

Transmisiones a 28 GHz y 37 GHz en interiores de trenes aplicando técnicas MISO-OFDM

Concepción Sanchis-Borras¹, Jose-Maria Molina-Garcia-Pardo², Lorenzo Rubio³, Juan Pascual García², Vicent M. Rodrigo³, Leandro J. Llacer², and Juan Reig³

csanchis@ucam.edu, josemaria.molina@upct.es

⁽¹⁾ Dpto. de Ciencias Técnicas de la Universidad Católica de San Antonio de Murcia (UCAM), 30107 Murcia, España

⁽²⁾ Dpto. de Tecnologías de la Información y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena 30202, España

⁽³⁾ Instituto iTEAM, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España

Abstract—This paper analyses a simulation of performance in an intra-wagon environment based on four scenarios. The 28 GHz and the 37 GHz bands are assessed for the use of 5G millimeter (mmWave) communications. The main objective was to analyse different multiple-input single-output orthogonal frequency division multiplexing (MISO-OFDM) techniques such as Hadamard quasi-orthogonal space-time block code (HQSTBC) and transmit beamforming to analyze the throughput achieved as a function of the signal-to-noise ratio (SNR) applied. Starting from a measurement campaign, the performance is analyzed by scenario, applied band and in terms of the two algorithms used. In addition, the results are simulated with 4 and 8 transmitting antennas.

I. INTRODUCCIÓN

Los modelos actuales de transporte ferroviario se han orientado hacia métodos de comunicación "verdes", más eficientes energéticamente y menos costosos que otros modelos de transporte y con menor impacto ambiental [1]. Se espera que las comunicaciones del tráfico ferroviario sean fluidas e inalámbricas, con un rendimiento de varios gigabits por segundo (Gbps) [2].

Las ondas milimétricas (mmWave) corresponden a las frecuencias comprendidas entre 30 y 300 GHz, pero a veces en comunicaciones móviles también se incluye la banda de 10-30 GHz, ya que comparten algunas características de propagación. En comparación con las bandas de frecuencias por debajo de 6 GHz, las bandas de ondas milimétricas tienen grandes anchos de banda disponibles, pero sufren una pérdida de propagación elevada. En EEUU, las bandas de frecuencia de 28 GHz (27,5-28,35 GHz) y 37 GHz (37-40 GHz) fueron autorizadas para el despliegue de las futuras comunicaciones 5G mmWave, mientras que tanto China como la Unión Europea han elegido la banda de frecuencia de 26 GHz (24,25-27,5 GHz). Estas bandas de frecuencias se ajustan a las propuestas en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), celebrada en 2019 [3].

En [2] se definen cinco escenarios de servicios ferroviarios futuros, entre los que se encuentran los escenarios tren-infraestructura, inter-vagón, intra-vagón, dentro de la estación e infraestructura-infraestructura.

En este artículo se comparan varias técnicas de multiplicación por división en frecuencia ortogonal de entrada múltiple y salida simple (*multiple-input single-output orthogonal frequency division multiplexing*, MISO-OFDM) en un entorno intra-vagón. En los códigos

espacio-temporales cuasi-ortogonales (QSTBC), la falta de ortogonalidad provoca interferencia entre símbolos (ISI) en la matriz de decodificación y empeora la tasa de error de bit (*bit error rate*, BER). De ahí que sea mejor simular el QSTBC combinado con matrices de Hadamard (HQSTBC) [4], mejorando así la BER. Este algoritmo se compara con una técnica sencilla de *beamforming* en transmisión basada en la ecualización de fase del canal [5]. Esta técnica es sencilla de implementar en el transmisor (Tx) y facilita la decodificación en el receptor (Rx). Se envía la misma información desde cada antena transmisora, multiplicada por un factor de fase equivalente a la inversa de la fase del canal asociada a cada una de las antenas transmisoras. Así, las señales transmitidas por cada antena se suman coherentemente en la antena receptora.

El objetivo de este trabajo es analizar y simular en las bandas de 28 GHz y 37 GHz cómo varía el rendimiento obtenido en cuatro escenarios diferentes dentro de un vagón, en función de la altura del receptor y de la posición del transmisor. Todos los escenarios se analizan para 4 y 8 antenas transmisoras y comparando tanto el algoritmo HQSTBC como el *beamforming* comentado anteriormente. Las simulaciones se realizan a partir de las matrices del canal obtenidas mediante una campaña de medidas.

El artículo se organiza como sigue. La Sección II describe el estudio experimental, la Sección III presenta la metodología. La Sección IV describe los resultados obtenidos en función del escenario, la banda de frecuencias, el número de antenas transmisoras y la técnica MISO-OFDM. Por último, la Sección V presenta las conclusiones deducidas del trabajo.

II. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

A. Entorno de medidas

Las mediciones se realizaron en el interior de un tren de metro de la empresa de transportes Metrovalencia de Valencia (España). El tren constaba de cuatro vagones: el primero y el último tenían una pequeña cabina para el conductor y asientos para los pasajeros, mientras que los dos vagones del medio eran sólo para pasajeros. Todos los vagones tenían numerosos pasamanos, asientos y otros elementos. Los asientos eran de resina moldeada, reforzada con fibra de vidrio, y tanto los pasamanos como el techo eran de acero inoxidable. El suelo era de caucho estratificado, las ventanas de vidrio y las puertas de aluminio y vidrio.

El tren tiene una transición entre vagones consecutivos (Ver Fig. 1). Las dimensiones máximas de los dos vagones centrales son $2,55 \times 4 \times 14,5$ m y las correspondientes a los vagones extremos son $2,55 \times 4 \times 14,62$ m. La longitud total del tren es de 58,25 m.

B. Equipamiento

Se usó un analizador de redes vectorial comercial (VNA) (Keysight PNA N5227A 10 MHz – 67 GHz), y un enlace de radio sobre fibra (RoF) (EMCORE, Optiva OTS-2, 40 GHz). Se utilizaron antenas omnidireccionales de banda ultra ancha (STEATITE Q-PAR ANTENNAS, 0,8-40 GHz) en el Tx y el Rx, con polarización vertical y un patrón de radiación omnidireccional en el plano horizontal. La antena receptora se situó en un sistema de posicionamiento XY, utilizado para implementar un *array* rectangular uniforme (URA) de 7×7 , de forma que se pudieran medir 49 funciones de transferencia complejas para cada posición del transmisor. La separación de los elementos del URA era de 3,04 mm (menos de $\lambda/2$; 3,5 mm a 40 GHz). La respuesta del canal $H(f)$ se midió en un ancho de banda de 15 GHz (de 25 a 40 GHz, 8192 puntos).

C. Escenarios medidos

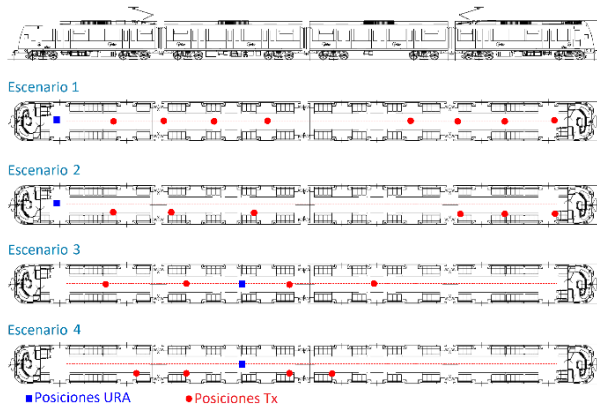


Fig. 1. Posición del Rx y Tx en cada uno de los escenarios

Las medidas se realizaron en visión directa (line-of-sight, LOS). La altura Rx se fijó en 1,65 m. Se examinaron cuatro escenarios (Fig. 1):

- Escenario 1 (esquina - de pie): La altura de los terminales Tx se fijó en 1,45 m. Tanto el Tx como el Rx se situaron en el pasillo central del vagón. Este escenario corresponde a la situación en la que un pasajero viaja de pie. El Rx se situó en el extremo del vagón, a 2 m de la cabina del tren. Se especificaron ocho ubicaciones de Tx, con lo que las distancias entre la cabina del tren y el Tx fueron de $d = \{7, 12, 17, 22, 37, 42, 47, 52\}$ m.
- Escenario 2 (esquina - sentado): El Rx se situó como en el escenario 1. La altura del Tx se fijó en 0,85 m y el Tx se situó cerca de los asientos, representando la situación en la que un pasajero viaja sentado. Se especificaron 6 ubicaciones del

Tx, lo que dio lugar a distancias entre Tx y la cabina del tren de $d = \{7, 14, 22, 42, 47, 52\}$ m.

- Escenario 3 (centro - de pie): El URA se colocó en el centro del vagón (a 19,5 m de la cabina), mientras que la antena de Tx se colocó en la posición central del pasillo a una altura de 1,45 m. Se midieron cuatro ubicaciones de Tx. $d = \{5,5, 14,5, 24,5, 33,5\}$ m.
- Escenario 4 (centro - sentado): El URA se colocó como en el escenario 3, mientras que la antena Tx se colocó cerca de los asientos como en el escenario 2 midiéndose cuatro ubicaciones $d = \{9,5, 14,5, 24,5, 29,5\}$ m.

III. METODOLOGÍA

A. Configuraciones estudiadas

En todos los escenarios descritos anteriormente, el Tx actuaba como el equipo del usuario (UE) y el Rx como el punto de acceso (AP). La idea era aumentar la complejidad del AP y simplificar el UE con una sola antena. Por ello se estudia en este trabajo el enlace descendente ($AP \rightarrow UE$), simulando un sistema MISO.

Se estudian dos configuraciones de 4 y 8 antenas del transmisor URA 7×7 , ya que el algoritmo HQSTBC requiere que el número de antenas sea una potencia de dos.

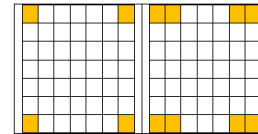


Fig. 2. Antenas elegidas (en amarillo) del transmisor URA (7×7) para 4 y 8 antenas

La Fig. 2 muestra las configuraciones elegidas para cuatro y ocho antenas. Se eligieron las configuraciones que presentaban las correlaciones más bajas entre las antenas de transmisión.

B. Especificaciones de la capa física

Las bandas de 28 GHz y 37 GHz se analizaron en base a las especificaciones establecidas en el estándar 802.15.3c [6]. Los esquemas de modulación estudiados fueron la 64 *quadrature amplitude modulation* (64QAM) y la 16QAM. Las tasas de codificación fueron $1/2$, $3/4$ y $5/8$. Las técnicas MISO elegidas fueron HQSTBC y equalización de fase del canal (*beamforming* en transmisión). Por último, los símbolos OFDM se transmitieron a través de 512 subportadoras, de las que 371 subportadoras son usadas para datos con una separación de 5,15 MHz ocupando un ancho de banda de 2 GHz.

La Tabla I muestra la tasa binaria (R_b) correspondiente a cada uno de los esquemas de modulación y codificación (*modulation and coding schemes*, MCS). Es importante señalar que la tasa de bits es la misma para todas las técnicas MISO implementadas.

TABLA I

TASA DE BIT PARA CADA ESQUEMA DE MODULACIÓN Y CODIFICACIÓN

MCS	Modulación y codificación	Tasa binaria(Gbps)
4	1/2 16QAM	3.08
5	3/4 16QAM	4.62
7	5/8 64QAM	5.77

IV. RESULTADOS

A. SNR

En cada distancia axial entre la cabina del tren y el UE se promedió la SNR en las 371 frecuencias y las 49 combinaciones (7x7x1), ya que en transmisión y recepción se utilizaron 7x7 URA y 1 antena, respectivamente. La Fig. 3 muestra la SNR media utilizada para obtener el rendimiento. Muestra, para cada distancia, la SNR obtenida a 28 GHz y 37 GHz en cada uno de los cuatro escenarios estudiados.

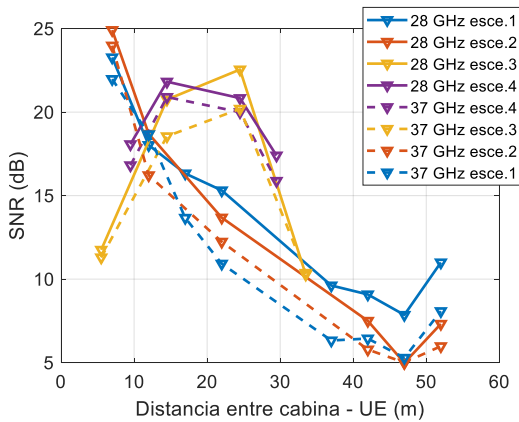


Fig. 3. SNR (dB)

La SNR se normalizó seleccionando un valor medio de 5 dB en el peor caso (37 GHz, escenario 2, distancia $d = 47$ m). Este valor de umbral de SNR se eligió para poder observar las variaciones en el rendimiento, ya que con SNR mayores no se producían errores. El método de cálculo aplicado fue el descrito en [7], con una potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) de 0 dBm y un nivel de ruido de -79,4 dBm. El análisis de los cuatro escenarios mostró que la SNR era mayor en la banda de 28 GHz (línea continua). Por ejemplo, a 29,5 m se observaron SNR de 17,4, 16,5, 12 y 11 dB en los escenarios 4, 3, 1 y 2, respectivamente.

B. Evaluación del rendimiento

El objetivo es analizar el rendimiento aplicando técnicas MISO sencillas en las bandas de 28 GHz y 37 GHz en los cuatro escenarios especificados anteriormente. Para ello, se eligieron las configuraciones de antena mostradas en la Fig. 2, ya que nuestros objetivos eran determinar qué algoritmo era el mejor y qué número de antenas proporcionaría el mejor rendimiento en términos de distancia máxima alcanzable, SNR y esquema MCS. Los algoritmos simulados se implementaron con el software Matlab utilizando el

método Monte Carlo. Para calcular la tasa de error de paquetes (*Packet Error Rate*, PER), primero se simularon 100 000 paquetes por posición, para obtener un PER mínimo de 10^{-3} , que es lo suficientemente bajo como para permitir la comparación de los distintos algoritmos. Por último, se calculó el rendimiento a partir del PER y la tasa binaria (R_b) mostrada en la Tabla I como $R_b \times (1 - PER)$ [7].

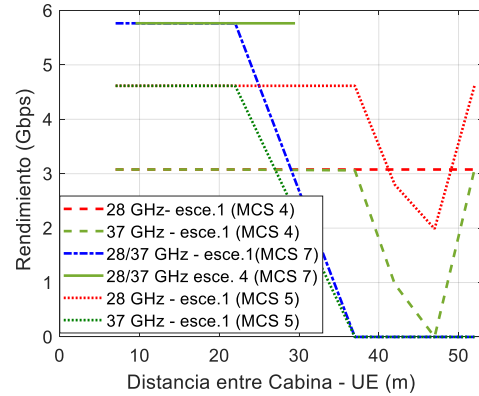


Fig. 4. Mejor rendimiento a 28 y 37 GHz (Escenarios 1 y 4)

1) Según el escenario y la banda

La Fig. 4 muestra los mejores resultados obtenidos en las bandas de 28 GHz y 37 GHz. Así pues, se observan los escenarios 1 y 4, utilizando el algoritmo de *beamforming* en transmisión con 8 antenas. Con el AP al final del vagón y el usuario de pie (Escenario 1) aplicando los esquemas MCS 4 (3,08 Gbps) y MCS 5 (4,62 Gbps) se obtuvieron distancias máximas de 52 y 37 m respectivamente en la banda de 28 GHz, mientras que en la banda de 37 GHz las distancias máximas correspondientes fueron de 37 y 22 m. Esto es debido a que en todos los escenarios la SNR aplicada fue mayor a 28 GHz, como muestra la Fig. 3. Sin embargo, al aplicar el esquema MCS 7 tanto en la banda de 28 GHz como en la de 37 GHz, el rendimiento máximo alcanzado es de 5,7 Gbps hasta una distancia de 22 m. Esto se debe a que la SNR mínima necesaria es mayor, ya que la modulación utilizada en este esquema fue 64QAM (véase la Tabla I).

Por otro lado, cuando el AP se encuentra en el centro del vagón y el usuario sentado (Escenario 4) se alcanzó el máximo rendimiento (5,7 Gbps) a distancias de hasta 29,5 m tanto en la banda de 28 GHz como en la de 37 GHz. Sin embargo, es importante señalar que en el resto de los escenarios no se realizaron mediciones a 29,5 m, por lo que no podemos concluir que el Escenario 4 sea el único escenario en el que se puede alcanzar esta distancia bajo el esquema MCS 7.

En la Tabla II se comparan los dos algoritmos utilizados en este estudio en la banda de 28 GHz, con el AP en el extremo del vagón (Escenarios 1 y 2). La tabla muestra la distancia máxima alcanzada y la configuración con la que se logró (véase la Fig. 2). También muestra la SNR mínima necesaria para mantener el máximo rendimiento con los distintos esquemas MCS. Muestra

que el Escenario 1 ofreció el mejor rendimiento en términos de distancia máxima alcanzada. Por ejemplo, utilizando 8 antenas, observamos que aplicando el algoritmo de *beamforming* se podían alcanzar distancias de 52 y 37 m usando los esquemas MCS 4 (3,08 Gbps) y MCS 5 (4,6 Gbps), respectivamente. Sin embargo, en las mismas condiciones en el Escenario 2, el rendimiento máximo se mantuvo hasta 42 m y 22 m aplicando MCS 4 y MCS 5, respectivamente. Esto se debe a que en el Escenario 1, según la Fig. 3, la SNR aplicada a 37 y 52 m era de 9,6 dB y 11 dB, respectivamente. Por lo tanto, se ha superado la SNR mínima requerida para la configuración y el esquema MCS aplicado (Tabla II).

TABLA II
MÁXIMA DISTANCIA, MÍNIMA SNR Y CONFIGURACIÓN DE ANTENA
PARA CADA ALGORITMO Y PARA ESCENARIO 1 Y 2 A 28 GHZ

Escenario	MCS	Algorit. MISO	Max. Dist. cabina - UE (m)	conf. Ant.	Min SNR (dB)
1	4	HQSTBC	37	4	9.4
				8	9.6
		BEAM.	37	4	8.2
				8	7.3
	5	HQSTBC	22	4	14.0
				8	14.0
		BEAM.	37	4	9.6
				8	7.8
	7	HQSTBC	--	--	--
				22	4
BEAM.		22	4	10.2	
			8	10.2	
2	4	HQSTBC	22	4	10.1
				8	10.5
		BEAM.	22	4	8.7
				8	6.6
	5	HQSTBC	22	4	12.9
				8	13.6
		BEAM.	22	4	11.1
				8	8.1
	7	HQSTBC	--	--	--
				14	4
		BEAM.	22	4	12.0
				8	12.0

2) Según el algoritmo

Se obtuvieron mejores resultados con el algoritmo de *beamforming* que con el algoritmo HQSTBC, ya que este último está muy influenciado por la correlación media entre las antenas cuasi-ortogonales de la matriz de código espacio-temporal [7]. Esto se observa en la Tabla II, que muestra que, independientemente del escenario, para un número determinado de antenas y esquema MCS, la distancia alcanzada utilizando el algoritmo HQSTBC es siempre menor o igual que la alcanzada con el algoritmo *beamforming*. Nos podemos fijar en los casos en los que las distancias son idénticas, la SNR mínima requerida es siempre mayor para el algoritmo HQSTBC. Por ejemplo, en el Escenario 1 utilizando 8 antenas y el MCS4/BEAM es posible alcanzar hasta 52 m, aplicando una SNR mínima de 6,7 dB para mantener un caudal máximo de 3,08 Gbps. En comparación, utilizando MCS4/HQSTBC se consigue una distancia de 37 m aplicando una SNR

mínima de 9,6 dB. Además, utilizando el algoritmo HQSTBC y el esquema MCS 7 el rendimiento es cero en todas las distancias. Esto se debe a que utiliza una modulación 64QAM y la correlación tiene una fuerte influencia en el rendimiento, por lo que se necesita una SNR más alta que la mostrada en la Fig. 3. Sin embargo, en el escenario 1, aplicando el algoritmo de *beamforming* en combinación con los esquemas MCS 7 se pueden alcanzar hasta 22 m tanto con 4 como con 8 antenas.

V. CONCLUSIÓN

En este trabajo se han analizado técnicas MISO-OFDM para analizar la transmisión en el interior de un tren en las bandas de 28 y 37 GHz en términos de SNR y rendimiento. Se analizaron cuatro escenarios según la posición del AP (al final o en medio del vagón) y la altura del UE (de pie o sentado). Se ha simulado un algoritmo espacio-temporal (HQSTBC) y un algoritmo basado en *beamforming* en transmisión con 4 y 8 antenas. Los resultados muestran que el mejor algoritmo en términos de SNR mínima requerida es el de *beamforming* en transmisión con 8 antenas. Además, los mejores resultados cuando el AP está al final del vagón son cuando el UE está de pie, mientras que cuando el AP está en el centro es mejor que el UE esté sentado. El rendimiento máximo se alcanza a 28 GHz utilizando *beamforming* en transmisión porque este algoritmo no está influenciado por la correlación sino por la SNR aplicada. Lo contrario ocurre con el algoritmo HQSTBC, ya que es un algoritmo muy influenciado por la correlación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por los proyectos PID2019-107885GB-C33 y TEC2017-86779-C2-2-R (AEI/FEDER, UE). Agradecer a Julia Iserte Villalba y Francisco M. Brox Lopez (personal de FGV) por facilitar la campaña de medidas.

REFERENCIAS

- [1] World Bank. 2017. Railway reform: Toolkit for improving rail sector performance. Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/529921469672181559/Railway-reform-Toolkit-for-improving-rail-sector-performance>
- [2] K. Guan, G. Li, T. Kürner et al., "On millimeter wave and THz mobile radio channel for smart rail mobility," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, pp. 5658–5674, Nov. 2016.
- [3] Provisional final acts (WRC-19), The World Radiocommunication Conference (Sharm el-Sheikh, 2019).
- [4] K. Anoh, et al., "Full-Diversity QO-STBC Technique for Large-Antenna MIMO Systems", *Electronics*, vol. 6 (2), 37, May 2017.
- [5] T. Kaiser, "Smart Antennas: State of the Art," Hindawi Publishing Corporation, 2005.
- [6] 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.
- [7] C. Sanchis, M.T. Martínez, J.M. Molina, J. Pascual and J.V. Rodríguez, "Experimental Study of MIMO-OFDM Transmissions at 94 GHz in Indoor Environments," *IEEE Access*, vol. 5, 7488-7494, Apr. 2017.