

# Evaluación experimental de un sistema MIMO-OFDM basado en IEEE802.15.3.c en interiores

Maria-Teresa Martínez-Ingles<sup>1</sup>, Concepción Sanchis-Borras<sup>2</sup>, Jose-Maria Molina-García-Pardo<sup>1</sup>, Juan Pascual-García<sup>1</sup>, José-Víctor Rodríguez<sup>1</sup> and Leandro Juan Llácer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento TIC, Universidad Politécnica de Cartagena, <sup>2</sup>Universidad Católica de San Antonio  
Departamento Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Antiguo Cuartel de Antigones. Plaza del Hospital, 1. Campus Muralla del Mar, Universidad Politécnica de Cartagena  
Teléfono: 968338867  
Email: mteresa.martinez@upct.es

**Resumen.** En este trabajo se presenta un estudio experimental para un sistema MIMO-OFDM (Multiple-Input Multiple-Output, Orthogonal Frequency Division Multiplexing), basado en el estándar 802.15.3c. La característica principal de este sistema es el uso de la banda milimétrica (60 GHz), así como el uso de múltiples antenas. Se midió el canal radioeléctrico con un analizador de redes, y se ha analizado el rendimiento de algoritmos espacio temporal sobre la capa física real. En el entorno de medida, se han obtenido tasas de transferencia de hasta 5,77 Gbit/s.

## 1. Introducción

La banda milimétrica (57 - 66 GHz), está considerada hoy en día como la más válida para poder realizar transferencias inalámbricas que superen la barrera de los Gbps. El interés también aumenta ya que se trata de una banda no licenciada, y se ha demostrado recientemente que es posible alcanzar tasas de transferencia muy elevadas [1].

El grupo de trabajo IEEE 802.15.3c (TG3c) ha publicado recientemente un estándar para la banda de frecuencia milimétrica (mm-W) para redes de área personal [2], también denominadas Wireless Gigabit Ethernet, como una extensión del estándar 802.15.3. A su vez, la industria ha creado un consorcio, Wireless Gigabit Alliance, para promocionar y desarrollar la banda de 60 GHz para tecnologías inalámbricas [3].

En la actualidad, se pueden encontrar algunos estudios experimentales en la banda milimétrica; por ejemplo en [4] se mide el rendimiento en hospitales, en [5] se hace un estudio estadístico en entornos interiores, y en [6] en entornos de aviones, en concreto en un Airbus 340.

Por otro lado, en la última década se han desarrollado sistemas con múltiples antenas en transmisión y recepción (MIMO). Estos sistemas permiten elevar la tasa de transferencia de datos mediante la multiplexación espacial [7], así como disminuir la tasa de error de bit (BER) mediante codificaciones espacio temporales [8]. Además, el uso de la técnica de modulación conocida como Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) junto con MIMO es una de las tecnologías de capa física más prometedoras [9].

En este trabajo se mide la capa física para un sistema MIMO-OFDM a 60 GHz. Además, se evalúa el rendimiento de diferentes estrategias de MIMO espacio-temporales que cumplan la norma

IEEE802.15.3c. Todo esto se estudia para diferentes configuraciones de las antenas.

## 2. Descripción de las medidas

### 2.1. Escenario

El escenario de medición fue un laboratorio ubicado en el primer piso de un edificio de investigación (I+D+i) de la Universidad Politécnica de Cartagena. El tamaño del laboratorio es aproximadamente 4.5x7x3 metros y en él se encuentran armarios, estantes, escritorios y sillas. Las paredes son de pladur y el suelo y el techo son de hormigón. En la figura 1 se muestra el escenario medido, así como las posiciones de las antenas usadas. Se utilizaron 20 posiciones del transmisor (Tx) y una posición de receptor (Rx). En cuanto a los transmisores, cada fila está separada 0,5 metros, mientras que las columnas están separadas cada 1 metro. En todos los experimentos existía una línea de vista (LOS).

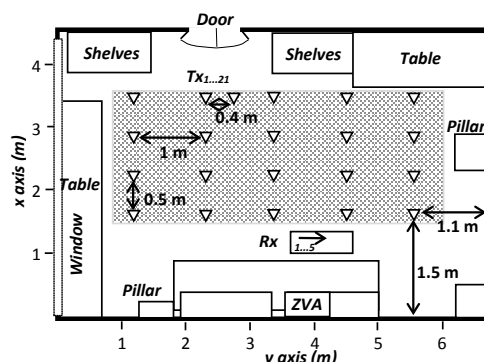


Figura 1. Planta del laboratorio donde se realizaron las medidas

### 2.2. Sondador de canal

Las medidas se llevaron a cabo utilizando un analizador de redes ZVA67. El rango de frecuencia medido fue de 57-66 GHz, utilizando 4096 puntos de frecuencia. La frecuencia intermedia del sistema de medida fue fijada en 10 Hz lo que permitió alcanzar

un rango dinámico de más de 100 dB. También se usaron dos amplificadores para compensar la atenuación de los cables (HXI HLNA-465). El sistema se calibra para eliminar el efecto de los cables, amplificadores y otros elementos.

En transmisión y recepción se usaron antenas omnidireccionales (Q-par-65 QOM55 VRA) con 4,5 dBi de ganancia, y polarización siempre vertical. La altura de la antena de transmisión fue de 1,42 m, mientras que fue 1,55 m para la antena de recepción.

La antena receptora se mueve a lo largo de un posicionador lineal dentro de 5 posiciones con 2 mm de separación entre posiciones contiguas (8 mm en total), mientras que la antena de transmisión se mueve usando una matriz rectangular 6x6 uniforme, también cada 2 mm en ambas dimensiones.

### 2.3. Configuración

Usando las matrices de transmisión MIMO 6x6, se han estudiado 4 configuraciones para el transmisor que hemos llamado Conf. 1, Conf. 2, Conf. 3 y Conf. 4. En la tabla 1 se puede apreciar la orientación de las 4 antenas seleccionadas del transmisor. En el caso del receptor, 4 de las 5 antenas son elegidas con la misma orientación que Conf. 2. Luego construimos 4 combinaciones de una matriz MIMO 4x4 para cada posición (4 elementos del Tx y 4 elementos del Rx).

Tabla 1. Configuraciones del transmisor

Conf 1	Conf 2	Conf 3	Conf 4
x o o o o o	x x x x o o	x o o o o x	o o o o o o
x o o o o o	o o o o o o	o o o o o o	o o o o o o
x o o o o o	o o o o o o	o o o o o o	o o x x o o
x o o o o o	o o o o o o	o o o o o o	o o x x o o
o o o o o o	o o o o o o	o o o o o o	o o o o o o
o o o o o o	o o o o o o	x o o o o x	o o o o o o

### 2.4. IEEE 802.15.3

A partir de los 9 GHz medidos hemos analizado las 4 bandas de frecuencia consideradas en el estándar IEEE 802.15.3c [2]. Hemos observado que los resultados extraídos para todas las bandas son similares, por lo que vamos a mostrar los resultados relacionados con el canal 4 que trabaja en la banda 63,720-64,800 GHz.

## 3. Evaluación de la capacidad

Es este punto evaluamos el rendimiento del sistema. En la tabla 2 se resumen las especificaciones del sistema MIMO-OFDM según [2]. Se han considerado dos esquemas de modulación QPSK y 64QAM, con dos velocidades de codificación: 1/2 y 5/8.

Tabla 2. Parámetros del sistema IEEE802.15.3c Standard para la evaluación del sistema a 60 GHz

Parámetro	Valor
Frecuencia de muestreo	2640 MHz
Puntos de la FFT	512
Tipo de modulación	QPSK, 64QAM
Forward error correction	Structured LDPC
Tasa de codificación	1/2, 5/8

Se han considerado dos arquitecturas STBC (Space Time Block Code), una ortogonal (OSTBC) y otra cuasi-ortogonal (QSTBC) para MIMO 4x4, cuyas tasas son de 1/2 y 1, respectivamente. El método de detección de símbolos se basa en el algoritmo de mínimo error cuadrático medio (MMSE). Además se ha comparado con SISO (Single-Input Single-Output) para hacernos una idea de la mejora con las múltiples antenas.

La tasa de error de paquete (PER) se define como el cociente entre los paquetes erróneos y los paquetes correctos de un conjunto determinado de paquetes transmitidos; en nuestro caso hemos seleccionado un conjunto de 10000 paquetes para medir el PER. La capacidad máxima está recogida en las especificaciones del estándar y depende de la codificación y de la modulación. La tasa de datos, de acuerdo con el esquema de modulación y codificación, se muestra en la tabla 3, siendo MCS los esquemas de transmisión propuestos por el estándar [2].

Tabla 3. Tasas de transferencia y codificaciones usadas

MCS	Modulación	SISO / 4x4-QSTBC (Gbps)	4x4-OSTBC (Gbps)
1	1/2 QPSK	1.54	0.77
7	5/8 64QAM	5.77	2.88

El PER depende de la SNR, el esquema de modulación y la codificación, y de las características de las matrices de canal de radiocomunicaciones que hemos medido.

Las técnicas de multiplexación espacial requieren una alta SNR. En nuestro caso estamos trabajando al límite del funcionamiento así que nos centraremos en los STBC, que por otro lado son más usados. En la figura 2 se muestran las tasas de transferencia para MIMO 4x4 con codificaciones QSTBC y OSTBC. Nos centramos en los modos MCS 1 y 7 para mostrar los casos peor y mejor.

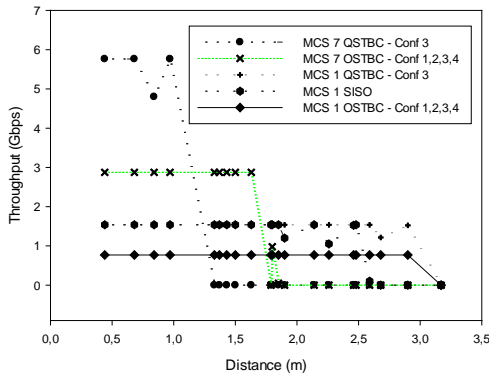


Figura 2. Tasas de transferencia medidas a 60 GHz

Tabla 4. Mejor configuración, distancia máxima y SNR mínima

MCS / MIMO arquitectura	Mejor configuración	Máx. Distancia (m)	Min. SNR (dB)
MCS 7 QSTBC	Conf 3	1	9,5
MCS 7 OSTBC	Conf 1,2,3,4	1,7	6
MCS 1 QSTBC	Conf 3	3	1
MCS 1 OSTBC	Conf 1,2,3,4	3	1
MCS 1 SISO	--	2,5	3,5

Nuestro sistema está altamente correlado, y en [10] se demuestra que esto afecta a la solución QSTBC y no a la OSTBC debido a la ortogonalidad de la última. Así que para QSTBC, la configuración elegida de las antenas es crucial, siendo las configuraciones 2 y 3 las mejores. Hemos resumido en la Tabla IV las mejores configuraciones para cada arquitectura, la distancia máxima de funcionamiento y la mínima SNR para que funcione el sistema

Observando la figura 2 (y la tabla 4) podemos apreciar que la configuración 3, para MCS 7 y QSTBC, logra una tasa de transmisión de 5,77 Gbps hasta un metro de distancia, sin embargo, necesitamos una SNR de 9,5 dB y una modulación 64QAM. Entre 1 y 1,7 m todas las combinaciones dan el mismo resultado para MCS 7 y OSTBC, con un rendimiento de 2,88 Gbps y una SNR necesaria de 6 dB porque la correlación no influye en la orientación de las antenas. Luego, entre 1,7 y 3 m el mejor de los casos es para la configuración 3 combinada con MCS 1 QSTBC, la SNR mínima necesaria es de 1 dB, (se puede trabajar con una SNR tan baja porque MCS 1 utiliza una modulación QPSK). También es interesante resaltar que el rendimiento obtenido con la arquitectura OSTBC se reduce por un factor de 2 en comparación con la arquitectura QSTBC, debido a que el esquema de codificación utilizado en OSTBC ofrece una tasa de 1/2.

Por último, en la figura 2 vemos que la arquitectura MIMO proporciona siempre mejores resultados que SISO, siendo MCS 7 QSTBC el óptimo para distancias cortas y MCS1 QSTBC para distancias largas. En el caso de MCS7 QSTBC, el rendimiento se incrementa por un factor de 3,7 en comparación con el caso SISO, mientras MCS1 QSTBC presenta

el mismo rendimiento simular a SISO con un alcance mayor en casi 1 metro.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado experimentalmente el rendimiento de los sistemas MIMO-OFDM IEEE802.15.3c con 4 configuraciones de antenas. MIMO parece una solución razonable tanto para aumentar el rendimiento como la distancia de la comunicación. Consigue un aumento de la tasa de bits de datos por un factor de 3,7 con un sistema 4x4 QSTBC, y aumenta la distancia máxima alcanzable en 1 metro con respecto a SISO.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad MINECO, España (TEC2010-20841-C04-03) y por los fondos europeos FEDER.

## Referencias

- [1] C. Park and T. S. Rappaport, "Short-range wireless communications for next-generation networks: UWB, 60 GHz millimeter-wave WPAN, and ZigBee," IEEE Wireless Comm., vol. 14, pp. 70–7, 2007.
- [2] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) Amendment 2: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension, IEEE 802.15.3, 2009.
- [3] WiGig White Paper: Defining the Future of Multi-Gigabit Wireless Communication [Online]. Available: <http://www.wigig.org/specifications/>
- [4] M. Kyro, K. Haneda, J. Simola, K. Nakai, K. Takizawa, H. Hagiwara, and P. Vainikainen, "Measurement based path loss and delay spread modeling in hospital environments at 60 GHz," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 10, pp. 2423–2427, Aug. 2011.
- [5] P. F. M. Smulders, "Statistical characterization of 60-GHz indoor radio channels", IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 57, pp. 2820–2829, 2009.
- [6] A. P. Garcia, W. Kotterman, U. Trautwein, D. Brückner, J. Kunisch and R. S. Thoma, "60 GHz time-variant shadowing characterization within an Airbus 340", Proc. Fourth European Conference Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1–4, 2010.
- [7] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden and R.A.Valenzuela, VBLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates over the Rich-scattering Wireless Channel, Bell Labs, Oct. 1998.
- [8] V. Tarokh, H. Jafarkhani and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 45, pp. 1456–1467, Jul. 1999.
- [9] G. L. Stuber, J. R. Barry, S. W. McLaughlin, L. Ye and M.A.Ingram, "Broadband MIMO-OFDM wireless communications," Proc. IEEE, vol. 92, pp. 271–294, Feb. 2004.
- [10] C. Sanchis-Borras, J.-M. Molina-Garcia-Pardo, M. Lienard and P. Degauque, "Performance evaluation of MIMO-OFDM in Tunnels," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 11, pp. 301–304, 2012.