igual a la unidad. Esto se consigue haciendo:

$$\mathbf{h}_{k,f} = \sqrt{\frac{M}{\frac{1}{N} \sum_{f=1}^N \|\mathbf{h}_{k,f}^{\text{raw}}\|^2}} \mathbf{h}_{k,f}^{\text{raw}}, \quad (2)$$

donde $\mathbf{h}_{k,f}$ es la fila k -ésima de la matriz \mathbf{H}_f . Con esta normalización se corrige las diferencias de atenuación entre los usuarios debidas a la propagación, mientras que las variaciones debidas a las antenas y frecuencia se mantienen.

Normalización 2. La matriz de canal medida $\mathbf{H}_f^{\text{raw}}$ se normaliza para que los coeficientes tengan energía media unidad sobre las M antenas, los K usuarios activos y las N subportadoras, mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{H}_f = \sqrt{\frac{MK}{\frac{1}{N} \sum_{f=1}^N \|\mathbf{H}_f^{\text{raw}}\|_F^2}} \mathbf{H}_f^{\text{raw}}, \quad (3)$$

donde $\|\cdot\|_F$ es la norma de Frobenius. Al contrario de la normalización 1, esta normalización mantiene las diferencias de atenuación entre los diferentes caminos de propagación. Con ambas normalizaciones se tiene $E\{\|\mathbf{H}_f\|_F^2\} = MK$.

IV. RESULTADOS

En esta sección se analizan las prestaciones del canal MIMO masivo en términos de la condición de número inversa, utilizada para evaluar la condición de propagación favorable, y capacidad. Los resultados se han obtenido para diferentes

¹Téngase en cuenta que las medidas se han realizado en el enlace ascendente (*uplink*) y el estudio del sistema MIMO masivo se realiza en el enlace descendente (*downlink*).

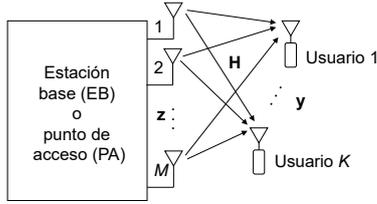


Fig. 2. Modelo de sistema MIMO masivo multiusuario con M antenas en la estación base, o punto de acceso, y K usuarios activos.

configuraciones de usuarios activos y número de antenas en la estación base, particularizándose para las bandas de 26, 28 y 38 GHz. Se ha considerado un ancho de banda de transmisión de 400 MHz, atendiendo al máximo ancho de banda definido por el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) para las redes 5G en la banda de milimétricas (*Frequency Range 2*).

A. Condición de número inversa

El concepto de propagación favorable indica que los diferentes caminos de propagación entre la estación base y los usuarios son ortogonales, equivalente a considerar que las filas de la matriz \mathbf{H}_f son ortogonales (o independientes). Una de las métricas más utilizadas para evaluar la ortogonalidad de las filas² (o columnas) de una matriz es su condición de número. Para la matriz de canal normalizada \mathbf{H}_f , la condición de número a la frecuencia f -ésima, κ_f , viene definida por:

$$\kappa_f \triangleq \frac{\lambda_{f,\max}}{\lambda_{f,\min}}, \quad (4)$$

donde $\lambda_{f,\max}$ y $\lambda_{f,\min}$ son el mayor y menor autovalor de la matriz $\mathbf{H}_f^H \mathbf{H}_f$, respectivamente, siendo \mathbf{H}_f^H la matriz hermítica de \mathbf{H}_f . Según la definición de κ_f , un valor igual a la unidad se corresponde con una matriz de canal con todas sus filas ortogonales, mientras que valores superiores a la unidad indican pérdida de ortogonalidad. En la práctica, para facilitar la interpretación de los resultados, es frecuente analizar el grado de ortogonalidad a través de la condición de número inversa, del inglés *inverse condition number* (ICN), que varía entre 0 (mínima ortogonalidad) y 1 (máxima ortogonalidad). Teniendo en cuenta la forma en la que se construye la matriz de canal \mathbf{H}_f , es más apropiado utilizar la normalización 1 para evaluar la ICN dado que todas sus filas tienen la misma norma. Si se utilizase la normalización 2, la dispersión de los valores propios estaría condicionada también por los desequilibrios de potencia entre los diferentes caminos de propagación. En la Fig. 3 se muestra la función de distribución (FD) de los valores de ICN considerando 4, 6, 8 y 10 usuarios activos, y 144 (12×12) antenas en el URA de la estación base. Los resultados se muestran en función de la frecuencia y en condiciones de propagación LOS. Se incluye a modo de comparación los valores que se tendrían para un canal ideal i.i.d. Rayleigh. Los resultados muestran como la pérdida de ortogonalidad aumenta con el número de usuarios activos. Se observa también como la ortogonalidad aumenta con la frecuencia, a diferencia de lo que podría pensarse en

²La fila k -ésima de la matriz \mathbf{H}_f representa el canal de propagación entre las M antenas y el usuario k -ésimo

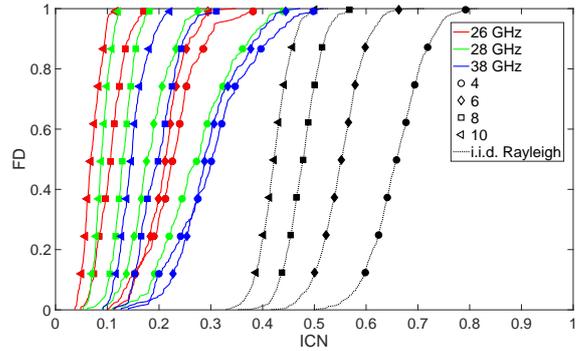


Fig. 3. ICN a 26, 28 y 38 GHz para 4, 6, 8 y 10 usuarios activos y 144 (12×12) antenas en el URA de la estación base. Se ha considerado condiciones de propagación LOS.

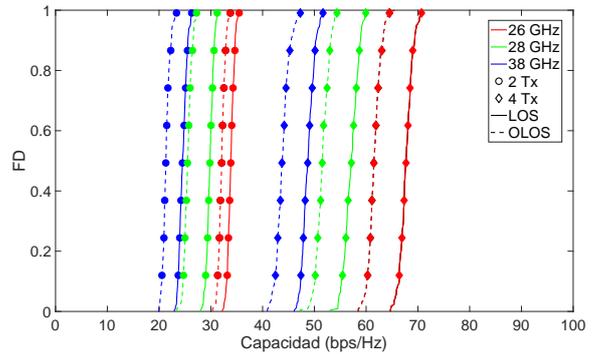


Fig. 4. Capacidad a 26, 28 y 38 GHz para 2 y 4 usuarios activos, 144 (12×12) antenas en el URA de la estación base, en condiciones de propagación LOS y OLOS.

un primer momento. Este comportamiento con la frecuencia puede explicarse teniendo en cuenta que a media que la frecuencia aumenta los *scatterers* que interactúan con los frentes de onda producen reflexiones más difusas, contribuyendo a aumentar la componente aleatoria de la matriz de canal. El comportamiento observado para situaciones OLOS es similar, si bien en este caso los valores de ICN son mayores y se aproximan más a la situación de canal ideal i.i.d. Rayleigh.

B. Capacidad

Según el modelo de canal MIMO masivo propuesto en la Sección III, la capacidad del sistema MIMO-ODFM multiusuario puede calcularse a partir de la descomposición en valores propios de la matriz $\mathbf{H}_f^H \mathbf{H}_f$. La capacidad para cada subportadora, C_f , vendrá por [7]:

$$C_f = \sum_{i=1}^r \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{M} \lambda_{f,i} \right), \quad (5)$$

donde r es el rango de la matriz $\mathbf{H}_f^H \mathbf{H}_f$ ($r \leq K$) y $\lambda_{f,i}$ su autovalor i -ésimo. En el cálculo de la capacidad se ha aplicado la normalización 2 para generar la matriz de canal \mathbf{H}_f . La Fig. 4 muestra la FD de la capacidad para las bandas de 26, 28 y 38 GHz. Las curvas se corresponden con 2 y 4 usuarios activos, considerando las 144 (12×12) antenas del URA, en condiciones LOS y OLOS, y los valores de SNR de la campaña de medidas, por lo que en la estimación de la capacidad no se ha tenido en cuenta las diferencias de

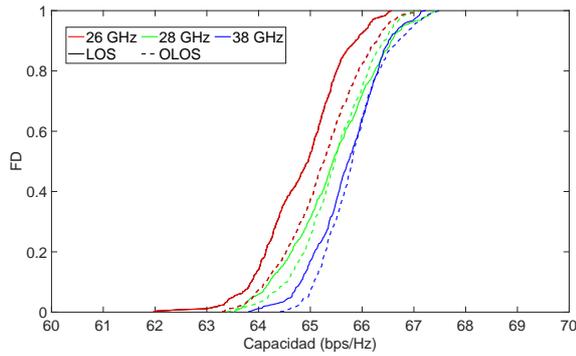


Fig. 5. Capacidad media a 26, 28 y 38 GHz para 4 usuarios activos, 144 (12×12) antenas en el URA de la estación base, SNR= 50 dB, en condiciones de propagación LOS y OLOS.

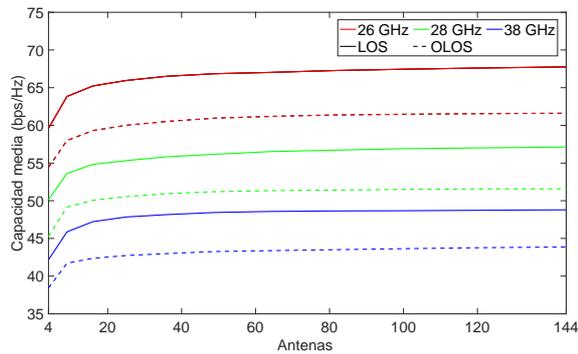


Fig. 6. Capacidad media en función del número de antenas de la estación base considerando 4 usuarios activos.

atenuación en frecuencia. Esto último explica que los valores de capacidad sean mayores en la banda de 26 GHz, en contra de lo que podría sugerir el estudio de la ICN, donde la condición de propagación favorable aumentaba con la frecuencia. Los resultados de capacidad también son superiores en condiciones LOS frente a OLOS como consecuencia de una SNR mayor. Sin embargo, los resultados de ICN mostrados en la Fig. 3 sugieren una mayor capacidad con la frecuencia y en condiciones OLOS cuando la potencia de las M antenas de la estación base se ajusta para mantener la misma SNR, equivalente a un control de potencia perfecto en la estación base. En este sentido, en la Fig. 5 se muestra la capacidad obtenida para SNR = 50 dB³ en todos los usuarios activos. Los resultados indican un aumento de la capacidad media con la frecuencia, si bien las diferencias son del orden de 1 bps/Hz ($\approx 1,54\%$).

En la Fig. 6 se muestra la capacidad media en función del tamaño del URA de la estación base, considerando 4 usuarios activos y los valores de SNR experimentales. La capacidad máxima se alcanza prácticamente para un sistema con 36 (6×6) antenas. La Fig. 7 muestra la capacidad media en función de la frecuencia en el rango de 26 a 39 GHz para 4 usuarios activos y 144 (12×12) antenas en la estación base. Los resultados son muy similares para una misma SNR

³Los valores experimentales de SNR oscilan entre 36 y 52 dB en LOS, y entre 32 y 47 dB en OLOS, de ahí que se haya considerado un valor de 50 dB para facilitar la comparación de los resultados con los obtenidos a partir de los valores de SNR experimentales.

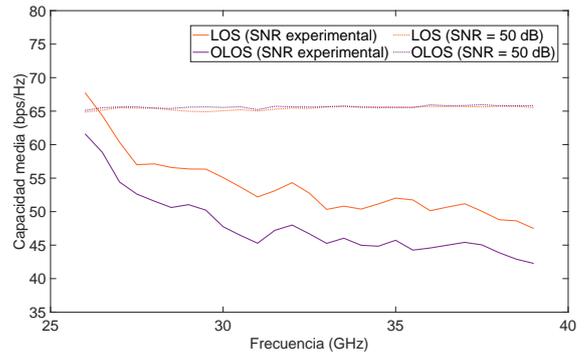


Fig. 7. Capacidad en función de la frecuencia para 4 usuarios activos y 144 (12×12) antenas en el URA de la estación base. Se ha considerado condiciones LOS y OLOS.

(50 dB). Por el contrario, cuando no se implementa ningún control de potencia, la atenuación por propagación hace que la SNR disminuya con la frecuencia, degradándose así la capacidad media del sistema. La diferencia de capacidad entre LOS y OLOS es prácticamente constante con la frecuencia, del orden de 5 bps/Hz.

V. CONCLUSIONES

En esta comunicación se han evaluado las prestaciones de un sistema MIMO masivo en un entorno de oficina a partir de medidas realizadas en la banda de 25 a 40 GHz. Los resultados obtenidos muestran una pérdida de ortogonalidad en la matriz del canal conforme aumenta el número de usuarios activos. A partir de la matriz de canal medida se ha observado una disminución de la capacidad con la frecuencia como consecuencia de mayores pérdidas de propagación. Sin embargo, para una misma SNR en los receptores de los usuarios activos, equivalente a considerar un control de potencia perfecto, los valores de capacidad alcanzable son muy similares en el rango de frecuencias considerado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad a través de los proyectos TEC2017-86779-C2-1-R y TEC2017-86779-C2-2-R, a través de la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

REFERENCIAS

- [1] F. Rusek, D. Persson, B. Kiong Lau, E. Larsson, T. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, Jan. 2013.
- [2] D. Gesbert, M. Kountouris, R. Heath, C. Chae, and R. Salzer, "Shifting the MIMO paradigm," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 5, pp. 36–46, Sep. 2007.
- [3] E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186–195, Feb. 2014.
- [4] H. Ngo, E. Larsson, and T. Marzetta, "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 4, pp. 1436–1449, Apr. 2013.
- [5] World Radio Communications Conference. Resolutions COM4/8-9. Sharm El-Sheikh, Egypt, 2019, Nov 2019.
- [6] R. Steele and L. Hanzo, *Mobile radio communications*, 2nd ed. Wiley, 1999.
- [7] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to space-time wireless communications*. Cambridge University Press, 2003.