

MIMO Masivo en 5G: de la teoría a la realidad

Massive MIMO in 5G : from theory to reality

Ing. Renier Blanco Murga

Recibido: 03/2018 | Aceptado: 05/2018

PALABRAS CLAVE

MIMO Masivo
Antenas
Estación base
Estación móvil
5G

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 video llamadas y la sincronización de fotos y videos del móvil, plantea un reto que se considera resuelto con el trabajo que se está llevando a cabo en las redes inalámbricas de 5ta Generación (5G). 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. El presente artículo describe la tecnología denominada Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO Masivo) y tiene como objetivo mostrar la aplicabilidad de esta generación. Muestra como resultados las ganancias significativas que ofrece la capacidad de acomodar más usuarios a mayores velocidades de datos con mayor confiabilidad y consumiendo menos energía. Al utilizar la arquitectura de software NI MIMO Masivo, los investigadores pueden construir bancos de pruebas MIMO Masivo para prototipos de sistemas de antenas a gran escala, utilizando el galardonado software de diseño de sistemas LabVIEW y Radios Definidos por Software (SDR) de vanguardia.

KEYWORDS

Massive MIMO
antennas
Base station
Mobile station
5G

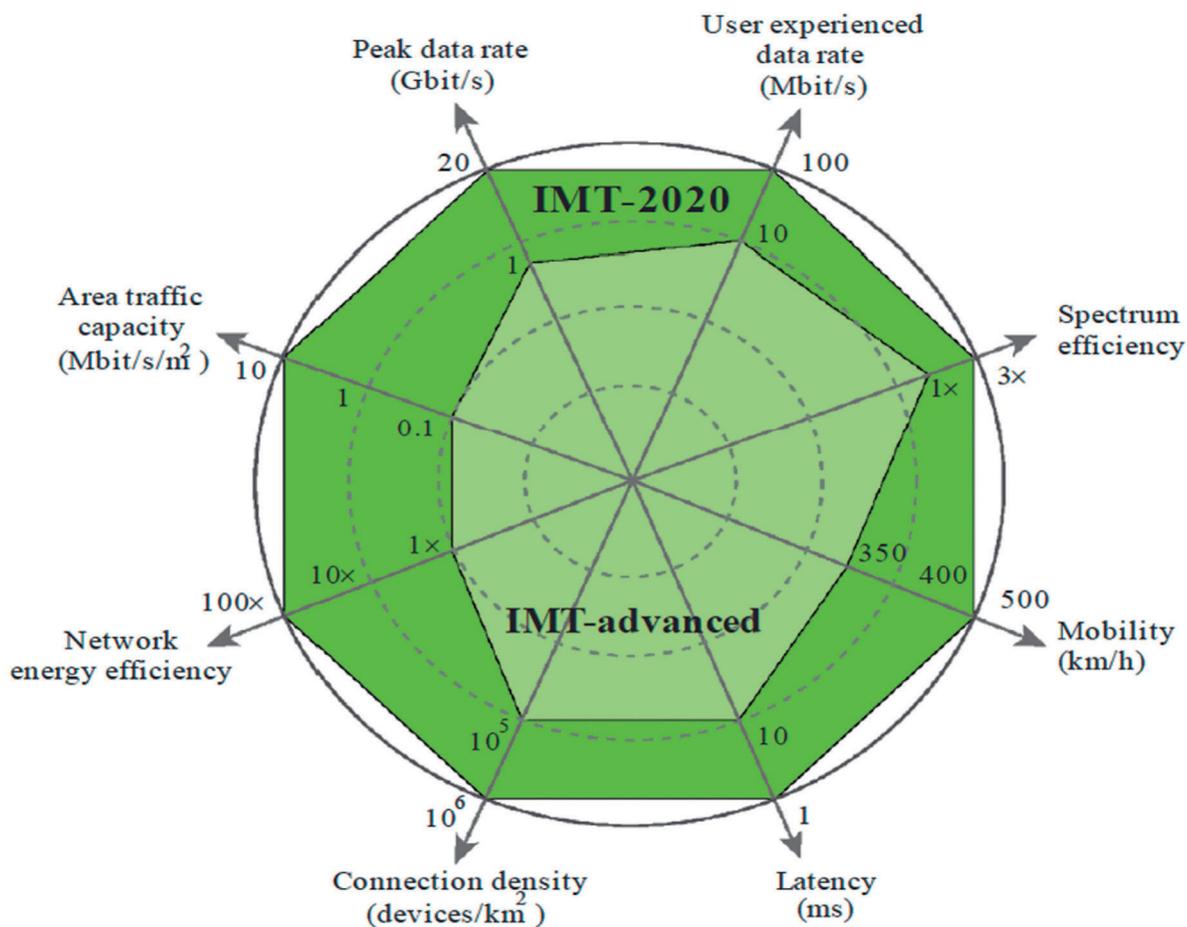
ABSTRACT

The demand for high speeds and capacities in wireless data communication, with increasing traffic of services such as high definition video, video calls and the synchronization of photos and videos of the mobile phone, poses a challenge that is understood to be solved with the work that is taking place in the 5th Generation wireless networks (5G). One strategy that is presented in this framework is the use of a large number of antennas, so it is necessary to know as soon as possible and be prepared for this new paradigm. This article describes one of the technologies that have the focus of attention today and that are framed in the MIMO Massive denomination: (Multiple Input Multiple Output). It promises significant gains that offer the ability to accommodate more users at higher data speeds with greater reliability and consuming less energy. Using the NI MIMO Massive software architecture, researchers can build massive MIMO benchmarks for prototype large-scale antenna systems using award-winning LabVIEW system design software and state-of-the-art software-defined radios (SDRs).

Introducción

Con la carrera hacia la 5G ahora en curso, la comunidad de investigación inalámbrica se ha embarcado en un viaje para crear las tecnologías que ofrecerán mejoras sin precedentes en rendimiento y capacidad de la red, en la eficiencia espectral y en la latencia extremo a extremo, lo que garantiza mayor confiabilidad. Estas mejoras están impulsadas por los requisitos clave de rendimiento, definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) resumidos en la figura 1. Como se muestra, las mejoras en el rendimiento de IMT-2020 (5G), en comparación con IMT-Advanced, son significativas con una mejora de 20 veces en la velocidad de datos máxima de 1 Gb / sa 20 Gb / s. De manera similar, la velocidad de datos experimentada por el usuario aumenta 10 veces desde 10 Mb / s hasta 100 Mb / s y la latencia se reduce en un factor de 10 desde 10 ms hasta 1 ms.

Con velocidades de datos mucho más altas que los sistemas de comunicación inalámbricos actuales, 5G lanzará una gran cantidad de nuevas aplicaciones y servicios que proporcionarán a los consumidores experiencias multimedia nunca antes posibles, incluida la transmisión de video de 4K, 8K y 3D de ultra alta definición. Las redes 5G de muy baja latencia y ultra alta fiabilidad, permitirán nuevas aplicaciones de misión crítica como la seguridad del tráfico, el control de la infraestructura crítica y los procesos de la industria que requieren una latencia mucho menor en comparación con los sistemas de comunicación móvil actuales (Chockalingam, A. 2010). Las mejoras en la eficiencia espectral de 1X a 3X también serán críticas para atender la explosión prevista, no solo de productos electrónicos de consumo, sino también de sensores, dispositivos de renderizado y actuadores asociados con el *Internet of Things* —(IoT) Internet de las Cosas—



M2083-03

Figura 1. Mejoras de los requisitos clave de rendimiento de IMT-Advanced a IMT-2020.

Dada la limitada disponibilidad de espectro y el número masivo proyectado de dispositivos IoT para conectarse, las redes 5G tendrán que hacer un uso del espectro mucho más eficiente que el de las redes inalámbricas actuales. (Larsson, E. G., Edfors, O., Tufvesson, F., y Marzetta, T. L. 2014)

Materiales y métodos

En esta investigación se realizó un estudio de carácter descriptivo, con el empleo de una metodología mixta para la búsqueda y recuperación de información relevante sobre la tecnología MIMO Masivo en las redes inalámbricas de 5ta Generación (5G). El método utilizado se adecua al de la búsqueda e investigación científica sobre un tipo específico de tecnología a implementar, en aras de profundizar sobre sus características distintivas y dar a conocer las nuevas tecnologías aplicadas en fase con el estado del arte sobre estos tópicos en el ámbito de las Telecomunicaciones.

Resultados y discusión

La tecnología MIMO Masivo es identificada como una tecnología candidata clave para lograr una mayor eficacia espectral. Algunas veces denominado MIMO de gran escala, es una forma de MIMO multiusuario en la que el número de antenas en la estación base es mucho mayor que el número de estaciones móviles por recurso de señalización. Esto da como resultado una respuesta de canal que es casi ortogonal y tiene el

potencial de producir grandes ganancias en eficiencia espectral.

Tales condiciones permiten que se sirvan muchos más dispositivos con los mismos recursos de frecuencia y tiempo, dentro de una celda dada en comparación con los sistemas 4G modernos (Lu, L., Li, G., Swindlehurst, A., Ashikhmin, A., y Rui, Z. 2014). La figura 2 muestra una comparación de una célula MIMO 4G típica, con la de una célula MIMO Masiva 5G que está equipada con muchas más antenas de estación base. La estación base MIMO Masiva 5G, equipada con muchas más antenas, podría servir a más dispositivos según lo previsto por el caso de uso de 5G, IoT y otros.

Los hallazgos recientes de las universidades de Bristol y Lund, muestran que se pueden lograr grandes ganancias en eficiencia espectral en ensayos en tiempo real, en el aire. Al utilizar el sistema de prototipos MIMO que se muestra en la figura 3, los investigadores lograron una eficiencia espectral récord de 145,6 bits / s / Hz con 128 antenas en la estación base y 22 estaciones móviles de antena única en un radio canal de 20 MHz que equivale a un incremento de 22 veces en la eficiencia espectral sobre las redes 4G existentes de hoy en día.

Aunque los logros de las universidades han llevado a MIMO masivo un paso más cerca de la realidad al demostrar que las enormes ganancias en eficiencia espectral son realmente alcanzables no solo en simulaciones basadas en computadora, sino también en el

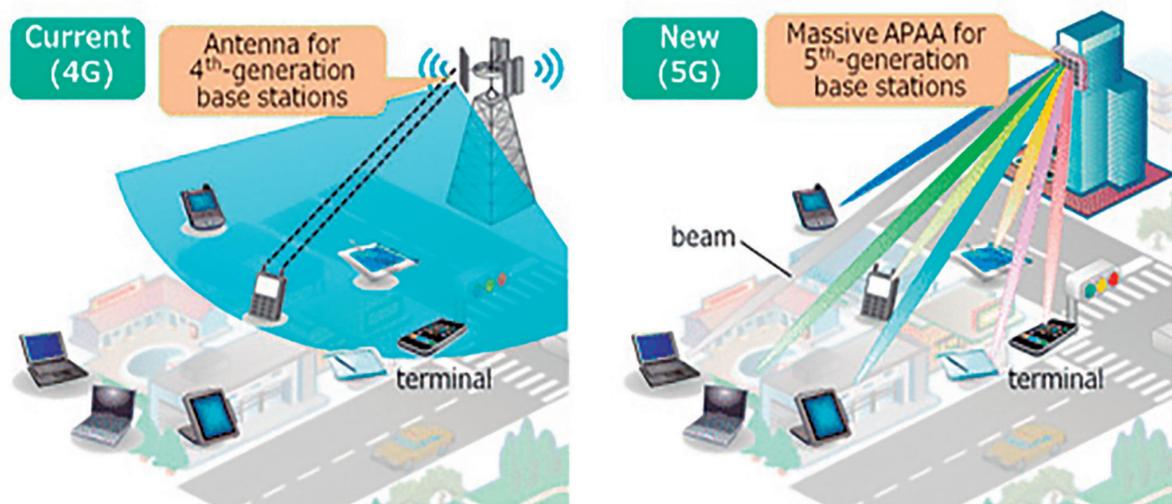


Figura 2. Evolución de la tecnología Multiantena de 4G MIMO a 5G MIMO Masivo.



Figura 3. Las universidades de Bristol y Lund utilizaron el sistema de creación de prototipos MIMO para la investigación de MIMO Masivo y creación de prototipos.

mundo real, en los senderos todavía hay mucho por hacer y muchos más problemas que resolver antes de que se desplieguen las redes MIMO Masivas comerciales. (Boccardi, F., Heath, R., Lozano, A., Marzetta, T. y Popovski, P. 2014). Algunos problemas pendientes que aún no se han resuelto incluyen los siguientes:

- Movilidad: ¿funcionará MIMO Masivo en condiciones de canal rápidamente cambiantes, a medida que los terminales móviles se muevan a gran velocidad?

- Dúplex por división de frecuencia (FDD): gran parte de la investigación Masiva actual de MIMO utiliza modos de transmisión dúplex por división de tiempo (TDD) y reciprocidad de canal, para superar problemas relacionados con las limitaciones en el número de secuencias piloto para la cantidad masiva de antenas de estaciones base. Sin embargo, muchas de las bandas celulares globales actuales están asignadas estrictamente para FDD. Por lo tanto, aún está por verse si la MIMO Masiva recibirá una adopción generalizada.

- Operación multicelda y rendimiento de límite de celda: ¿funcionará el MIMO Masivo cuando los usuarios se encuentren en el límite de las celdas adyacentes?

Como las secuencias piloto limitadas se reutilizan en las estaciones base MIMO Masivas adyacentes, los usuarios de borde de celda estarán en riesgo de contaminar a los pilotos de las células vecinas. Todavía se desconoce qué tan bien funcionará MIMO a medida que los usuarios se acercan al borde de las celdas vecinas.

El sistema de creación de prototipos MIMO

La necesidad de crear prototipos de MIMO Masivo y otras tecnologías es fundamental para realizar la visión 5G y cumplir con los requisitos clave de rendimiento en cuanto a la eficiencia espectral. Para comprender completamente las características de propagación del canal MIMO Masivo, los investigadores también deben comprender los efectos de las imperfecciones del circuito de Radio Frecuencia (RF) y otras limitaciones de hardware de los sistemas multicanal que afectan la sincronización y la coherencia de las señales en la banda base. Las limitaciones de procesamiento en tiempo real en todas las capas del sistema de comunicación, desde PHY hasta la aplicación, también deben ser bien comprendidas y contabi-

lizadas, para garantizar que se puedan entregar a los usuarios servicios sin fisuras, de alta calidad y altamente confiables.

La creación de prototipos de sistemas de comunicación inalámbrica en tiempo real, ha presentado tradicionalmente una serie de desafíos que han limitado en gran medida la velocidad a la que se pueden desarrollar las pruebas pilotos en estas tecnologías. El proceso de llevar conceptos modelados en simulaciones de escritorio a un prototipo funcional que procesa datos a velocidades superiores a 1 Gb/s ha requerido grandes equipos de ingeniería con habilidades altamente especializadas en desarrollo de hardware de RF y banda base, desarrollo de controladores, realidades tiempo en la programación de software integrado, diseño de circuitos digitales, procesamiento de señales, etc. El problema se agrava aún más, ya que las herramientas necesarias para crear dichos sistemas, abarcan proveedores diferentes que requieren habilidades altamente especializadas, no solo en el desarrollo de hardware o software, sino también en el uso de la herramienta de un proveedor determinado.

A la luz de estos desafíos, National Instruments (NI) ofrece una solución de creación de prototipos completa para la investigación MIMO multiusuario, que incluye MIMO Masivo. El sistema de creación de prototipos MIMO de National Instruments incluye todo lo que se necesita para poner en marcha un sistema MIMO multiusuario de aire en tiempo real inmediatamente sin necesidad de desarrollar ningún código adicional. En la figura 4 se muestran los tres

componentes principales del Sistema de Prototipos MIMO que incluyen: (1) hardware de Radios Definidos por Software (SDR) de vanguardia, (2) un único entorno de diseño de software unificado y (3) protocolo de Internet (IP) de la matriz de puertas programables FPGA en tiempo real, como parte de un diseño de referencia de software MIMO. Juntos, los tres componentes del Sistema de Prototipos MIMO reducen significativamente los desafíos en la creación de prototipos de sistemas de comunicación inalámbrica en tiempo real en comparación con los métodos tradicionales de prototipos para acelerar el desarrollo de los sistemas de comunicación de próxima generación.

Las fotografías de la estación base y el hardware de la estación móvil se muestran en la figura 5.

Suite de Diseño de Sistema de Comunicaciones: LabVIEW

El software de diseño y experimentación para comunicaciones inalámbricas (LabVIEW) es un entorno de diseño de software completo que unifica el desarrollo de aplicaciones que requieren procesamiento incrustado de alta velocidad y baja latencia en objetivos de microprocesador y FPGA, como MIMO multiusuario y otros sistemas de comunicación a esa que desarrolle un protocolo de capa MAC en tiempo real que controle la programación de transmisiones para usuarios de red en un procesador integrado o una capa MIMO PHY de alto rendimiento en el FPGA, LabVIEW proporciona todas



Figura 4. El sistema de creación de prototipos MIMO es una solución completa de creación de prototipos MIMO multiusuario que incluye hardware, software e IP.

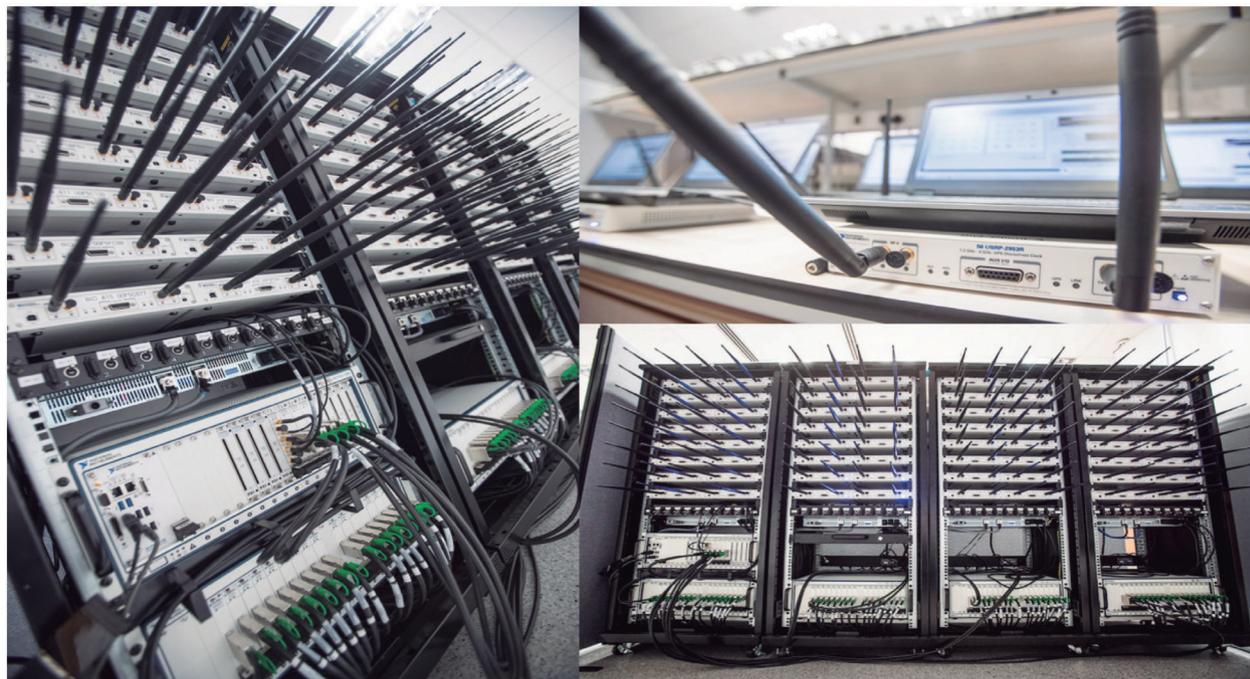


Figura 5. Sistema de creación de prototipos MIMO: estación base de 128 antenas (izquierda y derecha inferior) y estación móvil (esquina superior derecha).

las herramientas necesarias para hacerlo en un solo entorno de diseño. Además, como todos los controladores de hardware para el sistema de prototipos MIMO también son accesibles en LabVIEW a través de una API simple e intuitiva, las tareas relacionadas con el hardware, como la transferencia de datos entre

la CPU y FPGA o el control de la interfaz RF integrado a la perfección en la ejecución de las diversas capas en toda la pila de comunicación como se observa en la figura 6.

Algunas de las características de desarrollo de software en LabVIEW son:

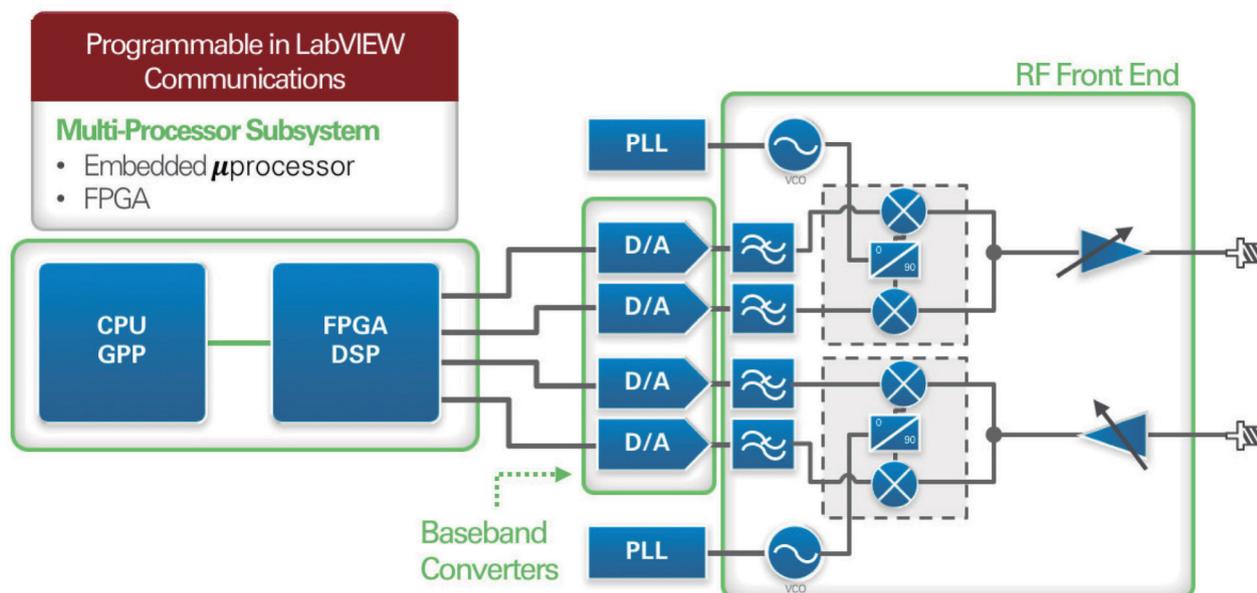


Figura 6. Una arquitectura típica de hardware SDR que consiste en objetivos de procesamiento de CPU y FPGA que son programables en LabVIEW.

Desarrollo de código de CPU

LabVIEW incluye herramientas de desarrollo de software para crear aplicaciones basadas en CPU para sistemas de comunicación inalámbricos en tiempo real. Con un sistema operativo basado en Linux en tiempo real, LabVIEW incluye capacidades tales como: construcciones integradas para multiprocesamiento, programación de hilos en tiempo real para ayudar a los usuarios a escribir código robusto y determinista, para asegurar que las operaciones de tiempo crítico se ejecuten de manera consistente y confiable sin pérdida de datos para funciones relacionadas con el MAC y otras capas superiores de la pila de comunicaciones. Al comprender la importancia de la reutilización de códigos, LabVIEW también admite otros lenguajes de programación, incluidos C y C++, de modo que los usuarios puedan importar y reutilizar la IP existente.

Desarrollo de código FPGA

Para las aplicaciones basadas en FPGA, que requieren un determinismo de tiempo estricto a nivel de circuito, como procesamiento de señal digital intensivo computacional u operaciones de capa MAC de tiempo crítico, LabVIEW proporciona todas las herramientas de desarrollo de software necesarias para crear FPGA IP para aplicaciones de comunicación inalámbrica. Además de desarrollar aplicaciones de FPGA grandes y complejas basadas en primitivas de circuitos, LabVIEW también incluye Xilinx IP para una serie de funciones de procesamiento de señal y también permite importar y reutilizar otras fuentes de código HDL para mejorar la productividad. Asimismo, LabVIEW incluye herramientas integradas de simulación y depuración de ciclo para eliminar errores en el código antes de una compilación larga.

Integración ajustada del hardware y del software

Además de mejorar el proceso de desarrollo de código de aplicación de comunicación inalámbrica en tiempo real para objetivos de hardware heterogéneos, LabVIEW simplifica el proceso de integración del código de la aplicación con el hardware circundante, asegurando que tanto el software como el hardware funcionen juntos sin problemas. Además, a medida que NI desarrolla hardware y software para el sistema de prototipos MIMO, a diferencia de otros sistemas que combinan hardware de diferentes proveedores, la

integración de hardware y software puede realizarse de manera confiable y consistente, asegurando que todo el sistema se comporte de manera predecible y cada vez.

Características del marco de aplicación MIMO

El marco de Aplicación MIMO es una implementación completamente en tiempo real, multi-FPGA de una capa MIMO PHY multiusuario escalable que admite la transmisión de enlace ascendente y de enlace descendente en la estación base y las estaciones móviles. Diseñado para ser utilizado en una variedad de aplicaciones basadas en MIMO, el marco de aplicación MIMO incluye las siguientes características resumidas a continuación:

- Admite SU-MIMO, MU-MIMO y MIMO Masivo.

- 50 MHz - cobertura de frecuencia de 6 GHz

- Ancho de banda de 20 MHz TDD UL y DL

- Número escalable de antenas de estación base de 2 a 128

- Número escalable de antenas de estación móvil de hasta 12 antenas

- Soporte para hasta 12 flujos espaciales

- Estructura de cuadro totalmente reconfigurable basada en LTE

- 128x12 MMSE, ZF y MRCO precodificador / ecualizador FPGA IP

- Admite 4 QAM, 16 QAM, 64 QAM, 256 QAM

- Calibración de reciprocidad del canal que permite la precodificación basada en la reciprocidad

- AGC y control de potencia de bucle abierto

- Sincronización aérea

La funcionalidad MAC básica admite la transmisión de datos de usuario basada en paquetes en DL y UL para habilitar aplicaciones de transmisión de datos, como la transmisión de video

Número escalable de antenas de estación base y estación móvil

La estación base MIMO y las estaciones móviles se pueden configurar con un número variable de antenas según los requisitos de una aplicación (Björnson, E., Sanguinetti, L., Hoydis, J. y Debbah, M. 2014). El marco de aplicación MIMO admite hasta 12 capas

espaciales en las direcciones de enlace ascendente y de enlace descendente, y puede modificarse para admitir capas adicionales si es necesario. Con tales capacidades, se puede realizar una amplia gama de diferentes configuraciones MIMO en todas las estaciones móviles y estaciones base dentro de una red. En la tabla 1 se enumeran algunos ejemplos de diferentes configuraciones de MIMO que ilustran cómo se puede utilizar el Marco de aplicación MIMO para realizar experimentos para SU-MIMO, MU-MIMO y MIMO Masivo. Tenga en cuenta que el uso del Marco de aplicación MIMO no se limita a estos tres ejemplos, sino que se puede usar para muchos otros.

Esta experiencia de software de primer nivel, proporciona a los usuarios un alto grado de flexibilidad para simplificar el proceso general de configuración y realización de experimentos MIMO. (Huh, H., Caire, G., Papadopoulos, H. y Ramprashad, S. 2012).

Precodificación y ecualización MIMO

El marco de aplicación MIMO incluye FPGA IP en tiempo real para realizar la codificación previa MIMO en el enlace descendente (DL) y la ecualización MIMO en el enlace ascendente (UL) para dimensiones de matriz de hasta 128x12, donde 128 corresponde al número máximo de antenas de estación base y 12 corresponde al número máximo de flujos espaciales. La figura 7 muestra un diagrama de bloques de la cadena de procesamiento de señal para la estación

base MIMO Masivo. El Marco de Aplicación MIMO emplea una estructura de trama Time-División Dúplex (TDD) para explotar la reciprocidad del canal. Las estimaciones de canal obtenidas en UL se utilizan para calcular el precodificador DL MIMO antes de la transmisión. Dependiendo de las condiciones del canal, la señal DL MIMO precodificada es luego recibida por cada una de las estaciones móviles sin interferencia. El Marco de aplicación MIMO incluye las siguientes tres opciones incorporadas de ecualizador MIMO que también son seleccionables por software: error cuadrático medio mínimo (MMSE), forzamiento cero (ZF) y combinación de proporción máxima (MRC).

Calibración de Reciprocidad de Canales

Para hacer uso de la reciprocidad del canal, se deben cumplir varias condiciones, incluida la estimación precisa de la respuesta del canal UL, excluyendo las contribuciones del circuito de RF para cada uno de los canales de antena en la estación base y las estaciones móviles. Con este fin, el Marco de Aplicación MIMO incluye rutinas automatizadas para realizar la calibración de los diversos extremos frontales de RF de la estación base, por lo que la respuesta de frecuencia de

Ejemplos de varias configuraciones MIMO			
MIMO Configuración	Número de Antenas de Estación Base	Número de Estaciones Móviles	Antenas por Estación Móvil
SU-MIMO	Up to 128	1	Up to 12
MU-MIMO	Up to 128	2	8 for MS ₁ , 4 for MS ₂
MIMO Masivo	Up to 128	5	4 for MS ₁ , 4 for MS ₂ , 2 for MS ₃ , 1 for MS ₄ , 1 for MS ₅

Tabla 1. Ejemplos de varias configuraciones MIMO que utilizan el Marco de aplicación MIMO.

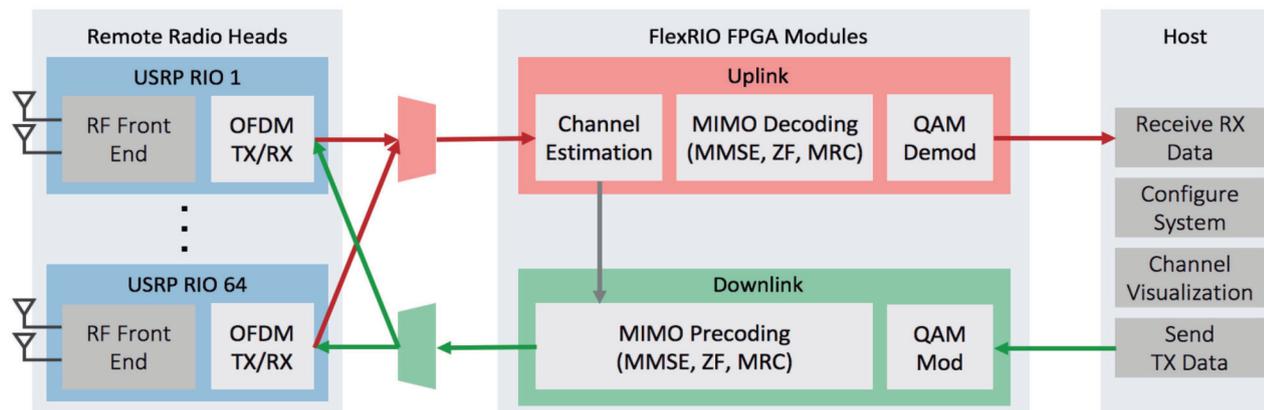


Figura 7. Diagrama de bloques de la cadena de procesamiento de señales de la estación base MIMO Masivo.

cada cadena de RF se estima tanto en la dirección UL como DL. Las estimaciones de los extremos frontales de RF se aplican luego al proceso de estimación del canal UL para garantizar que se alcance una medida precisa de solo el canal por aire (Roh W., Seol, J.-Y., Park, J., Lee, B., Lee, J., Kim, Y. y Aryanfar, F. 2014).

Estructura de trama TDD de ancho de banda 20 MHz basada en LTE

El Marco de Aplicación MIMO hace uso de una estructura de trama de radio 3GPP LTE como TDD. La estructura del cuadro de radio es completamente modificable a través del software, no requiere cambios adicionales en el diseño del FPGA, y permite a los usuarios ajustar rápidamente el comportamiento del sistema por estación móvil para cumplir sus objetivos y requisitos de investigación. Dichas modificaciones a la estructura de trama incluyen la capacidad de cambiar parámetros tales como los siguientes.

Designación del tipo de símbolo OFDM: piloto UL, datos UL, DL Pilot, DL Data, tiempo de protección del interruptor UL / DL.

Orden de modulación QAM de 4 QAM a 256 QAM por capa espacial.

En la figura 8 se muestra un diagrama de la estructura de trama de radio, que incluye información en el nivel de trama hasta el nivel de símbolo OFDM (Karjalainen, J., Nekovee, M., Benn, H., Kim, W., Park, J. y Sungsoo, H. 2014). La información adicional sobre otros parámetros del sistema también se enumera en la tabla 2, se debe tener en cuenta las similitudes con el estándar LTE para el modo de transmisión de 20 MHz.

Control automático de ganancia y control de potencia de bucle abierto.

Al comprender la importancia del control de potencia, el Marco de aplicación MIMO incluye rutinas de software que ajustan automáticamente los niveles de potencia. Esto incluye tanto la lógica de control automático de ganancia (AGC) en los receptores de las estaciones móviles y la estación base, como también el control de potencia de bucle abierto en los transmisores de enlace ascendente de la estación móvil. Al hacerlo, se asegura que las señales se reciban en ambos extremos del enlace a niveles de potencia que aumentan la probabilidad de demodularse adecuadamente con errores mínimos. Además, debido a que el proceso de ajuste de niveles de potencia es completamente

Parámetro	Valores
Ancho de banda por canal	20 MHz
Tasa de muestreo	30.72 MS/s
FFT tamaño	2,048
Número de subportadoras	1,200
Cantidad de bloques de recursos	100
Número de símbolos OFDM por ranura	7
Longitud CP (muestras)	160 (first symbol) 144 (six following symbols)
Duración de la Trama	10 ms
Duración de la Sub trama	1 ms
Duración de la ranura	0.5 ms

Tabla 2. Parámetros del sistema de la aplicación MIMO.

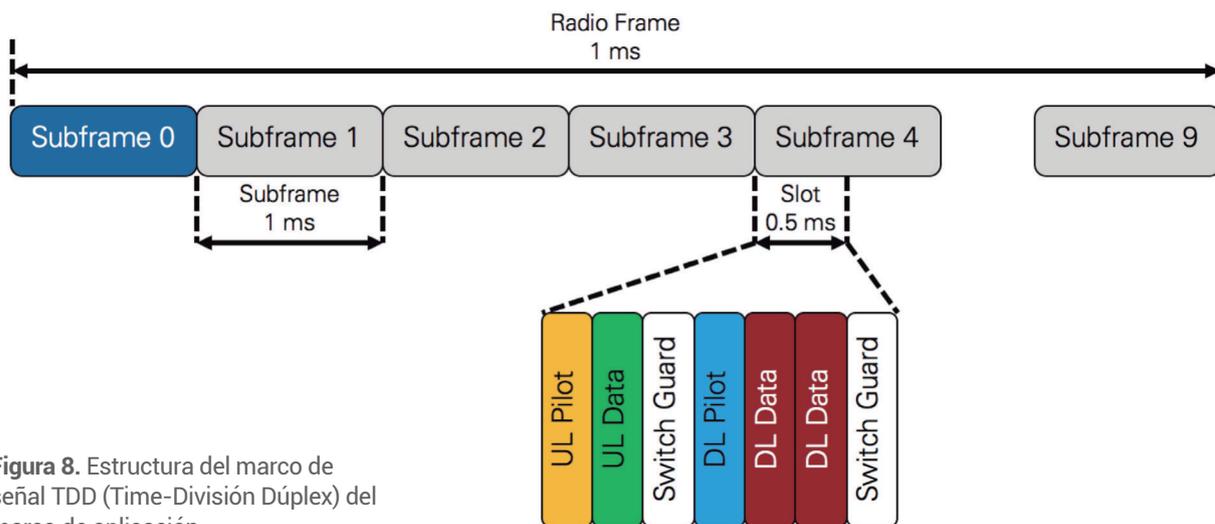


Figura 8. Estructura del marco de señal TDD (Time-División Dúplex) del marco de aplicación.

automático, los usuarios no necesitan realizar ajustes manuales a los muchos transceptores de RF en las estaciones móviles, lo que puede ser un proceso lento para redes grandes, permitiendo a los usuarios ponerse en marcha rápidamente. Nada más sacarlo de la caja.

Conclusiones

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

MIMO Masivo es un área interesante de investigación inalámbrica 5G. Promete ganancias significativas que ofrecen la capacidad de acomodar a más usuarios a mayores velocidades de datos con mayor confiabilidad

y consumiendo menos energía. Utilizando la arquitectura de software NI MIMO Masivo, los investigadores pueden construir bancos de pruebas MIMO Masivo para prototipos de antenas a gran escala utilizando el galardonado software de diseño de sistemas LabVIEW y radios definidas por software (SDR) de vanguardia. Con un flujo de diseño simplificado para crear una lógica basada en FPGA y una implementación optimizada para el procesamiento de alto rendimiento, los investigadores en este campo pueden satisfacer las demandas de creación de prototipos de estos sistemas altamente complejos con un flujo de diseño de hardware y software unificado.

El MIMO masivo desempeña un papel importante en la evolución actual de la comunicación móvil al facilitar el camino hacia la 5G. A través de la reutilización inteligente de los recursos del sistema, MIMO Masivo mejora la capacidad mediante la transmisión de datos a múltiples dispositivos de usuario utilizando los mismos recursos de tiempo y frecuencia con la formación coordinada del haz y la dirección del haz.

Referencias

- Björnson, E., Sanguinetti, L., Hoydis, J. y Debbah, M. (2014). Designing Multi-User MIMO for Energy Efficiency: When is Massive MIMO the Answer? *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. (6-9, abril: Estambul, Turquía). *Proceedings*. pp. 242-247.
- Boccardi, F., Heath, R., Lozano, A., Marzetta, T. y Popovski, P. (2014). Five disruptive technology directions for 5G. *IEEE Communications Magazine*. vol. 52, no. 2, pp. 0163-6804.
- Huh, H., Caire, G., Papadopoulos, H., y Ramprasad, S. (2012). Achieving “Massive MIMO” Spectral Efficiency with a Not-so-Large Number of Antennas. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. vol.11, no. 9, pp. 3226-3239.
- Chockalingam, A. (2010). Detection, Low-Complexity Algorithms for Large-MIMO. 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP). (17-19, septiembre: Limasol, Chipre). *Proceedings*. pp. 1-6.
- Karjalainen, J., Nekovee, M., Benn, H., Kim, W., Park, J., & Sungsoo, H. (2014). Challenges and opportunities of mm-wave communication in 5G networks. 9th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM). (2-4, junio: Oulu, Finlandia). pp. 372-376.
- Larsson, E. G., Edfors, O., Tufvesson, F., & Marzetta, T. L. (2014). Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems. *IEEE Communications Magazine*. vol. 52, no. 2, pp. 186-195.
- Lu, L., Li, G., Swindlehurst, A., Ashikhmin, A., y Rui, Z. (2014). An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. vol. 8, no. 5, pp. 742- 758.