

Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica*

Guefry Leider Agredo-Méndez

PhD(c) en Ciencias de la Electrónica. Miembro del Grupo de I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT. Docente Titular Departamento de Telecomunicaciones Universidad del Cauca. Popayán, Colombia
gagredo@unicauca.edu.co

Pablo Emilio Jojoa-Gómez

PhD en Ingeniería Eléctrica. Grupo de I+D Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT. Docente Titular Departamento de Telecomunicaciones, Universidad del Cauca. Popayán, Colombia
pjojoa@unicauca.edu.co

Vicenç Almenar-Terré

PhD en Telecomunicaciones. Miembro del Grupo de Integración de Sistemas Electrónicos Digitales – GISED. Docente Titular Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia – iTEAM. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España
valmenar@dcom.upv.es

RESUMEN

La demanda de altas velocidades y capacidades en comunicación inalámbrica de datos, con tráfico creciente de servicios como el video de alta definición, las videollamadas y la sincronización de fotos y videos del móvil, plantea un reto que se entiende resuelto con el trabajo que se está haciendo para la 5G inalámbrica. Una estrategia que se presenta en este marco, es el uso de un gran número de antenas, por lo que es necesario cuanto antes conocer y estar preparado para este nuevo paradigma. Este artículo hace una revisión de las tecnologías que tienen el foco de atención en la actualidad y que se enmarcan en la denominación MIMO de gran escala, entre los que se encuentran MIMO masivo y MIMO de dimensiones completas.

PALABRAS CLAVE

5G, MIMO de gran escala, MIMO masivo, FD-MIMO, comunicaciones inalámbricas

MIMO systems with a large number of antennas: a key factor for a 5G wireless network

ABSTRACT

The demand for high speeds and capabilities in wireless data communication, together with an increasing traffic of services such as high definition video, video phone calls, and synchronization of photos and videos from mobile phones, pose a challenge that is expected to

Recibido: 10/04/2015 Aceptado: 29/05/2015

* El proyecto trabaja en el problema de la detección en sistemas MIMO con multiplexación espacial cuando en las estaciones base se emplea un gran número de antenas para atender a un creciente número de dispositivos, lo que es conocido como L-MIMO (Large MIMO) en la búsqueda de un esquema de detección de baja complejidad y prestaciones aceptables, analizando la aplicación de algoritmos, metaheurísticas y en general *soft computing*.

<http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2015v11n2.22240> Este es un artículo Open Access bajo la licencia BY-NC-SA (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Cómo citar este artículo: AGREDO-MÉNDEZ, Guefry Leider; JOJOA-GÓMEZ, Pablo Emilio; ALMENAR-TERRÉ, Vicenç. Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica. *En*: Entramado. Julio - Diciembre, 2015 vol. 11, no. 2, p. 250-261, <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2015v11n2.22240>



be overcome with the work being done to establish a 5G wireless network. Since one of the alternatives involves using a large number of antennas, there is a need to learn about and be prepared for this new paradigm as soon as possible. This article provides a review of various technologies that have currently become the center of attention and conform with the denomination of large scale MIMO systems, including, among others: massive MIMO and full dimensional MIMO systems.

KEYWORDS

5G, Large-Scale MIMO system, Massive MIMO system, FD-MIMO system, Wireless Communications

Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para a 5G sem fio

RESUMO

A procura por maiores velocidades e capacidades em comunicações de dados sem fio, com o tráfego crescente de serviços como o vídeo de alta definição, as videochamadas e a sincronização de fotos e vídeos no celular, representam um desafio que se considera resolvido com o trabalho que está sendo feito para a 5G sem fio. Uma estratégia que é apresentada nesse quadro é o uso de um grande número de antenas, pelo que é necessário o quanto antes conhecer e estar preparado para este novo paradigma. Esse artigo faz uma revisão das tecnologias que colocam seu foco de atenção na atualidade e se enquadram na denominação MIMO de grande escala, entre os quais se encontram: MIMO Massivo e MIMO de dimensões completas.

PALAVRAS-CHAVE

5G, MIMO de grande escala, MIMO massivo, FD-MIMO, comunicações sem fio

Introducción

La explosión de los datos móviles ha conllevado la búsqueda de mayores velocidades para satisfacer las demandas de servicios como videollamadas, video móvil de alta definición y sincronización de fotos y videos de móviles; de igual forma la proliferación de dispositivos como *tablets*, *smartphones* y *gadgets*, hace que se requiera una mayor capacidad en las redes, sean estas fijas, como WiFi 802.11n/ac (Nassir, Mustaqim, & Khawaja, 2014), o móviles como HSPA+ o LTE; inclusive se ha necesitado de desbordamientos de la red móvil en redes WiFi con estrategias como la conocida *WiFi Offload* (Sraga, Momcilovic, & Tekovic, 2014). Lo anterior se traduce en un crecimiento exponencial del tráfico que puede apreciarse en reportes como el del pronóstico global de datos móviles (Cisco, 2015) donde se muestra cómo el video móvil superó el 50% del total del tráfico de datos por primera vez en 2012 y cómo este mismo llegó al 55% para finales de 2014.

De esta forma, iniciativas como el Proyecto METIS (Osseiran, Boccardi, Braun, & Kusume, 2014) buscan responder a las proyecciones de crecimiento en aspectos como volúmenes de datos móviles (x1000), velocidades de usuario (x100), duración de baterías (x10), número de dispositivos conectados (x100) para atender las demandas de tráfico de las futuras comunicaciones y en especial las de tipo Máquina a Máquina (M2M, *Machine-to-Machine*) en las que millones

de dispositivos inteligentes se interconectarán en escenarios tales como: Sistemas Inteligentes de Transporte, *Smart Grid*, Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*), e-salud y Domótica, entre otros; para los que la capacidad y velocidad de las redes actuales será insuficiente (Mehmood, Haider, Afzal, & Younas, 2013). Lo anterior ha conminado a la búsqueda de soluciones tecnológicas que puedan hacerle frente a esta necesidad, las cuales se han recogido en lo que ahora se denomina como la quinta generación móvil o 5G (Andrews, et al., 2014).

En el panorama mundial, una de las soluciones para atender las necesidades planteadas se soporta en el empleo de la tecnología de múltiples antenas en el transmisor y en el receptor conocida como de Múltiple-Entrada Múltiple-Salida (MIMO, *Multiple-Input Multiple-Output*), pero con el uso de un elevado número de antenas. El empleo de MIMO en tecnologías como WiFi, HSPA+ y LTE ha permitido mejorar en gran medida la fiabilidad del enlace y aumentar la capacidad general del sistema. MIMO se ha utilizado en diversos estándares de comunicación inalámbrica de tercera generación (3G) y cuarta generación (4G). Aunque la mayoría de los sistemas MIMO actuales utilizan arreglos de 2x2 hasta 8x8 antenas, las propuestas de aumentar el número de antenas tienen como objetivo aprovechar las grandes ganancias de capacidad que surgirían en matrices más grandes (con decenas o cientos de antenas). Este nuevo paradigma se conoce como MIMO de gran escala (L-MIMO, *Large MIMO*) abar-

cando tecnologías como MIMO Masivo (M-MIMO, *Massive MIMO*) y MIMO de Dimensiones Completas (FD-MIMO, *Full-Dimension MIMO*).

Estos sistemas L-MIMO proporcionan una gran cantidad de ventajas sobre los sistemas MIMO convencionales, como tasas más altas de datos, mayor fiabilidad de enlace, y un mejor equilibrio entre la eficiencia espectral y la eficiencia energética. En los sistemas L-MIMO, la transmisión de energía se puede optimizar mediante la explotación de los muchos grados de libertad ofrecida por los múltiples elementos de antena, mientras que problemas aleatorios como el ruido térmico y la interferencia co-canal disminuyen su impacto notablemente.

El presente artículo hace la revisión de las tecnologías MIMO Masivo y MIMO de Dimensiones Completas, cada una en una sección separada, luego de lo cual se tratan los trabajos sobre detección de señal, problemática que comparten ambas y en donde se enfoca el proyecto marco del cual se genera este artículo; se finaliza con las conclusiones.

I. MIMO Masivo

MIMO Masivo (*Massive MIMO*) se refiere al uso de una gran cantidad de antenas (decenas a centenas) en la estación base para atender a múltiples equipos de usuario con una sola antena (es lo usual, para no incrementar complejidad) en el mismo intervalo de tiempo-frecuencia, pensado para funcionar con Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time-Division Duplex*) combinado con pilotos en el *uplink* que permitan realizar la estimación del estado del canal (CSI, *Channel State Estimation*) teniendo en cuenta la interferencia entre celdas, la sobrecarga y los errores relacionados con la información del estado del canal; soportándose sobre una base asintótica en el límite de un número infinito de antenas se llega a una serie de conclusiones matemáticamente exactas, que apuntan a dar solución a las expectativas de los sistemas 5G (Marzetta T., 2015). Particularmente se minimizan los efectos del ruido no correlacionado y del desvanecimiento rápido, la velocidad efectiva en la celda aumenta, el número de terminales no limita el tamaño de las celdas, la eficiencia espectral es independiente del ancho de banda y se disminuye la energía requerida por bit (Marzetta T., 2010).

En la práctica no es posible tener un número infinito de antenas en la estación base, y acomodar decenas o centenas de las mismas representa un reto para el diseño y para la realidad práctica comercial, en especial en bandas inferiores a los 6 GHz; sin embargo, a diferencia de los sistemas 4G en los que hay un espacio limitado para acomodar antenas directivas acimutalmente y el uso de MIMO mono-usuario se encuentra restringido por el número limitado de antenas

que se pueden acomodar en los dispositivos móviles, en MIMO Masivo las estaciones base son las que se encargan de la gran cantidad de antenas y el uso de TDD permite la estimación del estado del canal a través de los pilotos del *uplink* por la reciprocidad del mismo; además se prevé el reemplazo de las estaciones base actuales con sistemas con una gran cantidad de antenas de baja ganancia y montajes tales como arreglos planares que se puedan ubicar en las fachadas de los edificios (Boccardi, Heath, Lozano, Marzetta & Popovski, 2014); de esta forma ha ganado eco en la comunidad científica global y en organismos muy representativos como el 3GPP, convirtiéndose en un nicho importante para la investigación con repercusiones en estandarización. Los beneficios que a continuación se detallan habilitan a la tecnología MIMO Masivo para ser parte de las redes de comunicación inalámbrica de 5G (Wang *et al.*, 2014).

La investigación realizada hasta el momento en el área de MIMO Masivo indica que el contar con una gran cantidad de antenas en la estación base, lo perfila evidentemente como solución a las necesidades de 5G al ofrecer beneficios tales como: mayor eficiencia espectral y aumento en la capacidad del sistema y en las velocidades de datos a los usuarios (Larsson, Edfors, Tufvesson, & Marzetta, 2014) (Huh, Caire, Papadopoulos, & Ramprasad, 2012) (Marzetta & Ashikhmin, 2010); la existencia de una gran cantidad de antenas y el procesamiento que se hace con las mismas, conlleva a que el nivel de potencia requerido sea menor que el de los sistemas convencionales, de tal forma que enmarca a esta tecnología en las que se han denominado comunicaciones verdes (*Green Communications*) (Lu, Li, Swindlehurst, Ashikhmin, & Rui, 2014) (Björnson, Sanguinetti, Hoydis, & Debbah, 2014) (Ngo, Larsson, & Marzetta, 2013); se tienen mejoras en la seguridad por la inherente mayor complejidad del nivel físico, el trabajo con haces estrechos dinámicos y canales ortogonales en contexto multi-usuario haciendo a la tecnología robusta por naturaleza frente a ataques como la escucha pasiva (Kapetanovic, Zheng, & Rusek, 2015) (Jun, Schober, & Bhargava, 2013) (Dean & Goldsmith, 2013); el sistema goza de una mayor confiabilidad al disminuir notablemente los efectos del ruido no correlacionado y el desvanecimiento rápido (Larsson, Edfors, Tufvesson, & Marzetta, 2014) (Mehmood, Afzal, Ahmad, & Younas, 2013) (Rusek, *et al.*, 2013) y el último beneficio importante para anotar es el logro de una mayor robustez en el sistema, pues, la gran cantidad de antenas disminuye el impacto que una falla en alguna de ellas pueda tener en el funcionamiento general del mismo (Larsson, Edfors, Tufvesson, & Marzetta, 2014) (Lu, Li, Swindlehurst, Ashikhmin, & Rui, 2014).

De igual forma, MIMO Masivo implica nuevos retos que abren una serie de posibilidades para la investigación y el desarrollo de la ingeniería, entre estos se encuentran: primero la contaminación de pilotos, pues, el movimiento del

usuario impone un intervalo de coherencia finito durante el cual el conocimiento del canal debe ser adquirido y utilizado, y por consiguiente hay un número limitado de secuencias piloto ortogonales que se pueden asignar a los dispositivos. La reutilización de pilotos provoca una contaminación que crece con el número de antenas, además estas secuencias ortogonales deben ser reutilizadas en celdas adyacentes (Hoydis, Debbah, & ten Brink, 2013) (Jose, Ashikhmin, Marzetta, & Vishwanath, 2011) (Marzetta T., 2010), particularmente en este tema entre las soluciones propuestas para mejorar el desempeño de sistema se encuentra una estrategia basada en asignar los pilotos con menor interferencia entre celdas a los usuarios con menor calidad de canal de una manera secuencial (Zhu, Wang, Wang, Dai, & Qian, 2015), otra estrategia propone conjuntos de pilotos idénticos para usuarios centrales y conjuntos mutuamente ortogonales para los usuarios de los bordes en celdas diferentes (Yan, Yin, Xia, & Wei, 2015); adicionalmente se ha logrado establecer la capacidad de usuarios del sistema en regímenes que sufren de esta contaminación inherente a la naturaleza de la tecnología (Shen, Zhang, & Letaief, 2015); como segundo reto está la mayor sensibilidad a la alineación de haces, esto porque al trabajar con haces tan estrechos, se aumenta el impacto del movimiento de los usuarios o el balanceo del grupo de antenas por diversas causas (Hoydis, Debbah, & ten Brink, 2013) (Jose, Ashikhmin, Marzetta, & Vishwanath, 2011); y como tercero se tiene una mayor complejidad en el procesamiento de señal, específicamente cuando la celda puede necesitar atender un mayor número de dispositivos de usuario y la cantidad de antenas de recepción en la estación base se aproxima o llega a ser igual a la cantidad de antenas de los equipos de usuario, de tal forma que se requiere de algoritmos de detección rápidos, lo que implica baja complejidad, ante el nuevo contexto de operación con matrices masivas (Lu, Li, Swindlehurst, Ashikhmin, & Rui, 2014) (Rusek, et al., 2013); de esta forma el proceso que se realiza en el receptor para detectar los símbolos que llevan la información por el medio inalámbrico se torna extremadamente complejo y al seguir los esquemas tradicionales de los sistemas MIMO de bajo orden resultan en tiempos de ejecución muy elevados que hacen inviable su implementación práctica (Larsson, Edfors, Tufvesson, & Marzetta, 2014), pues, no atienden con efectividad la demanda de un procesamiento de señal rápido que permita aprovechar los beneficios aportados con las tecnologías conseguidos por el elevado número de antenas en capacidad, velocidad, disponibilidad y consumo energético. La sección 4 detalla el trabajo que se ha venido haciendo en torno a este tercer reto.

Es importante resaltar que MIMO Masivo opera en un contexto MIMO multi-usuario (MU-MIMO, *Multi-user MIMO*), en el cual al downlink y al uplink se les conoce respectivamente como canal de difusión (BC, *Broadcast Channel*)

y canal de acceso múltiple (MAC, *Multiple Access Channel*). Como en el MAC los flujos de datos de los diferentes usuarios independientes están disponibles para cada antena receptora en la estación base, el sistema MIMO multi-usuario es equivalente, en el uplink, a un sistema MIMO mono-usuario (SM-MIMO, *Single-user MIMO*) cuando se tiene una sola antena en cada equipo de usuario. Para el downlink sí se hace necesario un tratamiento especial y diferente, en este caso la estación base transmite los flujos de datos multi-usuario haciendo una difusión a partir de la que los equipos de usuario deben hacer su proceso de detección y decodificación para extraer su propia información (Cho, Kim, Yang, & Kang, 2010); esto influye en los tipos y esquemas de detección para cada caso.

La importancia que exhibe MIMO Masivo para lograr las metas de 5G se evidencia en el hecho que desde hace algunos años diferentes eventos de importancia y reconocimiento mundial dediquen su programa, o al menos una sesión (track) del mismo a tratar el tema y porque el potencial tecnológico del uso del gran número de antenas ha logrado impulsar el desarrollo de implementaciones reales para obtener datos reales que permitan llevar la tecnología a la práctica y convertirla en una realidad, favoreciendo procesos como la prueba de algoritmos y del diseño de circuitos.

Estos bancos de pruebas (*testbeds*) que mejoran el entendimiento general de la tecnología y hacen evidente sus beneficios, se convierten en prueba del concepto, lo que favorece su aceptación con fines de estandarización. De esta forma, con la coordinación de la Universidad de Rice en Texas y el aporte de la Universidad de Yale, Bell Labs, Alcatel-Lucent y Google, se encuentra el testbed conocido como Argos el cual demostró con un prototipo inicial de 64 antenas el aumento de 10 veces la capacidad del sistema frente a uno estándar (Shepard, Yu, Zhong, & Lin, 2013); este es un proyecto realizado en fases y en la actualidad cuenta con un arreglo de 96 antenas (Talbot, 2014) sobre el que se está soportando y realizando la experimentación. En la Figura 1 (Shepard, et al., 2013) (Ver pág. 254), se puede apreciar el montaje del arreglo de antenas de Argos en la fase reciente.

Por su parte, con la coordinación del Departamento de Tecnología Eléctrica y de la Información de la Universidad del Lund y el aporte de la Universidad de Linkopings en Suecia, se ha venido trabajando en la construcción de testbeds con arreglos de más de 100 elementos de antena; de este trabajo sobresalen dos prototipos: uno es el arreglo circular de 128 antenas con frecuencia central de 2,6 GHz cuyo montaje real sobre un edificio de la Universidad de Lund se puede apreciar en la Figura 2 (Flordelis, Gao, Dahman, Rusek, Edfors, & Tufvesson, 2015), (Ver pág. 254) con el cual ha sido posible demostrar que incluso los usuarios en condiciones

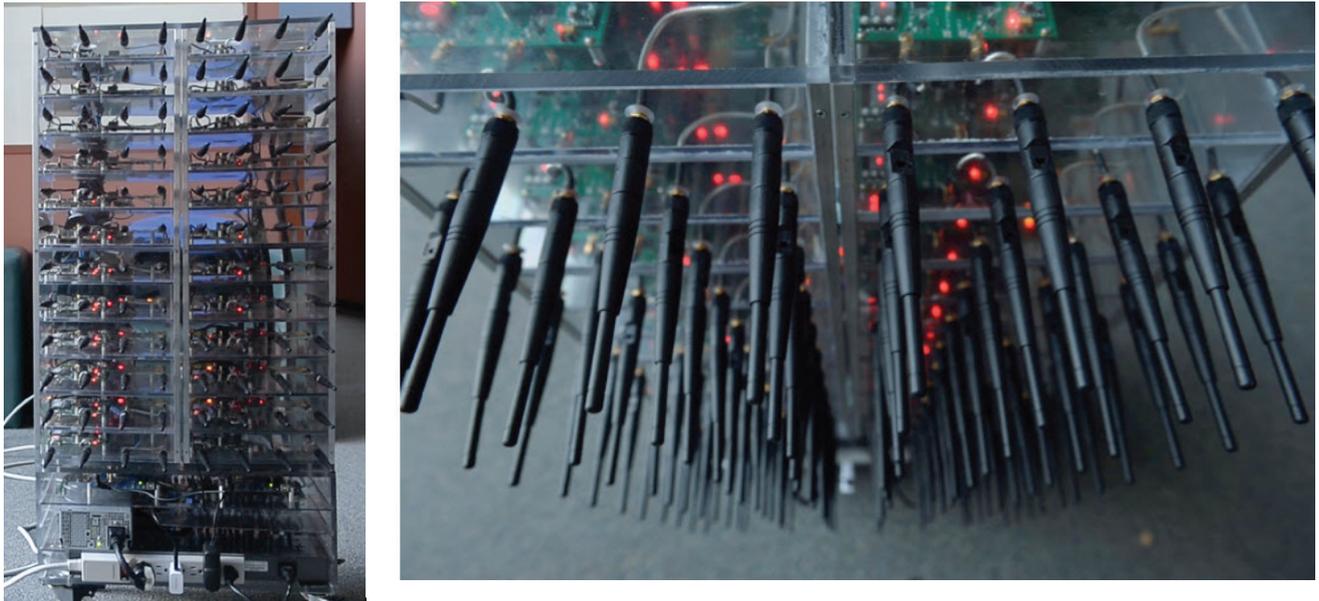


Figura 1. Arreglo masivo de 96 antenas – Argos. Izquierda: Vista frontal. Derecha: Vista superior
Fuente: Shepard, et al. (2013)



Figura 2. Prototipo en arreglo circular de 128 antenas sobre la Universidad de Lund.

Fuente: Flordelis, Gao, Dahman, Rusek, Edfors, & Tufvesson, (2015)

de línea de vista que se encuentren situados próximos uno del otro reciben los beneficios de MIMO Masivo.

El otro es el arreglo rectangular plano escalable de 128 a 160 antenas con frecuencia central de 3,7 GHz, que cuenta con el apoyo de National Instruments, y al cual se le conoce

como el LuMaMi (*Lund University Massive Mimo*) Tesbed. Se encuentra dispuesto como un panel de 60 cm x 120 cm que, como se aprecia en la Figura 3 (Luther, 2015), (Ver pág. 255) se parece en tamaño a un televisor de pantalla plana de 53 pulgadas, que perfectamente puede ser ubicado en la terraza o fachada de un edificio.

Entre las características que se destacan de este *testbed* se tienen: es escalable, se encuentra construido sobre hardware actual, trabaja con anchos de banda usuales de 20 MHz, la pre-codificación y decodificación MIMO en tiempo real se distribuye a través de 50 FPGAs Xilinx Kintex-7 interconectadas con PCI-Express, logrando una elevada velocidad de procesamiento de datos en banda base del orden de 384 Gbps tanto en la transmisión como en la recepción y ofreciendo una arquitectura de baja latencia en la estimación del canal para efecto de pre-codificación del orden de 500 micro segundos (Vieira, et al., 2014).

Los anteriores bancos de pruebas han permitido considerar retos adicionales para la implementación práctica de MIMO Masivo, entre otros: la cantidad de convertidores de analógico a digital (ADC, *Analog-to-Digital Converter*) que se requieren por cada antena, su interconexión, las velocidades de procesamiento de los mismos, y el diseño, espacio y distribución para acomodar tanta cantidad de antenas (Luther, 2015); este último aspecto es uno de los que ha llevado a considerar el desarrollo de la tecnología de MIMO Masivo en frecuencias de las ondas milimétricas (mmWave, *millimeter Wave*) (Swindlehurst, Ayanoglu, Heydari, & Capolino, 2014) (Talwar, Choudhury, Dimou, Aryafar, Bangerter, & Stewart, 2014) por el tamaño considerablemente más reducido de las antenas, y los enormes anchos de banda que se consiguen en este rango de frecuencias que aunque histó-



Figura 3. Prototipo LuMaMi en arreglo rectangular plano escalable de 128 - 160 antenas.

Fuente: Luther (2015)

ricamente ha sido considerado inconveniente para uso en redes móviles celulares por problemas de propagación que llevan a alcances más cortos y restricciones para cobertura sin línea de vista, en la actualidad los estudios realizados sobre estas ondas las han vuelto a ubicar en escenario y las han convertido en candidatas para atender las demandas de 5G (Roh et al., 2014) (Karjalainen Nekovee, Benn, Kim, Park, & Sungsoo, 2014) (Rappaport, et al., 2013).

2. MIMO de Dimensiones Completas

Con la misma intención de responder al rápido crecimiento del tráfico de datos generado por los dispositivos móviles y los desafíos que se generan para la capacidad de las redes móviles, el 3GPP introdujo las tecnologías de MIMO y MIMO multi-usuario para su uso en LTE y en LTE Avanzado y de esta forma lograr el aumento en la eficiencia espectral. En las redes LTE actuales el nodo B evolucionado (eNB, e *Node B*) normalmente cuenta con un arreglo lineal de antenas dispuesto en forma acimutal por lo que el eNB aprovecha la diversidad espacial en el eje horizontal. MIMO de Dimensiones Completas (FD-MIMO, *Full Dimension MIMO*) por su parte introduce adicionalmente antenas en el eje vertical (Nam, Ng, Sayana, Li, & Zhang, 2013) lo que le permite al eNB contar con diversidad en los dos ejes, especialmente en el dominio de elevación, razón por la cual también se le conoce como de conformación de haz de elevación (EBF, *Elevation BeamForming*), de esta manera acomoda un gran número de antenas que se organizan en un panel con arreglo en dos dimensiones (2D) para establecer enlaces espacialmente separados con los dispositivos móviles. El arreglo 2D no solo posibilita la atención con haces dirigidos hacia arriba o hacia abajo, sino que además habilita que el dominio del acimut (*azimuth beamforming*) también pueda ser explotado y así atender a los equipos de usuario que se encuentren a izquierda o derecha del eNB, como se ilustra en la Figura 4 (Xu, Li, Nam, & Zhang, 2014), (Ver pág. 256).

La idea es usar portadoras con inclinación específica hacia los equipos de usuario y la conformación de haces de ancho variable, con lo cual se logra aumentar la calidad del enlace y reducir la interferencia intra e inter celda traduciéndose en mayores tasas de datos o aumento de la cobertura, en especial en el borde de la celda (Kim, et al., 2014).

La estandarización actual del 3GPP soporta MIMO de hasta 8 antenas, pero el trabajo con FD-MIMO se orienta al soporte de bloques de 16, 32 y hasta 64 (de aquí la relación con MIMO Masivo) lo que se vuelve un límite en LTE, pero se considera que se hará aún más relevante con el uso de frecuencias más altas en el futuro donde los elementos de antena puedan ser miniaturizados y aumentar el número de

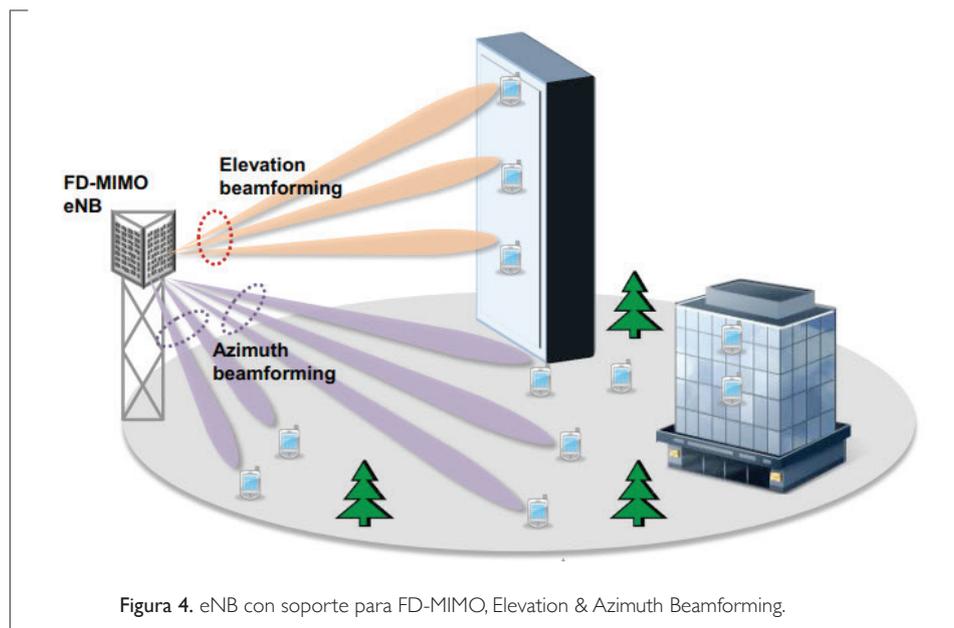


Figura 4. eNB con soporte para FD-MIMO, Elevation & Azimuth Beamforming.
Fuente: Xu, Li, Nam, & Zhang (2014)

los mismos para permitir órdenes de centenares y aprovechar aún más los beneficios de lo masivo.

FD-MIMO es una de las tecnologías claves actualmente en estudio y desarrollo por el 3GPP, así primero en el Workshop de Barcelona FD-MIMO se identificó y aceptó como tecnología potencial para aumentar la eficiencia espectral en las actuales redes 4G, pero más aún para la evolución hacia 5G (3GPP, 2012) y también se direccionó un trabajo que se completó recientemente sobre modelos de canal en tres dimensiones (3D) para soportar las evaluaciones de FD-MIMO al usar los arreglos de antenas en 2D (3GPP, 2014) y en diciembre de 2014, en reunión llevada a cabo en Maui (Estados Unidos) se concretó con el auspicio de Samsung (encargado del *Uplink*) y Nokia Networks (encargada del *Downlink*) este ítem de estudio consolidando aún más su importancia para el desarrollo de los sistemas 5G (3GPP, 2014). Para el presente año, según reporte del Chairman del 3GPP RAN, las tecnologías EBF y FD-MIMO hacen parte de un proyecto aprobado para la evolución de LTE en su Release 13 que está agendado para ser finalizado en 2016 (Flore, 2015).

Un aspecto muy importante que se resalta con intención de ser tenido en cuenta por la comunidad académica, es que tradicionalmente organismos como el 3GPP han utilizado modelos espaciales de canal bidimensionales (2D SCMs, *Spatial Channel Models*) en la sección transversal horizontal de los canales inalámbricos, para evaluar las tecnologías que operan con antenas dispuestas horizontalmente. Sin embargo, para la evaluación y el diseño de FD-MIMO, tales canales 2D no son adecuados y se hace necesario trabajar con mo-

delos de canal espaciales tridimensionales (3D SCMs). Estos modelos de canal 3D tienen en cuenta la dirección del azimut y la dirección de la elevación en la propagación de la señal entre la estación base y los equipos de usuario (Cheng & Chen, 2014) (Jiang, Hosseinian, Lee, & Stern-Berkowitz, 2013). La Figura 5 (Kammoun, Khanfir, Altman, Debbah, & Kamoun, 2014) ilustra el concepto tradicional 2D y el nuevo 3D que se hace necesario para FD-MIMO. (Ver pág. 257).

Para poder explotar como es debido los beneficios de la conformación de haces mejorada y la multiplexación espacial de FD-MIMO, los nodos B mejorados (eNB) que implementen esta tecnología deben trabajar en escenarios que posibiliten una mejora en el desempeño del sistema. Los escenarios ideales son aquellos en los que se deben orientar los haces con desplazamiento vertical, en la práctica muchos de los equipos de usuarios se encuentran en los diferentes pisos de los edificios de apartamentos o de oficinas, por lo cual es evidente el nicho para la tecnología. Otro escenario importante es aquel donde se tiene una elevada concentración de usuarios: centros comerciales, estadios, teatros, salas de conciertos, aeropuertos, estaciones de trenes o de buses; en estos sitios es notoria la mejora que ofrecería el sistema FD-MIMO al poderse realizar transmisiones para múltiples usuarios soportadas en el arreglo de antenas 2D tomando ventaja de la direccionalidad de los haces, así podrían entonces aparecer instalaciones en las que los arreglos de antenas se ubicaran en el techo del sitio con haces apuntando hacia abajo para hacer la mayor cantidad de transmisiones de MIMO multi-usuario (Kim Y. Ji, Lee, Lee, Ng, & Zhang, 2013).

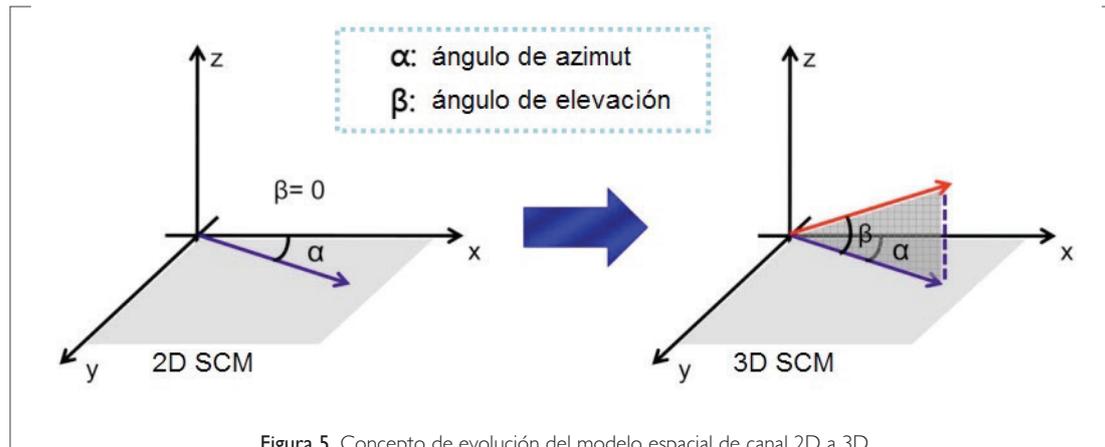


Figura 5. Concepto de evolución del modelo espacial de canal 2D a 3D
Fuente: Kammoun, Khanfir, Altman, Debbah, & Kamoun (2014)

Los principales desafíos que se consideran en FD-MIMO y que revisten interés tanto para la industria como para la academia se pueden resumir en: armonizar la existencia de un haz amplio para información de control de celda con un haz estrecho para la comunicación de datos con el equipo del usuario y lograr un indicador de la calidad del canal adecuado; estimar de forma precisa el gran número de canales y reducir la complejidad de dicha estimación con un procesamiento de señal eficiente que permita una detección de señal rápida y efectiva; agendar de forma óptima los equipos de usuario en contexto MIMO multi-usuario sin entrar en aumentos exponenciales en la complejidad. Con la atención efectiva de lo anterior, FD-MIMO se convierte en una tecnología promisoría que exhibe posibilidades como ganancias en velocidad y cobertura de hasta cinco veces lo que se logra en el momento con los sistemas LTE 4G (Li et al., 2013).

3. Detección L-MIMO de Baja Complejidad

En esta sección se hace una revisión de los trabajos realizados en la problemática de la detección de señal rápida y eficiente que comparten tanto MIMO Masivo como FD-MIMO, esta detección de baja complejidad es necesaria para obtener resultados que permitan aprovechar los beneficios de la tecnología que en este contexto debe lidiar con arreglos de decenas o centenas de antenas, a cambio de lograr confiabilidad y altas tasas de datos en las futuras redes inalámbricas.

Así, una de las líneas de continua investigación es la detección de señal en el extremo receptor en sistemas MIMO, el algoritmo de máxima verosimilitud (ML, *Maximum Likelihood*) es el referente como solución óptima (Biglieri, Calderbank, Constantinides, Goldsmith, & Paulraj, 2007), pero dada su alta complejidad se considera como un problema de tiempo polinomial no-determinístico (NP, *Non-determinis-*

tic Polynomial time) difícil (*NP-hard*). Este problema puede visualizarse como un árbol de decisión, para el que se han planteado diversas técnicas entre las cuales se encuentran: ZF (*Zero Forcing*), ZF-SIC (*ZF with Successive Interference Cancellation*), MMSE (*Minimum Mean Square Error*), MMSE-SIC (*MMSE with Successive Interference Cancellation*) y las que han logrado aproximaciones a ML como SD (*Sphere Decoding*) o FCSD (*Fixed-Complexity Sphere Decoder*) (Larsson, 2009).

Aunque la teoría matemática de MIMO Masivo (Marzetta T., 2010) indica que se pueden obtener resultados satisfactorios con detectores lineales como ZF y MMSE, también establece que estos sólo se lograrían con un número infinito de antenas en recepción en la estación base, lo cual es prácticamente inviable.

Ahora bien, se considera entonces el desarrollo de sistemas con M antenas de recepción en la estación base interactuando con las antenas de los K equipos de usuario en un sistema de la forma que $M \gg K$, sin embargo, como lo establece (Rusek, et al., 2013) en la actualidad, despliegues que puedan operar en condición $M \approx K$ son importantes en sistemas prácticos reales y con muchos usuarios, por lo que es en este espacio donde reside el interés de investigación que genera este artículo, buscando técnicas de detección de baja complejidad en sistemas L-MIMO que logren un procesamiento rápido, particularmente en la frontera de $M=K$ algo que puede presentarse en cualquier momento en la celda y define el caso más complejo, para lograr detectores que alcancen un desempeño similar al que se obtiene con detectores lineales como MMSE pero con una complejidad reducida.

Como la complejidad de la detección de señal es evidentemente mayor cuando se tienen sistemas con un gran número de antenas como ocurre en L-MIMO, en la actualidad

reviste gran interés la búsqueda de la detección cuasi-óptima de baja complejidad para esta tecnología, más cuando se considera el gran potencial de proyección a futuro para poder atender la alta demanda de mayores velocidades de comunicación de datos por parte de los usuarios móviles. A los algoritmos actuales que se han utilizado en MIMO les surgen problemas de complejidad o desempeño cuando debe tratar con un gran número de antenas, pudiéndose aportar con la aplicación de técnicas basadas en otros algoritmos, metaheurísticas o en general, *soft computing*, algunas sub-óptimas pero de baja complejidad para hacer viable la implementación real de sistemas L-MIMO y en especial el aprovechamiento de sus beneficios (Lu, Li, Swindlehurst, Ashikhmin, & Rui, 2014).

En general, como se detalla a continuación, algoritmos que han funcionado muy bien en MIMO como los basados en detección esférica (SD) y reducción de retícula (LR) entre otros, elevan significativamente su complejidad cuando el número de antenas comienza a ser grande por lo que se han debido emplear otros enfoques, algunos de los cuales están basados en metaheurísticas o inteligencia computacional, para procurar baja complejidad.

Svac, Meyer, Riegler y Hlawatsch (2013) proponen un detector de baja complejidad para sistemas L-MIMO con constelaciones BPSK o QAM. El detector trabaja a nivel de bits y consta de tres etapas. Se hace uso de algoritmos de tipo "*soft-heuristic*" y se soportan mejoras de desempeño sobre algoritmos de detección actuales para sistemas L-MIMO. Datta, Ashok, Chockalingam, y Sundar Rajan (2013) proponen algoritmos de baja complejidad basados en cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC, *Markov Chain Monte Carlo*) para detección de señal y estimación de canal en el uplink en L-MIMO multiusuario, con cantidad de antenas en la estación base (BS, *Base Station*) y así mismo un gran número de usuarios. Zhou y Ma (2013) detallan el gran potencial de los sistemas L-MIMO para la próxima generación de comunicaciones inalámbricas. Se proponen algoritmos de reducción de retícula basada en elementos (ELR, *Element-Based Lattice Reduction*) que minimizan los elementos de la diagonal de la matriz de covarianza de ruido de detectores lineales y mejoran el rendimiento asintótico. Los algoritmos propuestos encuentran soluciones sub-óptimas a las reducciones, con baja complejidad y alto rendimiento frente a los detectores de baja complejidad existentes para sistemas L-MIMO.

Suthisopapan, Kasai, Imtawil y Meesomboon (2012) presentan el resultado de la aplicación de los códigos de comprobación de paridad de baja densidad no binarios (NBLDPC, *Non Binary Low Density Parity Check*) a sistemas L-MIMO. Se muestra que al incorporar detector de mínimo error cuadrático medio (MMSE, *Minimum Mean Squared Error*) de

baja complejidad y códigos NBLDPC este tipo de sistemas L-MIMO pueden conseguir una baja probabilidad de error de bit cerca del límite de la capacidad de MIMO ofreciendo un mejor desempeño frente a otros sistemas con los que hacen la comparación. Cirkic y Larsson (2014) proponen un método denominado marginación sub-espacial con supresión de interferencias (SUMIS, *Subspace Marginalization with Interference Suppression*), que ofrece un rendimiento notable a baja complejidad (determinista). Se indica un adecuado balance entre complejidad y rendimiento computacional, trabajando con un proceso inicial de organización que hace una selección de columnas de la matriz de canal.

Este algoritmo no implica ninguna búsqueda ni ramificación algorítmica, por lo que tiene un tiempo de ejecución predecible. Svac, Meyer, Riegler y Hlawatsch (2012) proponen un detector de baja complejidad para L-MIMO aplicado a BPSK y QAM, funciona en el nivel de bits y exhibe ventajas para sistemas L-MIMO, se compone de tres etapas, la primera realiza la detección parcial de máxima verosimilitud (ML, *Maximum Likelihood*), la segunda hace la generación de valores flexibles, y la tercera desarrolla un proceso de optimización genética; en la última etapa el algoritmo de programación genética utiliza los valores suaves calculados por la segunda etapa; los resultados de simulación demuestran que para L-MIMO, el detector entrega mejores resultados que el de los detectores del momento frente a los que se compara. Zhou y Ma (2012) exponen la técnica de reducción de retícula (LR, *Lattice Reduction*) dada su relativa baja complejidad y alto desempeño, porque indican que cuando el número de antenas es muy grande este tipo de detectores y los de cancelación sucesiva de interferencias (SIC, *Successive Interference Cancellation*) exhiben un resultado que se mantiene distante frente al detector óptimo de máxima verosimilitud (MLD, *Maximum Likelihood Detector*) por lo que ante esta situación desarrollaron los detectores LR de tipo K-best, lo que conlleva un aumento en la complejidad computacional. Es por eso que proponen un algoritmo LR de tipo K-best con menor complejidad, con el uso de una cola de prioridades, lo que lo hace conveniente para sistemas L-MIMO. Srinidhi, Datta, Chockalingam y Sundar Rajan (2011) proponen un algoritmo para detección de baja complejidad en L-MIMO basado en búsqueda local por capas que por la baja complejidad relativa de los algoritmos de búsqueda local se adecua a los sistemas L-MIMO, ajustándose convenientemente para relaciones señal a ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) moderadas a altas y requiriendo aumento en los símbolos en la definición de vecindad para baja SNR. Kumar, Chandrasekaran, Chockalingam y Sundar Rajan (2011) proponen el algoritmo MCMC aleatorio (R-MCMC, *Randomize - Markov Chain Monte Carlo*) como una variante del algoritmo de cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) y además se propone un algoritmo con un enfoque en selección al azar para escoger los vecto-

res candidatos a ensayar en una búsqueda local, presentan cómo la complejidad que ofrecen los algoritmos MCMC y R-MCMC es atractiva para sistemas L-MIMO.

Finalmente, algunos trabajos se han orientado a la aplicación de metaheurísticas; es así como Datta, Srinidhi, Chockalingam, & Sundar Rajan (2011) exhiben el aporte que para detección en sistemas L-MIMO ha tenido el algoritmo de búsqueda local denominado Búsqueda Tabú Reactiva (RTS, *Reactive Tabu Search*) y el algoritmo de Propagación de Creencias (BP, *Belief Propagation*), de la observación del comportamiento de los dos algoritmos mencionados se propone un esquema de algoritmo híbrido que aprovecha lo mejor de ambos y los resultados presentados evidencian mejoras al usarlos de esta manera. Li y Murch (2010) muestran un algoritmo de baja complejidad para detección de sistemas L-MIMO basados en el algoritmo de búsqueda ascendente de verosimilitud (LAS, *Likelihood Ascent Search*); con éste se generan diversas salidas y se trata de seleccionar la mejor. Las simulaciones demuestran que el algoritmo propuesto: Selección de Salida Múltiple-LAS (MOS-LAS, *Multiple Output Selection-LAS*) mantiene el mismo orden de complejidad del algoritmo LAS convencional, pero es superior en tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*), finalmente Chockalingam (2010) presentan y comparan en cuanto a BER, tres algoritmos de baja complejidad aplicables a sistemas L-MIMO, estos algoritmos incluyen la Búsqueda Ascendente de Verosimilitud (LAS, *Likelihood Ascent Search*) y la Búsqueda Tabú Reactiva (RTS), y uno de paso de mensajes basado en Propagación de Creencias (BP, *Belief Propagation*) perfilándolas como técnicas eficientes de baja complejidad a considerar para el diseño de sistemas L-MIMO de alta eficiencia espectral.

4. Conclusiones

La tecnología de MIMO Masivo ha abierto la posibilidad para el logro de beneficios importantes para los sistemas de comunicaciones móviles que serán necesarios en un futuro cercano, con velocidades más altas, mayores capacidades, mayor seguridad, menor consumo de energía, entre otros, pero el costo y las dificultades de implementación práctica establecen retos importantes que deben ser abordados generando nichos de investigación.

La búsqueda de soluciones para atender la cada vez más creciente demanda de velocidad en las redes móviles actuales y las proyecciones hacia 5G ha tenido que propender por formas de hacer viable la teoría de MIMO Masivo por las ventajas que ésta ofrece, a pesar de sus grandes dificultades de realización práctica y es interesante cómo esto a su vez se ha convertido en un impulsor del estudio de la operación de sistemas en bandas como las de mmWave

que inicialmente habían sido descartadas para aplicación al mundo móvil celular.

Particularmente la tecnología FD-MIMO llevará a la práctica beneficios de MIMO Masivo, al ser ya aceptada por el 3GPP para el futuro release 13; por tanto se hace necesario considerar su estudio y temas particulares como los nuevos modelos 3D que permiten trabajar tanto con el dominio acimutal como con el nuevo dominio de elevación.

La búsqueda de opciones para solventar la complejidad en la detección de señal en ambientes L-MIMO donde se usa un gran número de antenas, es viable, para lo que se requiere considerar formas que hagan eficientes el procesamiento computacional y lleve a la práctica sus beneficios, de allí que se tenga una oportunidad para la investigación en algoritmos que ofrezcan baja complejidad con el aumento del nivel de procesamiento a realizar, considerando el uso de técnicas como ZF y MMSE (sin SIC) dada su bajo tiempo de ejecución para ser la primera etapa de algoritmos híbridos que en la segunda mejoren su desempeño, con la aplicación de técnicas diversas como metaheurísticas y en general *soft-computing*.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Cauca, Departamento de Telecomunicaciones, Grupo de Investigación Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones-GNTT y a la Universidad Politécnica de Valencia (España), Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia-iTEAM, Grupo de Integración de Sistemas Electrónicos Digitales-GISED, por el soporte para el desarrollo de este trabajo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias bibliográficas

1. ANDREWS, J., BUZZI, S., CHOI, W., HANLY, S., LOZANO, A., SOONG, A., y ZHANG, J. What Will 5G Be? In: IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Junio, 2014. vol. 32, no. 6, p. 1065-1082
2. BIGLIERI, Ezio, CALDERBANK, Robert, CONSTANTINIDES, Anthony, GOLDSMITH, Andrea, PAULRAJ, Arogyaswami y POOR, Vincent. MIMO Wireless Communications. New York: Cambridge University Press, 2010. p. 34-35
3. BJÖRNSON, E., SANGUINETTI, L., HOYDIS, J., y DEBBAH, M. Designing Multi-User MIMO for Energy Efficiency: When is Massive MIMO the Answer? In: IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). (6-9, abril: Estambul, Turquía). Proceedings. 2014. p. 242-247

4. BOCCARDI, F., HEATH, R., LOZANO, A., MARZETTA, T., y Popovski, P. Five disruptive technology directions for 5G. In: IEEE Communications Magazine. Febrero, 2014. vol. 52, no. 2, p. 0163-6804
5. CHENG, Y.-S. y CHEN, C.-H. A novel 3D beamforming scheme for LTE-Advanced system. In: 16th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS). (17-19, septiembre: Hsinchu, China). Proceedings. 2014. p. 1-6
6. CHO, Yong, KIM, Jaekwon, Yang, Won, y Kang, Chung. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. Singapore: John Wiley and Sons Ltd. 2010. p. 395
7. CHOCKALINGAM, A. Detection, Low-Complexity Algorithms for Large-MIMO. In: 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP). (17-19, septiembre: Limasol, Chipre). Proceedings. 2010. p. 1-6
8. CIRKIC, M. y LARSSON, E. SUMIS: A Near-Optimal Soft-Output MIMO Detector at Low and Fixed Complexity. In: IEEE Transactions on Signal Processing. Enero, 2014. vol. 62, no. 12, p. 3084-3097
9. CISCO. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013-2019. 2015. Disponible en: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html
10. DATTA, T., ASHOK, N., CHOCKALINGAM, A., y SUNDAR, B. A Novel Monte Carlo Sampling Based Receiver for Large-Scale Uplink Multiuser MIMO Systems. In: IEEE Transactions Vehicular Technology. Septiembre, 2013. vol. 62, no. 7, p. 3019-3038
11. DATTA, T., SRINIDHI, N., CHOCKALINGAM, A., y SUNDAR, B. A Hybrid RTS-BP Algorithm for Improved Detection of Large-MIMO M-QAM Signals. In: IEEE National Conference on Communication. (28-23, enero: Bangalore, India). Proceedings. 2011. p. 103-107
12. DEAN, T., y GOLDSMITH, A. Physical-Layer Cryptography Through Massive MIMO. In: IEEE Information Theory Workshop (ITW). (9-13, septiembre: Sevilla, España). Proceedings. 2013. p. 1-5
13. FLOREDELIS, J., GAO, X., DAHMAN, G., RUSEK, F., EDFORS, O., y TUFVESSON, F. Spatial Separation of Closely-Spaced Users in Measured Massive Multi-User MIMO Channels. In: IEEE International Conference on Communications (ICC). (9-13, septiembre: Londres, Reino Unido). Proceedings. 2015. p. 1441-1446
14. FLORE, Dino. Evolution of LTE in Release 13. 3GPP. 2015. Disponible en: <http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1628-rel13>
15. HOYDIS, J., DEBBAH, M., y TEN BRINK, S. Massive MIMO in the UL/DL of Cellular Networks: How Many Antennas Do We Need? In: IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Febrero, 2013. vol. 31, no. 2, p. 160-171
16. HUH, H., CAIRE, G., PAPADOPOULOS, H., y RAMPRASHAD, S. Achieving "Massive MIMO" Spectral Efficiency with a Not-so-Large Number of Antennas. In: IEEE Transactions on Wireless Communications. Julio, 2012. vol. 11, no. 9, p. 3226-3239
17. JIANG, M., HOSSEINIAN, M., LEE, M., y STERN-BERKOWITZ, J. 3D channel model extensions and characteristics study for future wireless systems. In: IEEE 24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). (8-11, septiembre: Londres, Reino Unido). Proceedings. 2013. p. 41-46
18. JOSE, J., ASHIKHMIN, A., MARZETTA, T., y VISHWANATH, S. Pilot Contamination and Precoding in Multi-Cell TDD Systems. In: IEEE Transactions on Wireless Communications. Junio, 2011. vol. 10, no. 8, p. 2640-2651.
19. JUN, Z., SCHÖBER, R., y Bhargava, V. Secure transmission in multi-cell massive MIMO systems. In: IEEE Globecom Workshops. (9-13, diciembre: Atlanta, Estados Unidos). Proceedings. 2013. p. 1286-1291
20. KAMMOUN, A., KHANFIR, H., ALTMAN, Z., DEBBAH, M., y KAMMOUN, M. Preliminary Results on 3D Channel Modeling: From Theory to Standardization. In: IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Junio, 2014. vol. 32, no. 6, p. 1219-1229
21. KAPETANOVIC, D., ZHENG, G., y RUSEK, F. Physical layer security for massive MIMO: An overview on passive eavesdropping and active attacks. In: IEEE Communications Magazine. Junio, 2015. vol. 53, no. 6, p. 21-27
22. KARJALAINEN, J., NEKOVEE, M., BENN, H., KIM, W., PARK, J., y SUNGSOO, H. Challenges and opportunities of mm-wave communication in 5G networks. In: 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM). (2-4, junio: Oulu, Finlandia) Proceedings. 2014. p. 372-376.
23. KIM, Y., JI, H., LEE, H., LEE, J., NG, B. y ZHANG, J. Evolution beyond LTE-advanced with Full Dimension MIMO. In: IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). (9-13, junio: Budapest, Hungría) Proceedings. 2013. p. 111-115
24. KIM, Y., JI, H., LEE, J., NAM, Y., NG, B., TZANIDIS, I. y ZHANG, J. Full dimension MIMO (FD-MIMO): The next evolution of MIMO in LTE systems. In: IEEE Wireless Communications. Abril, 2014. vol. 21, no. 2, p. 90-100
25. KUMAR, A., CHANDRASEKARAN, S., CHOCKALINGAM, A., y SUNDAR, B. Near-Optimal Large-MIMO Detection Using Randomized MCMC and Randomized Search Algorithms. In: IEEE International Conference on Communications (ICC). (5-9, junio: Kyoto, Japón) Proceedings. 2011. p. 1-5
26. LARSSON, E. G. MIMO detection methods: How they work. In: IEEE Signal Processing Magazine. Mayo, 2009. vol. 26, no. 3, p. 91-95
27. LARSSON, E. G., EDFORS, O., TUFVESSON, F., y MARZETTA, T. L. Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems. In: IEEE Communications Magazine. Febrero, 2014. vol. 52, no. 2, p. 186-195
28. LI, P. y MURCH, R. D. Multiple Output Selection-LAS Algorithm in Large MIMO Systems. In: IEEE Communications Letters. Mayo, 2010. vol. 14, no. 5, p. 399-401
29. LI, Y., XIN, Y., DONG, M., XU, G., ZHANG, J., KIM, Y., y LEE, J. Implementation of full-dimensional MIMO (FD-MIMO) in LTE. In: Conference on Signals, Systems and Computers. (3-6, noviembre: Pacific Grove, Estados Unidos) Proceedings. 2013. p. 998-1003
30. LU, L., LI, G., SWINDLEHURST, A., ASHIKHMIN, A., y RUI, Z. An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges. In: IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. Abril, 2014. vol. 8, no. 5, p. 742-758.
31. LUTHER, E. 5G Massive MIMO Testbed: From Theory to Reality. National Instruments Corporation. Mayo, 2015. Disponible en <http://www.ni.com/white-paper/52382/en/>
32. MARZETTA, T. Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas. In: IEEE Transactions on Wireless Communications. Octubre, 2010. vol. 9, no. 11, p. 3590-3600
33. MARZETTA, T. Massive MIMO: An Introduction. In: Bell Labs Technical Journal. Marzo, 2015. vol. 20, p. 11-22
34. MARZETTA, T., y ASHIKHMIN, A. Beyond LTE: Hundreds of Base Station Antennas! In: IEEE Communication Theory Workshop (CTW). (10-12, mayo: Cancún, México) 2010.
35. MEHMOOD, Y., AFZAL, W., AHMAD, F., y YOUNAS, U. Large scaled multi-user MIMO system so called massive MIMO systems for future

- wireless communication networks. In: 19th International Conference on Automation and Computing (ICAC). (13-14, septiembre: Londres, Reino Unido) Proceedings. 2013. p. 1-4
36. MEHMOOD, Y., HAIDER, N., AFZAL, W., y YOUNAS, U. Impact of Massive MIMO systems on future M2M communication. In: IEEE Malaysia International Conference on Communications (MICC). (26-28, noviembre: Kuala Lumpur, Malasia) Proceedings. 2013. p. 534-537
 37. NAM, Y.-H., NG, B., SAYANA, K., LI, Y., y ZHANG, J. Full-Dimension MIMO for Next Generation Cellular Technology. In: IEEE Communications Magazine. Junio, 2013. vol. 51, no. 6, p. 172-179
 38. NASSIR, S., MUSTAQIM, M., y KHAWAJA, B. Antenna array for 5th generation 802.11ac Wi-Fi applications. In: High-capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies (HONET). (15-17, diciembre: Charlotte, Estados Unidos) Proceedings. 2014. p. 20-24
 39. NGO, H. Q., LARSSON, E., y MARZETTA, T. Energy and Spectral Efficiency of Very Large Multiuser MIMO Systems. In: IEEE Transactions on Communications. Febrero, 2013. vol. 61, no. 4, p. 1436-1449
 40. OSSEIRAN, A., BOCCARDI, F.; BRAUN, V.; KUSUME, K. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project. In: IEEE Communications Magazine. Mayo, 2014. vol. 52, no. 5, p. 26-35
 41. RAPPAPORT, T., SHU, S., MAYZUS, R., HANG, Z., AZAR, Y., WANG, K., y GUTIERREZ, F. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! In: IEEE Access. Mayo, 2013. vol. 1, p. 335 - 349.
 42. ROH, W., SEOL, J.-Y., PARK, J., LEE, B., LEE, J., KIM, Y., y Aryanfar, F. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results. In: IEEE Communications Magazine. Febrero, 2014. vol. 52, no. 2, p. 106-113
 43. RUSEK, F., PERSSON, D., KIONG, B., LARSSON, E. G., MARZETTA, T. L., EDFORS, O., y TUFVESSON, F. Scaling Up MIMO. In: IEEE Signal Processing. Enero de 2013. vol. 30, no. 1, p. 40-60
 44. SHEN, J., ZHANG, J., y LETAIEF, K. Downlink User Capacity of Massive MIMO Under Pilot Contamination. In: IEEE Transactions on Wireless Communications. Febrero, 2015. vol. 14, no. 6, p. 3183-3193
 45. SHEPARD, C., YU, H., ZHONG, L. ArgosV2: A Flexible Many-Antenna Research Platform. In: ACM 19th International Conference in Mobile Computing and Networking (MobiCom). (New York, Estados Unidos). Proceedings. 2013. p. 163-166
 46. SHEPARD, C., ZHONG, L., ANAND, N., YU, H., BEJARANO, O., KNIGHTLY, E., y ERRAN, L. Argos: Practical Massive-MIMO. (IEEE 802 Plenary). Noviembre, 2013. Disponible en <http://argos.rice.edu/pubs/Shepard-IEEE-802-HEV-11-13-1440.pptx>
 47. SRAGA, M., MOMCILOVIC, N., y TEKOVIC, A. Mobile data Wi-Fi offloading. In: IEEE 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MI-PRO). (26-23, mayo: Opatija, Croacia) Proceedings. 2014. p. 1648-1649
 48. SRINIDHI, N., DATTA, T., CHOCKALINGAM, A., y SUNDAR, B. Layered Tabu Search Algorithm for Large-MIMO Detection and a Lower Bound on ML Performance. In: IEEE Transactions on Communications. Noviembre, 2011. vol. 59, no. 11, p. 2955-2963
 49. SUTHISOPAPAN, P., KASAI, K., IMTAWIL, V., y MEESOMBOON, A. Approaching capacity of large MIMO systems by non-binary LDPC codes and MMSE detection. In: IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). (1-6, julio: Cambridge, Estados Unidos) Proceedings. 2012. p. 1712-1716
 50. SVAC, P., MEYER, F., RIEGLER, E., y HLAWATSCH, F. Low-complexity detection for large MIMO systems using partial ML detection and genetic programming. In: Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). (17-20, junio: Cesme, Turquía) Proceedings. 2012. p. 585-589
 51. SVAC, P., MEYER, F., RIEGLER, E., y HLAWATSCH, F. Soft-Heuristic Detectors for Large MIMO Systems. In: IEEE Trans. Signal Processing. Septiembre, 2013. vol. 61, no. 18, p. 4573-4586
 52. SWINDLEHURST, A., AYANOGLU, E., HEYDARI, P., y CAPOLINO, F. Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution? In: IEEE Communications Magazine. Septiembre, 2014. vol. 52, no. 9, p. 56-62
 53. TALBOT, D. A 96-Antenna System Tests the Next Generation of Wireless. Enero, 2014. Disponible en: <http://www.technologyreview.com/news/523686/a-96-antenna-system-tests-the-next-generation-of-wireless/>
 54. TALWAR, S., CHOUDHURY, D., DIMOU, K., ARYAFAR, E., BANGERTER, B., y STEWART, K. Enabling technologies and architectures for 5G wireless. In: IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). (1-6, junio: Tampa, Estados Unidos) Proceedings. 2014. p. 1-4
 55. 3GPP. Study on 3D Channel Model for Elevation Beamforming and FD-MIMO Studies for LTE. TSG RAN Plenary #58, R1-122034. Barcelona. 2012.
 56. 3GPP. Study on 3D channel model for LTE. TR 36.873. 2014.
 57. 3GPP. Study on Elevation Beamforming/Full-Dimension (FD) MIMO for LTE. 3GPP TSG RAN Meeting #66, RP-141831. Maui. 2014
 58. VIEIRA, J., MALKOWSKY, S., NIEMAN, K., MIERS, Z., KUNDARGI, N., LIU, L., y TUFVESSON, F. A Flexible 100-antenna Testbed for Massive MIMO. In: IEEE Globecom Workshop: Massive MIMO: From theory to practice. (8-12, diciembre: Austin, Estados Unidos) Proceedings. 2014. p. 287-293
 59. WANG, C.-X., HAIDER, F., GAO, X., YOU, X.-H., YANG, Y., YUAN, D., y HEPSAYDIR, E. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. In: IEEE Communications Magazine. Febrero, 2014. vol. 52, no. 2, p. 122-130
 60. XU, G., LI, Y., NAM, Y.-H., y ZHANG, C. Full-Dimension MIMO: Status and Challenges in Design and Implementation. In: IEEE Communication Theory Workshop (CTW). (25-28, mayo: Curaçao, Curaçao). 2014
 61. YAN, X., YIN, H., XIA, M., & Wei, G. Pilot sequences allocation in TDD massive MIMO systems. In: IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). (9-12, marzo: New Orleans, Estados Unidos) Proceedings. 2015. p. 1488-1493
 62. ZHOU, Q., y Ma, X. An Improved LR-aided K-Best Algorithm for MIMO Detection. In: IEEE Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). (25-27, octubre: Huangshan, China) Proceedings. 2012. p. 1-5
 63. ZHOU, Q., y Ma, X. Element-Based Lattice Reduction Algorithms for Large MIMO Detection. In: IEEE Journal Selected Areas in Communication. Febrero, 2013. vol. 31, no. 2, p. 274-286.
 64. ZHU, X., WANGWANG, Z., DAI, L., y QIAN, C. Smart Pilot Assignment for Massive MIMO. In: IEEE Communications Letters. Marzo, 2015. vol. 9, no. 9, p. 1644 - 1647