

Caracterización del canal radio en un entorno interior en la banda de 60 GHz

María Teresa Martínez Inglés⁽¹⁾, Juan Pascual García⁽¹⁾, José Víctor Rodríguez⁽¹⁾, José María Molina García-Pardo⁽¹⁾, Leandro Juan Llácer⁽¹⁾, Davy P. Gaillot⁽²⁾, Martine Liénard⁽²⁾ and Pierre Degauque⁽²⁾

{mteresam, juan.pascual, josemaria.molina, jvictor.rodriguez, leandro.juan}@upct.es

⁽¹⁾ Departamento de Tecnologías de la Información y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Cartagena 30202, España.

⁽²⁾ Telecommunication, Interference and Electromagnetic Compatibility Research Group, University of Lille 1, Villeneuve d'Ascq 59655, France.

Abstract- This work presents a set of 10×10 MIMO measurements at 60 GHz in an indoor environment. A theoretical and experimental analysis has been done by means of a 3D ray tracing tool and the high resolution parameter estimator RiMAX. The results show the complexity of modeling the radio channel at the millimeter-wave frequency range. Nonetheless, the delay and angular characteristics derived from the measured and theoretical data were found in good agreement.

I. INTRODUCCIÓN

La banda situada en torno a los 60 GHz ha emergido como una de las más prometedoras bandas para el desarrollo de los futuros sistemas de comunicaciones inalámbricos de alta velocidad de datos [1]. El gran ancho de banda disponible, así como la elevada atenuación presente en los 60 GHz, permite el desarrollo de sistemas de comunicaciones interiores de corto alcance con transmisores de poca potencia. Además, estas comunicaciones pueden alcanzar tasas de varios gigabits por segundo y una importante reducción de las interferencias.

La realización de campañas de medidas es esencial para el estudio del canal de propagación en los 60 GHz. Dichas campañas posibilitan la extracción de importantes parámetros estadísticos como por ejemplo el valor cuadrático medio de la dispersión del retardo (RMS según las siglas inglesas), el perfil de retardo normalizado (PDP según las siglas inglesas), la dispersión angular, etc. Las campañas de medidas son también útiles para generar modelos del canal multicamino. Además, las medidas sirven para verificar la precisión de los modelos deterministas que permiten la obtención de las propiedades del canal en 60 GHz a partir de un entorno predefinido. Los modelos deterministas se basan en la aplicación de la teoría de la óptica geométrica y en la teoría de la difusión de las ondas electromagnéticas y son habitualmente desarrollados en forma de técnicas de trazado de rayos.

En este trabajo se muestran los resultados de una campaña de medidas a lo largo de un ancho de banda de 9GHz, situados en la banda de los 60 GHz, en un entorno de interiores mediante arrays lineales uniformes virtuales (ULA). El entorno interior seleccionado es un laboratorio tal como se observa en la Fig. 1. Los arrays lineales constan tanto en el transmisor como en el receptor de 10 antenas. El transmisor se encuentra situado a 3,40 metros del receptor. Gracias a la medida de los 10×10 canales MIMO se ha podido extraer el PDP del entorno para las posiciones medidas. Además, los canales MIMO han sido simulados con una herramienta de trazado de rayos desarrollada en el grupo de investigación y

estimados con la conocida técnica RiMAX. Estas técnicas permiten obtener los parámetros que caracterizan los canales radio del entorno.

El trabajo se estructura de la siguiente manera: en la Sección II se presenta el escenario medido y el medidor del canal, en la Sección III se explican los detalles y características más importantes del trazador de rayos y del algoritmo RiMAX, la Sección IV contiene los resultados y su análisis y finalmente la Sección V muestra las conclusiones.

II. CAMPAÑA DE MEDIDAS

Las medidas mostradas en este artículo han sido realizadas en un laboratorio de la Universidad Politécnica de Cartagena. Este laboratorio es una habitación de dimensiones $4,5 \times 6,5 \times 2,5$ metros y está amueblada con varios armarios, mesas, estantes y cajoneras. Las paredes son de yeso mientras que el suelo es de cemento. El laboratorio tiene varias ventanas con cristales y existen pilares recubiertos de yeso. En la Fig.1. se muestra una fotografía de parte del laboratorio.



Fig. 1. Fotografía del entorno medido.

El medidor del canal emplea un Analizador de Redes Vectorial ZVA67 de la marca Rohde & Schwarz. El rango dinámico de nuestro medidor es de 110 dB a 60 GHz usando una frecuencia intermedia de 10 Hz entre los dos puertos hembra de 1.85 mm. El esquema del medidor diseñado se muestra en la Fig. 2.

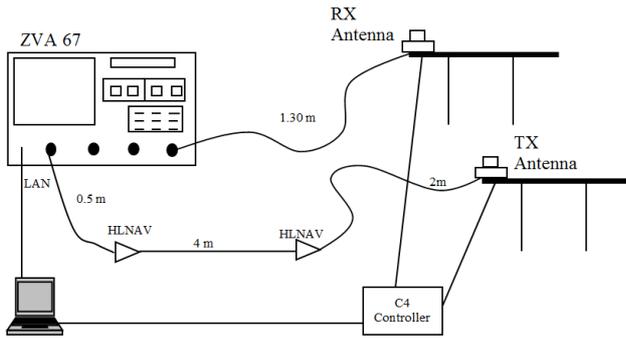


Fig. 2. Esquema del medidor del canal.

Como se aprecia en la Fig. 2. la antena receptora es conectada al puerto receptor del analizador de redes mediante un cable coaxial de 1,30 m. La señal del puerto transmisor es amplificada dos veces antes de llegar a la antena transmisora. La longitud total del cable que conecta al puerto transmisor con la antena asociada es de 6,5 m. (4 m. + 2 m. + 0,5 m.). Las antenas empleadas poseen una ganancia de 5 dBi (Q-par QOM55-65 VRA 55 hasta 65 GHz antena omni-direccional con un conector de tipo V). Los dos amplificadores poseen una ganancia de 25 dB y su referencia es HXI HLNA-465. Las pérdidas de inserción del cable empleado son alrededor de 6 dB/m a 66 GHz. La polarización de las antenas es vertical.

Cada antena está colocada en un posicionador lineal conectado a un controlador C4. Gracias al posicionador se ha obtenido una matriz MIMO de 10×10 posiciones. Cada posición en el transmisor y el receptor está separada por una distancia de 2 mm.; distancia menor que $\lambda/2$, con $\lambda=5$ mm. El proceso de medida es controlado por un programa desarrollado en el grupo de investigación. Este programa se ejecuta en un ordenador portátil que se conecta al controlador C4 y también al analizador de redes mediante un cable de red de área local.

El canal es medido en frecuencia a lo largo de 8192 frecuencias igualmente separadas entre 57 y 66 GHz, lo cual implica un paso frecuencial de 1,1 MHz siendo la frecuencia intermedia de 10 Hz. El ancho de banda es por tanto de 9 GHz lo cual posibilita una resolución de $1/9$ ns.=0,11 ns. Para no saturar el primer amplificador la potencia transmitida por el analizador de redes fue fijada a 0 dBm. Con esta potencia se consigue un rango dinámico de más de 100 dB en la frecuencia de 66 GHz ya que toda la atenuación de los cables es compensada por los dos amplificadores. Durante el proceso de medidas no había ninguna persona en la habitación y por lo tanto el canal puede considerarse estacionario.

III. ANÁLISIS TEÓRICO DEL CANAL

La herramienta de trazado de rayos 3D empleada en este trabajo fue programada totalmente en Matlab. Como resulta habitual, el trazador halla las componentes reflejadas y difractadas que llegan al receptor. Para estudiar el canal con mayor profundidad también se calcularon las componentes fruto de una difracción y de una reflexión posterior. El número máximo de reflexiones es dos, mientras que el número máximo de reflexiones tras una difracción se limitó a uno. Estos valores aseguraron una convergencia adecuada en todas

las simulaciones ya que no se encontraron diferencias sustanciales entre las simulaciones con dos y tres reflexiones.

El laboratorio ha sido representado con cuidado para que el trazador sea preciso. Como se aprecia en la Fig. 3. las mesas y estantes han sido representados con detalle. Además, se han incluido cuatro rectángulos metálicos que representan las cavidades metálicas que contienen los tubos fluorescentes del techo. Otros elementos del laboratorio como los armarios y cajoneras han sido asimismo incorporados en el modelo.

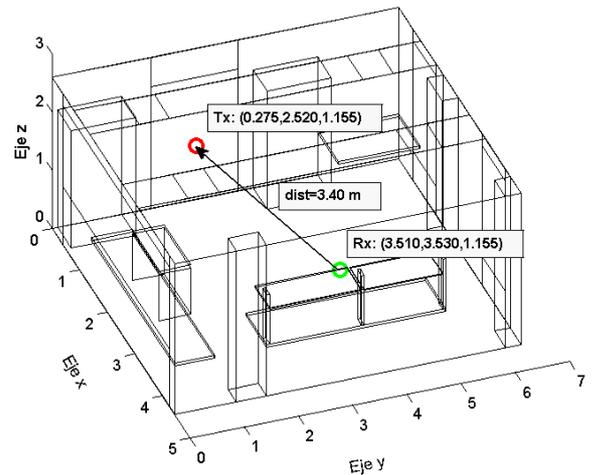


Fig. 3. Modelo 3D del escenario medido y posiciones del transmisor y receptor referencia de los arrays lineales.

Otra de las tareas más importantes, para asegurar la precisión del trazador de rayos, es la de asignar a los elementos del escenario unas propiedades electromagnéticas correctas. Si las permitividades y conductividades empleadas en la simulación no corresponden con los valores reales, entonces los retardos y valores de atenuación de las componentes simuladas serán incorrectos. Los valores de permitividad y conductividad empleados en este trabajo se exhiben en la Tabla 1. Entre paréntesis se indican los trabajos de los que se han obtenido los valores mostrados.

| Elemento | Material | Permitividad | Cond. |
|--------------|----------------|--------------|-------|
| Techo/pared | Yeso [2] | 2.81-0.046i | 0.15 |
| Suelo | Cemento [3] | 6.5-0.43i | 1.43 |
| Ventanas | Cristal [2] | 6.94-0.176i | 0.59 |
| Puerta | Madera [4] | 1.54-0.095i | 0.32 |
| Armario/Mesa | Aglomerado [4] | 2.86-0.016j | 0.32 |

Tabla 1. Propiedades electromagnéticas de los elementos del laboratorio.

Los canales MIMO medidos fueron procesados con el estimador de alta resolución basado en máxima verosimilitud RiMAX. Dicha técnica trata el problema de estimación mediante un procedimiento de mínimos cuadrados ponderados no lineales [5]. La matriz ponderada es obtenida con las contribuciones al canal radio de las componentes multicamino debidas al “scattering” difuso (DMC “dense multipath components”). Así, este estimador multidimensional fue construido para extraer de los canales radio muestreados los parámetros de propagación (retardo

temporal, ángulos de acimut y ganancias complejas) así como las componentes multicamino de tipo DMC. El procedimiento DMC es estocástico por naturaleza e incluye todos los caminos de propagación que no pueden ser resueltos. La incorporación de las componentes multicamino en el modelo ha mostrado su capacidad para mejorar la exactitud y validez de los caminos de propagación estimados.

Se seleccionó un cuarto del ancho de banda total (2.24 GHz) al final de la banda medida para garantizar la validez del vector de dirección espacial ("steering vector") de banda ancha en la banda de frecuencias investigada. Además, se seleccionó una frecuencia cada ocho puntos para reducir el número de puntos en el dominio temporal. De este modo, el número final de frecuencias utilizadas en el algoritmo RiMAX fue de 256. El número de canales MIMO también se redujo, ya que del array 10×10 disponible se seleccionó un array de tamaño 8×8 . La apertura espacial es modelada utilizando el vector de dirección ULA clásico de tipo banda estrecha. El vector ULA restringe la estimación espacial entre -90° y 90° pero en nuestro estudio es suficiente para captar la física de los mecanismos de propagación. Finalmente, hay que mencionar que el modelo considera que las antenas poseen propiedades isotrópicas para todas las frecuencias y por tanto no tiene en cuenta los patrones de radiación de banda ancha.

IV. RESULTADOS

En la Fig. 4. se muestran los parámetros de los caminos de propagación (tiempo de llegada y dirección de llegada/salida de acimut) estimados por el algoritmo RiMAX. En esa misma figura también se muestran los parámetros obtenidos con las simulaciones del trazador 3D. Ambos resultados resaltan la complejidad del canal radio medido, especialmente en esta banda de ondas milimétricas en la que la longitud de onda es mucho menor que el escenario medido. Se observa que los parámetros estimados y simulados pueden ser agrupados en grupos de retardo delimitados con valores energéticos similares. Los caminos de propagación más energéticos, que llegan dentro de los primeros 20 ns., pueden ser también agrupados en grupos angulares delimitados mientras que los caminos menos energéticos muestran una mayor dispersión angular. En estos resultados cabe destacar que el trazador 3D simuló el canal en una única frecuencia (61,5 GHz) para poder obtener los parámetros angulares requeridos.

En la Fig. 5. Se muestran los PDPs medidos, estimados y simulados. El canal estimado con RiMAX así como el canal obtenido con el trazador 3D muestran una buena concordancia con el PDP experimental. El PDP RiMAX incluye las componentes de tipo DMC estimadas mientras que el PDP del trazador no incluye el ruido. Para obtener el PDP simulado se sigue el mismo procedimiento empleado con las mediciones. En primer lugar, la respuesta en frecuencia en el ancho de banda estudiado es simulada para todos los canales MIMO. En segundo lugar, las respuestas al impulso temporales, necesarias para calcular el PDP final, son calculadas mediante la transformada de Fourier de las respuestas en frecuencia. Las simulaciones del trazador se llevaron a cabo en toda la banda de interés (57-66 GHz) y, por lo tanto, la resolución temporal de las simulaciones es idéntica a la resolución de las medidas. Sin embargo, debido a la duración de cada simulación, el ancho de banda estudiado fue muestreado con la mitad de las frecuencias empleadas en las mediciones de los canales (4096

frecuencias en lugar de 8192 frecuencias). No obstante, el número de frecuencias utilizadas en el trazador es suficiente para representar todas las réplicas existentes, como se puede apreciar en la Fig. 5. Para aumentar la precisión de las simulaciones los patrones de radiación de las antenas, ofrecidos por el fabricante de las mismas, fueron incluidos en el procedimiento de cálculo del campo eléctrico en cada frecuencia. Así, no fue necesario incluir en el trazador de rayos ningún procedimiento de ajuste basado en las medidas.

El retardo medio, la dispersión del retardo, el ángulo medio de acimut y la dispersión angular de acimut fueron calculados a partir de los resultados previos. Estos parámetros se muestran en la Tabla 2. Con el objetivo de considerar solo los caminos de propagación más energéticos se aplicó un umbral de 20 dB. Hay que tener en cuenta que las medidas únicamente permiten obtener directamente los parámetros referentes al retardo. Estos parámetros medidos muestran una adecuada concordancia con los obtenidos mediante el trazador 3D y el algoritmo RiMAX, a pesar de la limitada complejidad del primero y del reducido ancho de banda empleado por el segundo. El retardo medio simulado es menor que el valor medido mientras que el valor estimado es algo mayor. Esto resalta las dificultades de modelar con precisión un escenario real en esta banda de frecuencias. En cuanto a las características angulares también se ha encontrado una buena correspondencia entre los valores medidos y los valores estimados y simulados. La Tabla 2 muestra asimismo las pérdidas de propagación calculadas a partir de los PDP medidos, estimados y simulados. Si utilizamos la fórmula de Friis, para la distancia existente entre el transmisor y el receptor, se obtienen unas pérdidas de propagación de 78.8 dB, 6.58 dB por encima del valor hallado en las medidas. Esta diferencia es cercana al doble de la ganancia de la antena utilizada (4 dB en la banda de interés).

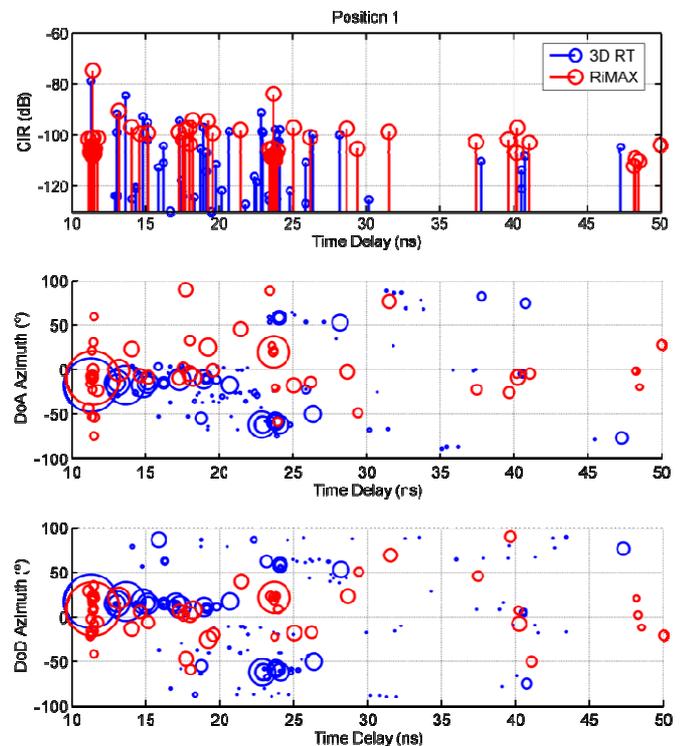


Fig. 4. Retardo temporal, ángulos de llegada y salida de acimut estimados (RiMAX) y simulados (Trazador de rayos 3D).

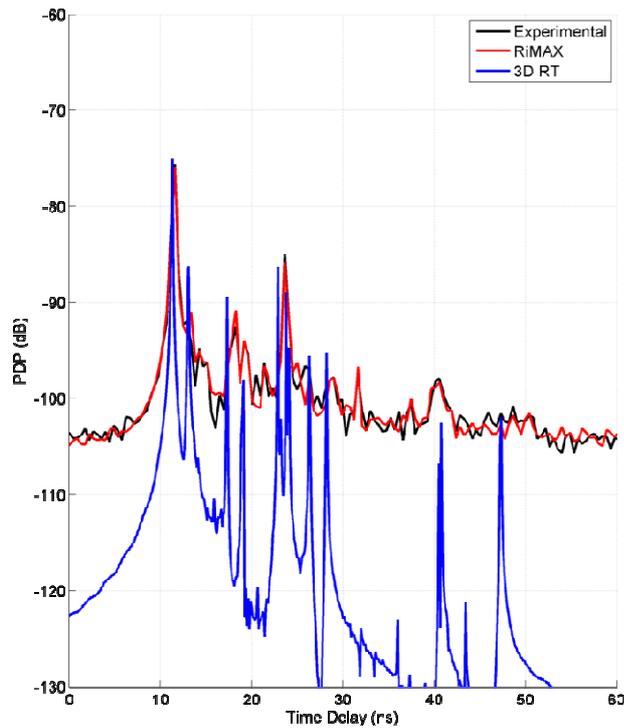


Fig. 5. PDPs medidos, estimados y simulados. El PDP RiMAX incluye las componentes multicamino (DMC) mientras que los resultados simulados con el trazador no incluyen el ruido.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se han llevado a cabo una campaña de medidas 10×10 MIMO, mediante arrays uniformes lineales (ULA), en un entorno interior en la banda de 60 GHz a lo largo de un ancho de banda de 9 GHz. Los canales radio medidos fueron analizados con el algoritmo RiMAX de estimación de parámetros de alta resolución. Asimismo, los canales radio también fueron simulados con una herramienta de trazado de rayos 3D. Gracias a estas técnicas, los parámetros angulares y de retardo fueron calculados para la

posición estudiada en este trabajo. Aunque las características principales angulares, de retardo y ganancia fueron correctamente capturadas por las técnicas de estimación y simulación, los resultados obtenidos revelan la dificultad estructural de la banda milimétrica y la dificultad de describir fielmente los mecanismos de propagación en este tipo de entornos confinados. Para incrementar en un futuro la precisión de la herramienta de trazado de rayos 3D se programará el mecanismo de propagación de "scattering" difuso. Además, se medirán más posiciones en este entorno de interiores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) de España a través del proyecto TEC2010-20841-C04-03 y por fondos FEDER europeos.

REFERENCIAS

- [1] P. Smulders, "Exploiting the 60 GHz band for local wireless multimedia access: prospects and future directions," *Communications Magazine, IEEE*, vol.40, no.1, pp.140-147, Jan 2002.
- [2] Lostonlen, Y., Corre, Y., Louet, Y., Le Helloco, Y., Collonge, S., "Comparison of measurements and simulations in indoor environments for wireless local networks at 60 GHz", *IEEE 55th Vehicular Technology Conference*, vol. 1, pp. 389-393, 2002.
- [3] Vainikainen Pertti, "On the Properties of Dielectric Materials in Mobile Communications Environments", *COST 2100 TD(10)12097*, Bologna, Italy, 23-25 November 2010.
- [4] Correia L. M., Frances, P.O., "Estimation of materials characteristics from power measurements at 60 GHz", *5th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Wireless Networks-Catching the Mobile Future*, vol. 2, pp. 510-513, 18-23 September 1994.
- [5] A. Richter, "Estimation of radio channel parameters: models and algorithms", Thesis, TU Ilmenau, 2005.

| | Mean delay (ns) | Delay spread (ns) | Mean azimuth (°) | Angular spread (°) | Path Loss (dB) |
|--------------|-----------------|-------------------|------------------|--------------------|----------------|
| RiMAX | 12.83 | 3.76 | -17.48 | 8.27 | 72.67 |
| Exp. | 12.50 | 3.13 | | | 72.28 |
| 3D RT | 12.44 | 3.19 | -19.70 | 10.64 | 68.84 |

Tabla 2. Características de retardo y angulares calculadas a partir de los PDP estimados (RiMAX), experimentales y simulados (trazador 3D) con un umbral de 20 dB. Las pérdidas de propagación se calculan sin ningún umbral en todos los casos.