

Susana Loreda Rodríguez nació en Gijón en 1972. Obtuvo el título de Ingeniera Técnica de Telecomunicación en 1994, de Ingeniera de Telecomunicación en 1997 y el título de Doctora Ingeniera de Telecomunicación en 2001, todos por la Universidad de Cantabria.

Durante los años 1998-2001 desarrolló su actividad investigadora en el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria y desde Noviembre de 2001 es Investigadora contratada, dentro del programa Ramón y Cajal, en el Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Oviedo.

Sus líneas de investigación incluyen los métodos numéricos y de alta frecuencia aplicados a la caracterización del canal radio, así como la caracterización experimental de éste tanto en interiores como en exteriores. Es autora de varios artículos publicados en revistas internacionales y comunicaciones en congresos nacionales e internacionales.

Datos de la Tesis

Título: **Modelo de Canal Específico del Entorno para el Análisis y Simulación de Sistemas Vía Radio en Interiores.**

Director: Rafael Pedro Torres Jiménez.

Departamento: Departamento de Ingeniería de Comunicaciones.
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.
Universidad de Cantabria.

Fecha de Lectura: 2 de Abril de 2001.

Calificación: Sobresaliente *Cum Laude*.

Resumen

El contexto en el que puede enmarcarse esta tesis viene dado por la rápida expansión que, en los últimos años, está experimentando el sector de las comunicaciones inalámbricas o comunicaciones vía radio. Así, puede hablarse, por ejemplo, del crecimiento y evolución de las redes de área local inalámbricas (WLANs), del surgimiento de las redes de área personal inalámbricas (WPANs) y de la inminente llegada de los servicios móviles de tercera generación. Los diferentes estándares y especificaciones definidos para estos servicios han adoptado principalmente las bandas de 1.8, 2.4 y 5 GHz.

Las redes inalámbricas, tanto de área local como personal, operan en entornos de interiores y también en picoceldas y microceldas urbanas, escenarios todos éstos en que también operarán los sistemas de tercera generación, y en los que la aleatoriedad y la complejidad del canal radio hacen imprescindible un profundo conocimiento del mismo, que permita el óptimo desarrollo y planificación del sistema de comunicaciones a implantar. Surge, por tanto, la necesidad de desarrollar modelos de propagación adecuados, puesto que la realización de medidas que cubran todas las posibilidades en cuanto a entornos de propagación y sistemas de comunicación se refiere, resulta una opción inviable.

Hasta hace poco tiempo, los modelos y métodos de análisis del canal radio eran principalmente de tipo estadístico, basados en el ajuste de numerosos datos experimentales a distribuciones de probabilidad conocidas. En los últimos años, sin embargo, están tomando relevancia los métodos basados en la simulación mediante ordenador de la propagación radioeléctrica, denominados métodos deterministas, específicos del entorno (site-specific), o también métodos de trazado de rayos, pues están basados en aproximaciones de alta frecuencia de la propagación electromagnética. El interés de estos métodos radica en la compleja naturaleza de los entornos microcelulares urbanos y picocelulares de interiores, la cual hace necesario tener en cuenta las propiedades geométricas y electromagnéticas de los diferentes edificios y otros obstáculos que existan en el entorno de propagación. Las técnicas de trazado de rayos producen modelos deterministas del canal de propagación, a partir de los cuales se puede obtener una caracterización estadística completa del canal en el escenario de interés. Sin embargo, inicialmente, estos modelos se han utilizado mayoritariamente para predecir la cobertura del sistema, aportando una visión limitada del canal.

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de un modelo completo del canal radio basado en la aproximación de la Óptica Geométrica (GO) y la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD). Dicho modelo implica, debido a la complejidad de las señales de radio, aportar una descripción estadística del canal, tanto en banda estrecha como en banda ancha, que sea útil para el análisis del comportamiento de sistemas inalámbricos en entornos interiores. El contenido de la tesis se

estructura en siete capítulos y tres apéndices. El Capítulo 1 es un capítulo introductorio, en el cual se describen el contexto y objetivo de la tesis, así como la motivación que ha conducido a la realización de este trabajo.

En el Capítulo 2 se hace una breve revisión de los modelos de propagación que vienen utilizándose en los últimos años para caracterizar el canal radio de interiores, tanto modelos estadísticos como modelos deterministas o específicos del entorno. En ese contexto se ubica el programa CINDOOR, desarrollado por el Grupo de Investigación en que he realizado esta tesis. CINDOOR es un modelo de propagación específico del entorno basado en técnicas de trazado de rayos, que utiliza una implementación tridimensional de la Óptica Geométrica y la Teoría Uniforme de la Difracción. Se trata de una herramienta de ayuda al diseño, planificación e implementación de sistemas de comunicaciones inalámbricos en entornos cerrados: túneles, edificios y también microceldas y picoceldas urbanas. El programa ofrece una predicción de las magnitudes que forman la base del diseño de dichos sistemas: mapa de cobertura y estadística de los desvanecimientos de pequeña escala en el análisis de banda estrecha; y perfil potencia retardo y parámetros asociados (retardo medio de propagación, dispersión del retardo, función de autocorrelación en frecuencia y ancho de banda de coherencia) en el análisis de banda ancha. Además, ofrece la posibilidad de analizar la interacción interior/exterior.

En la actualidad, la optimización de las técnicas de trazado de rayos permite que un gran número de rayos (reflejados, difractados y múltiples combinaciones de estos efectos) sean tomados en consideración con una alta eficiencia computacional. Sin embargo, el valor de tales herramientas depende de la exactitud de las predicciones respecto a medidas realizadas en el entorno real de propagación. En consecuencia, parte del trabajo de esta tesis ha sido la realización de un amplio conjunto de medidas, con el fin de investigar la capacidad de la herramienta CINDOOR y, por extensión, de las técnicas de trazado de rayos, para caracterizar el canal radio de interiores. El total de medidas realizadas a este fin puede dividirse en dos campañas de medida: una de banda estrecha y otra de banda ancha, ambas desarrolladas en dos bandas de frecuencia diferentes: 1.8 y 2.4 GHz. Todas las medidas se han llevado a cabo en edificios del campus de la Universidad de Cantabria, la mayoría en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Éste es un edificio de nueve plantas (desde la -6 a la +2), de forma rectangular, con una cierta curvatura y con una geometría bastante compleja. Como sucede normalmente en este tipo de edificios, no todas las plantas tienen la misma funcionalidad y, en consecuencia, su estructura o distribución interna es, en general, diferente. Así, en este caso, los pisos inferiores del edificio están destinados, principalmente, a despachos, salas de reuniones o seminarios, laboratorios y talleres; en las plantas -1 y 0 se ubican las aulas; las plantas superiores (-1 a +2) disponen de estancias más amplias: vestíbulos, cafetería, biblioteca, salones de actos, y también algunos despachos. Dentro de este edificio, se han realizado medidas en escenarios bien diferenciados: zonas de despachos, pasillos, áreas abiertas, etc., con y sin línea de visión directa. También se han realizado medidas en la Facultad de Ciencias, un edificio más antiguo y con una distribución interna más simple y regular.

Para las simulaciones, efectuadas con CINDOOR, cada uno de los escenarios tuvo que modelarse geométrica y electromagnéticamente. En el modelado geométrico se incluyeron paredes internas y externas, puertas, ventanas, escaleras, columnas y el mobiliario más significativo, principalmente estanterías y armarios metálicos que se encontraban en las

proximidades de las antenas. El número de placas o facetas planas necesarias para modelar cada uno de los escenarios elegidos oscila entre 75 y 215. Dependiendo de su naturaleza, cada una de las placas del modelo se caracterizó electromagnéticamente mediante su constante dieléctrica relativa, conductividad eléctrica, coeficiente de rugosidad y pérdidas de transmisión, utilizando para ello valores encontrados en la literatura.

Caracterización estadística en banda estrecha del canal radio interior

En el Capítulo 3 se investiga la capacidad de estas técnicas basadas en el trazado de rayos para caracterizar en banda estrecha el canal radio de interiores, es decir, para estimar tanto el nivel medio de la señal recibida en entornos multicamino de interiores como el comportamiento estadístico de los desvanecimientos de pequeña escala. Para ello, se presentan numerosas comparaciones entre medidas y simulaciones, y se discuten desde el punto de vista de la predicción de la potencia local, del ajuste estadístico de la amplitud de la envolvente multicamino y de las estadísticas de segundo orden. Puesto que el objetivo de este análisis era investigar las variaciones espaciales del canal radio, todas las medidas se realizaron en fin de semana, cuando el edificio se encontraba vacío, con el objeto de que las variaciones temporales, originadas por el movimiento de personas y objetos en el entorno de propagación, no se superpusiesen a las espaciales.

El sistema de medida en banda estrecha, diseñado y montado dentro del mismo Grupo de Investigación, se trata, esencialmente, de un automatismo capaz de efectuar medidas de desvanecimientos espaciales y temporales a lo largo de un eje, es decir, sobre trayectorias lineales. Está completamente automatizado y gobernado por un computador que ejerce las funciones de controlador del sistema. El analizador vectorial de señal HP 89441A se utiliza como transmisor, pues lleva incorporada una fuente de RF, y como receptor. La señal de onda continua generada por la fuente interna del analizador se transmite entre un par de antenas omnidireccionales de banda ancha verticalmente polarizadas. La antena transmisora, situada a 2.10 metros sobre el suelo, se mantuvo fija para cada conjunto de medidas mientras que la antena receptora, de 1.5 metros de altura, estaba anclada sobre una unidad de desplazamiento lineal de 2 metros de longitud, sobre la que se desplazaba a una velocidad constante de 50.54 mm/s. Cuando la distancia que se deseaba cubrir con la medida era mayor de 2 metros, la unidad lineal se movía después de cada sección de 2 metros, hasta que se cubría el camino completo. El programa de control sincroniza en cada instante el desplazamiento de la antena receptora con la adquisición de muestras de la señal multicamino. Estas muestras eran transferidas vía bus HP-IB al ordenador para su posterior procesamiento.

En la Figura 1 se comparan, a modo de ejemplo, las señales medidas y simuladas a lo largo de dos trayectorias lineales diferentes. La señal de la Figura 1(a) se midió a lo largo de un pasillo estrecho en forma de L a la frecuencia de 1.8 GHz. Durante los primeros 14 metros de la trayectoria existía línea de visión directa entre las antenas. Después se doblaba una esquina, entrando así la antena receptora en una zona de sombra, lo cual se refleja, como puede apreciarse en la figura, en una disminución considerable (aproximadamente 15 dB) del nivel medio de potencia. La señal de la Figura 1(b) se midió en una zona más abierta, una especie de

vestíbulo, a la frecuencia de 2.5 GHz y entre ambas antenas existía un tabique de hormigón que obstruía la línea de visión directa. La precisión en la estimación de la potencia media o potencia local se cuantifica calculando, para cada trayectoria analizada, el error medio de la simulación respecto de la medida y la desviación estándar de dicho error. Para el total de trayectorias estudiadas, el error medio en la predicción de la potencia local ha resultado ser de 0.15 dB y la desviación estándar del error 1.48 dB.

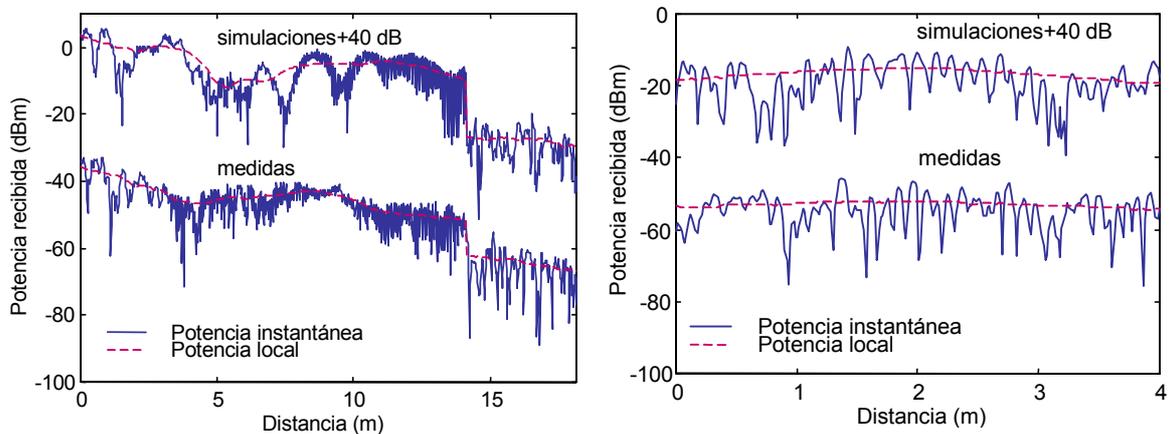


Figura 1. (a) Potencia recibida medida y simulada a lo largo de un pasillo, $f=1.8$ GHz; (b) Potencia recibida medida y simulada en un vestíbulo en situación OBS, $f= 2.5$ GHz.

Como ya se ha comentado con anterioridad, las técnicas de trazado de rayos se han usado ampliamente para predecir la cobertura de los sistemas de radio y diferentes autores han estudiado la precisión de las mismas, en lo que a nivel medio de potencia se refiere, tanto en exteriores como en interiores. Sin embargo, el conocimiento de la distribución de probabilidad de la envolvente de la señal recibida es también un aspecto muy importante en el diseño de un sistema de comunicaciones inalámbrico, puesto que proporciona información sobre el comportamiento de los diferentes esquemas de modulación cuando se transmiten por el canal. Por ejemplo, dependiendo de la distribución de probabilidad de los desvanecimientos de pequeña escala, se puede estimar la potencia que será necesario transmitir para una modulación dada de manera que en el receptor se tenga una determinada tasa binaria de error. Para analizar el comportamiento de estos desvanecimientos, tanto los datos procedentes de la medida de cada trayectoria como los resultantes de su simulación, se procesaron para encontrar la distribución de probabilidad de Rice que ajustaba en cada caso la curva de datos. Con el fin de analizar las variaciones de la estadística a lo largo de cada trayectoria, el parámetro K de la distribución de Rice se estimó tomando diferentes ventanas locales a lo largo de la trayectoria y obteniendo el valor de K en cada ventana. Para cada trayectoria, se calculó después el valor medio y la desviación estándar de K , así como los valores máximo y mínimo y se compararon los valores obtenidos para la trayectoria medida con los correspondientes a la trayectoria simulada, obteniéndose generalmente una buena concordancia entre medidas y simulaciones, tal y como puede comprobarse en el amplio conjunto de resultados presentados en la tesis.

Finalmente, el canal radio de banda estrecha queda completamente caracterizado cuando, además de la potencia local y la estadística de los desvanecimientos, se conocen los estadísticos de segundo orden, esto es, la tasa de cruces por nivel y la duración media de los

desvanecimientos. El conocimiento de estos estadísticos es muy útil en la selección de velocidades de transmisión, longitudes de palabra, esquemas de codificación y códigos de control de errores en sistemas digitales, así como en el diseño de esquemas de diversidad. Los estadísticos de segundo orden se han comparado de forma cualitativa, apreciándose una gran similitud entre las curvas obtenidas a partir de los datos medidos y las correspondientes a los datos simulados. En definitiva, los resultados obtenidos en el análisis de banda estrecha permiten concluir que con el modelo específico del entorno propuesto se puede estimar con suficiente exactitud no sólo el nivel medio de la señal multicamino recibida en entornos de interiores, sino también el comportamiento estadístico de sus variaciones en torno a la media.

En este capítulo se presenta, además, un nuevo método para obtener la estadística local de los desvanecimientos de pequeña escala basado en el espectro Doppler y se prueba que, a partir de la información de la señal recibida en un único punto, obtenida mediante trazado de rayos, es posible estimar la estadística de la señal en un área local de dicho punto. Esta posibilidad es de gran importancia práctica, ya que permite reducir substancialmente el tiempo de cálculo de la estadística local, dando lugar a la idea de que un modelo de canal específico del entorno podría ser factible. El método está basado en la suposición de que el campo en una región pequeña puede obtenerse mediante la suma de ondas planas, cuyas direcciones de propagación, amplitud y fase (debida a las reflexiones, difracciones, etc. en los obstáculos del camino) son las mismas que las de los rayos que llegan al punto central de dicha región; solamente el desfase debido a la longitud del camino cambiará de una a otra posición del receptor. A partir del espectro Doppler, se deriva una caracterización estadística completa de la señal, que incluye las estadísticas de primer y segundo orden y la función de autocorrelación temporal. El método que se propone permite reproducir la curva de desvanecimientos de la señal recibida, la cual puede intentar ajustarse por una distribución de probabilidad analítica (Rayleigh, Rice, Nakagami, Lognormal, etc.) o usarse junto con el método de Monte-Carlo para simular numéricamente el comportamiento del sistema sin necesidad de ajustarla a una distribución analítica. Además, existen situaciones en las que, aunque la amplitud de los desvanecimientos puede ajustarse razonablemente bien por una distribución de Rayleigh o de Rice, las estadísticas de segundo orden como la tasa de cruces por nivel y la duración media de los desvanecimientos no se modelan bien mediante el generalmente asumido modelo de scattering isotrópico o modelo de Clarke. También en esas situaciones el método basado en el espectro Doppler estima acertadamente las estadísticas de segundo orden.

Diversidad de polarización en el canal radio de interiores

En el Capítulo 4 se presentan los resultados de un conjunto de medidas realizadas dentro de la campaña de medida de banda estrecha con el objeto de cuantificar las ventajas de la utilización de diversidad de polarización en entornos de interiores en las bandas de 1.8 y 2.4 GHz. El esquema de medida es idéntico al descrito anteriormente pero ahora, para cada una de las frecuencias, se midió la señal recibida en dos situaciones diferentes: primero con la antena transmisora orientada verticalmente y después girándola un ángulo de 90° para colocarla en posición horizontal. Ambas señales se combinaron después numéricamente, utilizando para ello distintos combinadores: combinador de selección, de equiganancia y de relación máxima. A partir de los datos medidos, se analizaron los distintos parámetros que caracterizan un esquema

de diversidad, tales como el coeficiente de correlación cruzada, la discriminación de polarización cruzada y la ganancia de diversidad, y se estudió también la mejora producida tras la combinación en la estadística de amplitud de los desvanecimientos, en las estadísticas de segundo orden y en la tasa de error binaria o BER. Los resultados obtenidos permiten sacar una serie de conclusiones que pueden resultar importantes a la hora de diseñar y planificar sistemas de comunicaciones inalámbricos en este tipo de escenarios. Además, las medidas sirven para efectuar una nueva evaluación del modelo específico del entorno que se propone.

En primer lugar, mediante el cómputo del coeficiente de correlación cruzada, se ha observado el alto grado de independencia entre las señales recibidas para polarizaciones ortogonales (0° y 90° respecto a la vertical) de la antena transmisora. El valor de este coeficiente es inferior a 0.5 en el 100% de las situaciones medidas.

En cuanto a la discriminación de polarización cruzada, se obtienen valores comprendidos entre 7 y 14 dB, aproximadamente, para los trayectos con línea de visión directa; algo inferiores (6 – 9 dB) para situaciones en que una pared obstruye la línea de visión entre el transmisor y el receptor; e inferiores a 5 dB cuando la obstrucción es ya importante. En definitiva, puede decirse que la onda se depolariza más cuando aumenta el grado de obstrucción, pudiendo suceder incluso que la componente contrapolar presente un nivel superior al de la componente copolar.

Por lo que se refiere al ajuste estadístico de la envolvente recibida por una distribución de Rice, se ha observado que, usando diversidad de polarización, se consigue una reducción substancial en la profundidad de los desvanecimientos. Para cuantificar este efecto, se han estimado los valores del parámetro K para las señales presentes en las entradas y en la salida de los distintos combinadores. Como consecuencia del incremento del parámetro K tras la combinación, se modifican también la tasa de cruces por nivel y la duración media de los desvanecimientos. Para los niveles más bajos del umbral, la tasa de cruces se hace nula y, hasta el umbral de -10 dB, se mantiene un orden de magnitud por debajo de la correspondiente a las señales individuales. Para esos niveles de señal, también se reduce, en aproximadamente el mismo factor, la duración media de los desvanecimientos.

Finalmente, la mejora introducida por la diversidad de polarización se puede expresar también en función de la disminución de la BER o tasa de bits erróneos recibidos. Se ha comprobado que, como consecuencia del aumento del factor K tras la combinación, la relación E_b/N_0 puede disminuir, para un valor dado de BER, en un factor de hasta 8 dB. Esto significa que, si se fija una probabilidad de error, el nivel de potencia a transmitir puede reducirse en ese factor. De esta forma, se reducen también las interferencias que afectan al sistema, con lo que es posible aumentar la reutilización de frecuencias, lo cual, a su vez, permite multiplicar la capacidad de recursos de frecuencias del sistema.

En definitiva, los resultados indican que la implementación de un esquema de diversidad de polarización es una opción eficiente a la hora de combatir el multicamino en entornos de interiores, donde, por otra parte, la utilización de un esquema de diversidad espacial puede plantear, en ocasiones, ciertas dificultades, a causa del espacio físico necesario para colocar las dos antenas lo suficientemente separadas.

Variaciones temporales del canal radio en interiores

En los capítulos 3 y 4 se caracteriza el canal de banda estrecha en interiores desde el punto de vista de las variaciones espaciales, es decir, las variaciones de la envolvente de la señal recibida en función del desplazamiento del terminal móvil, en este caso la antena receptora. Pero aún cuando ambas antenas permanezcan fijas, el movimiento de personas y equipos que se produce normalmente en este tipo de escenarios, da lugar a fenómenos de desvanecimiento multicamino, a los que se denomina desvanecimientos o variaciones temporales. Ambas variaciones, espaciales y temporales, están generalmente presentes en las comunicaciones móviles o inalámbricas en interiores, aunque puede haber aplicaciones, como la transmisión fija inalámbrica de datos, en que sólo las variaciones temporales sean importantes. En el Capítulo 5 se presentan los resultados de un conjunto de medidas de desvanecimiento temporal realizadas en tres escenarios de interiores. En cada uno de los entornos se han medido las variaciones temporales del canal durante una jornada normal de trabajo, de manera que las medidas reflejasen la actividad normal del entorno. Esto permite establecer entornos canónicos, definidos no sólo por su naturaleza geométrica sino también por el tipo de actividad que normalmente se desarrolla en ellos. Para cada uno de los escenarios se han estimado un conjunto de parámetros que caracterizan estadísticamente la envolvente de la señal recibida y se presenta la comparación de los resultados en los distintos escenarios de medida. Las magnitudes y parámetros estadísticos que caracterizan cada uno de estos escenarios canónicos pueden extrapolarse a otros escenarios similares.

El sistema de medida descrito anteriormente ofrece la posibilidad de realizar medidas de desvanecimiento temporal, para lo cual el programa incluye un sofisticado sistema de temporización de las medidas, el cual permite dotar de plena autonomía al propio sistema de medida. Para realizar una medida de desvanecimiento temporal, al margen de seleccionar y configurar los parámetros correspondientes a una medida convencional de desvanecimiento espacial, se deben seleccionar los parámetros temporales de la medida: duración de la medida e intervalo temporal entre dos medidas consecutivas. En las medidas realizadas, las antenas permanecían fijas en las posiciones elegidas para cada escenario y en el punto donde se encontraba emplazada la antena receptora se tomaban muestras de la señal recibida durante 60 segundos. Al finalizar dicho período, las muestras eran transferidas vía bus HP-IB al ordenador, donde se almacenaban en un fichero. A continuación se medía otro registro de 60 segundos y así sucesivamente. Las medidas en cada uno de los escenarios se realizaron durante largos períodos de tiempo (aproximadamente 5 horas) de forma que la actividad recogida fuese representativa de la actividad típica en el entorno.

A la hora de seleccionar los escenarios, se buscó, principalmente, que el grado de actividad desarrollada en cada uno de ellos fuese diferente, con el fin de poder asociar los resultados obtenidos a la densidad de movimiento existente. Así, en el Escenario 1, un entorno dividido en habitaciones con actividad moderada, se ha observado que en la señal recibida aparecen ráfagas cortas de desvanecimientos temporales profundos, con un rango dinámico de 16 dB en promedio, aunque existen ráfagas con rango dinámico mayor, de hasta 30 dB. Estas ráfagas se corresponden con el paso de personas en las proximidades de las antenas, el cual se produce de manera frecuente aunque no continua. La probabilidad de que la señal recibida se encuentre en una de estas ráfagas es del 30%. En el Escenario 2, los desvanecimientos tienen

lugar en ráfagas mucho menos profundas y de menor duración, debido a que, aunque el entorno es físicamente similar al primero, la actividad que tiene lugar en él es mucho menor. El rango dinámico de los desvanecimientos en este caso es de unos 7 dB, mientras que la probabilidad de que la señal se encuentre en una ráfaga es aproximadamente del 8%. El Escenario 3, por su parte, presenta una actividad moderada que se convierte en alta en determinados momentos, dando lugar a ráfagas más frecuentes y de mayor duración. La geometría del entorno y la ubicación de las antenas hace que los desvanecimientos, sin embargo, no sean tan profundos como los del Escenario 1: 12 dB en promedio. Durante el 46% del tiempo la señal recibida pertenece a una ráfaga de desvanecimientos.

Los valores de K (distribución de Rice) y m (distribución de Nakagami) hallados para cada ráfaga, y posteriormente su promediado para cada escenario, siguen una distribución acorde con lo comentado en el párrafo anterior. De esta forma, los valores más pequeños (asociados a desvanecimientos más profundos), fueron obtenidos en el Escenario 1, mientras que es el Escenario 2 el que presenta los valores más altos (desvanecimientos menos profundos). En el peor de los escenarios (Escenario 1) el valor promedio de K es 12.18, lo cual implica que la probabilidad de que la potencia recibida esté 3 dB por debajo del nivel medio de potencia es del 6.7%, y la probabilidad de que se encuentre 6 dB por debajo es tan solo del 0.6%. Sin embargo, hay que tener en cuenta que aunque los valores promedio de K en cada uno de los escenarios son relativamente altos, su desviación estándar también es grande, con lo cual puede haber situaciones en que estas probabilidades sean bastante más altas.

Las estadísticas de segundo orden, tasa de cruces por nivel y duración media de los desvanecimientos, también han sido analizadas para cada escenario, observándose un comportamiento consistente con los resultados comentados en los párrafos anteriores. Los valores de duración media de los desvanecimientos se han comparado con la duración del intervalo temporal (TS ó Time Slot) de la trama GSM, que es de 0.577 mseg. En los Escenarios 1 y 3, la duración media de los desvanecimientos por debajo de -20 dB, 3.03 y 2.44 milisegundos respectivamente, es superior al TS, lo que ha de suponer un incremento importante en la tasa de error de bits (BER). De esta forma, resulta preciso utilizar alguna técnica de diversidad (en espacio, polarización o frecuencia) en recepción o ecualización en los receptores, que sean capaces de compensar de alguna forma estos desvanecimientos. Sin embargo, en el Escenario 2 los desvanecimientos más profundos no llegan en ningún caso a los 10 dB, por lo que, en principio, podría no ser necesaria la utilización de estas técnicas de compensación.

El movimiento que se produce en los entornos de interior es un movimiento lento, asociado generalmente a personas que se desplazan a paso normal, de ahí que el ensanchamiento Doppler que se origina sea pequeño: 2.06 Hz (en promedio, cuando la amplitud del espectro Doppler cae -20 dB) para el Escenario 1, donde pudo apreciarse que los movimientos eran más rápidos, 1.07 Hz para el Escenario 2 y 0.82 Hz para el Escenario 3.

Caracterización estadística en banda ancha del canal radio interior

En el Capítulo 6, a partir de la campaña de medida de banda ancha mencionada al inicio de este documento, y mediante la utilización del simulador CINDOOR, se investiga la capacidad de las técnicas de trazado de rayos basadas en una implementación 3D de la Óptica Geométrica y la Teoría Uniforme de la Difracción, para caracterizar en banda ancha el canal radio de interiores. La validación de la herramienta de predicción se hace sobre la base de una comparación cualitativa o visual de los perfiles potencia retardo medidos y simulados, así como de las correspondientes funciones de autocorrelación en frecuencia, y de una comparación cuantitativa de los parámetros habitualmente utilizados en la caracterización del canal radio, estimados a partir de las mencionadas funciones: el retardo medio de propagación, la dispersión del retardo y el ancho de banda de coherencia para los factores de correlación 0.9 y 0.5. Además de la comparación puntual en cada una de las posiciones medidas/simuladas, se efectúa una comparación estadística en función del escenario, de la banda de frecuencias analizada y de las condiciones de propagación.

Las medidas de la respuesta al impulso del canal se realizaron en el dominio de la frecuencia, utilizando el analizador vectorial de redes HP 8714C para medir la respuesta en frecuencia del canal de propagación entre las antenas transmisora y receptora. El analizador HP 8714C cubre un rango de frecuencias de 300 KHz a 3 GHz e incorpora una fuente sintetizada y un test set de transmisión/reflexión. Antes de empezar las medidas, el sistema era calibrado en la banda de frecuencias de operación usando el kit de calibración HP 85032, con el fin de compensar la respuesta en frecuencia de los cables, conectores y del mismo equipo de medida. Tras la calibración, la respuesta en frecuencia medida corresponde a la del canal radio definido como el constituido por el propio canal de propagación más las antenas. De nuevo, las medidas se realizaron en días no lectivos, de forma que el canal fuese lo más estacionario posible.

Las respuestas en frecuencia medidas, coherentes (módulo / fase), constaban de 801 puntos equidistantes en una banda de frecuencias de 500 MHz. Por el hecho de estar limitando la señal en banda, estamos efectuando un enventanado de la misma con una ventana rectangular, de amplitud unidad dentro del ancho de banda de la medida y cero fuera del mismo. Pero una ventana rectangular, aún cuando tiene un lóbulo principal estrecho (lo cual significa buena resolución en el dominio dual), presenta unos lóbulos secundarios de amplitud relativamente alta respecto al lóbulo principal, lo cual implica un problema de *leakage* acusado en el dominio transformado. Por este motivo, normalmente se utilizan otras ventanas (Hanning, Hamming, Blackman-Harris, etc.), con el fin de conseguir un mejor compromiso entre la anchura del lóbulo principal y el nivel de los lóbulos secundarios. En definitiva, se trata de reducir el problema del *leakage* a costa de que la resolución de la respuesta al impulso estimada sea un poco peor.

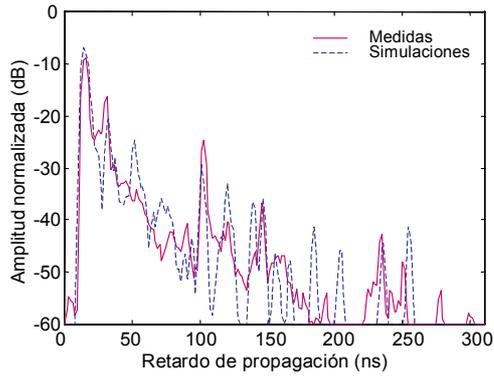
Inicialmente, se utilizaron diferentes ventanas (Rectangular, Hanning, Hamming, Blackman y Blackman-Harris mínima de tres términos), con el objeto de comparar los resultados. Se observó que, excepto cuando se utilizaba la ventana rectangular, los resultados eran similares, siendo, en general, la dispersión un poco más severa cuando se utilizan ventanas

con un lóbulo principal más ancho, como las de Blackman o Blackman-Harris. Finalmente, se optó por la ventana de Hamming por considerar que presentaba un buen compromiso entre la anchura del lóbulo principal (1.30 bins a -3 dB y 1.81 bins a -6 dB) y la amplitud del lóbulo secundario (-43 dB). La resolución de la respuesta al impulso así obtenida es el inverso del ancho de banda medido (2 ns) multiplicado por el ancho adicional de la ventana utilizada. En consecuencia, se consigue una resolución menor de 4 ns para la respuesta al impulso del canal.

Para cada conjunto de medidas, la antena transmisora se mantenía fija en una determinada posición, mientras que para la antena receptora se consideraron distintas posiciones en cada escenario de medida. Para cada emplazamiento de la antena receptora, se midieron nueve funciones de transferencia, una en el punto central de un cuadrado de lado 30 centímetros y las otras ocho a lo largo de su perímetro. Cada una de estas funciones de transferencia fue procesada de forma independiente y después se obtuvo un perfil potencia retardo promedio representativo del área local bajo estudio. La razón de ser de este promedio radica principalmente en la diferencia, a veces notable, que puede producirse entre los perfiles potencia retardo medidos en dos situaciones separadas tan solo una fracción de longitud de onda, como consecuencia de la variabilidad de los caminos de propagación y, por tanto, del desfase asociado a cada uno de ellos. De esta forma, un promedio del canal en área local parece más apropiado. Además, si se trata de comparar los resultados de medidas y simulaciones, es prácticamente imposible reproducir de forma exacta tanto la geometría del entorno como la ubicación de las antenas y, en consecuencia, es también muy difícil que concuerden los perfiles instantáneos medidos y simulados, así como el retardo medio de propagación o la dispersión del retardo, para una medida individual. Para poder comparar los resultados simulados con los obtenidos a partir de las medidas, la respuesta al impulso simulada se convolucionó con un pulso gaussiano de amplitud 3 dB igual a la amplitud 3 dB del lóbulo principal de la ventana utilizada para filtrar la función de transferencia medida, es decir, 2.6 ns.

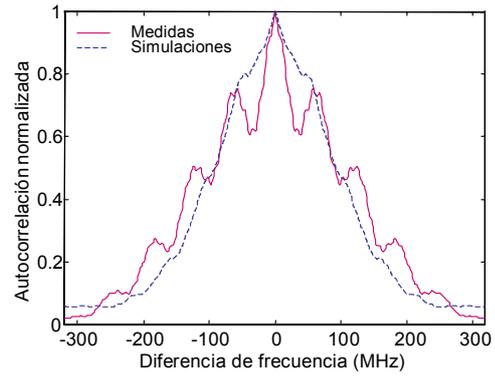
El estudio se llevó a cabo en dos bandas de frecuencia diferentes, centradas en 1.8 GHz (1550 – 2050 MHz) y 2.4 GHz (2150 – 2650 MHz) respectivamente. La Figura 2(a) compara los perfiles potencia retardo promedio medido y simulado en una situación con línea de visión directa, mientras que los perfiles de la Figura 3(a) corresponden a una situación con visión obstruida. Por su parte, las Figuras 2(b) y 3(b) comparan las correspondientes funciones de autocorrelación en frecuencia medidas y simuladas.

A la hora de procesar los perfiles potencia retardo medidos, es importante eliminar las contribuciones de ruido, que son especialmente importantes en la porción final del perfil de potencia, donde los pulsos de señal son tan débiles que se confunden con el propio ruido. Esto se ha hecho eligiendo como nivel de threshold el mayor de los dos niveles siguientes: 1) integrando el ruido de fondo del analizador y la potencia de la función de transferencia en la banda de frecuencias medida, se calcula la relación señal a ruido para cada una de las medidas, y este valor se utiliza para fijar el nivel de threshold respecto al pico del perfil potencia retardo; 2) el nivel del mayor lóbulo secundario fija el nivel de threshold, respecto a la mayor amplitud del perfil potencia retardo. Las situaciones en que la relación señal/ruido medida era menor de 20 dB se consideraron demasiado ruidosas y no fueron incluidas en los resultados que aquí se presentan. Puesto que la aportación de ruido en las simulaciones es nula, no se ha considerado nivel de threshold.



	medida	simulación
$\bar{\tau}$ (ns)	9.22	9.72
τ_{rms} (ns)	14.95	12.27

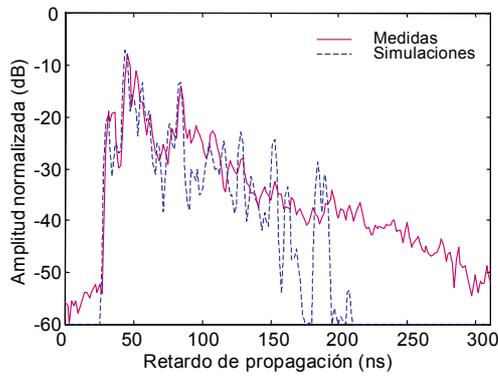
(a)



	medida	simulación
Bcoh ₉₀ (MHz)	10.87	14.35
Bcoh ₅₀ (MHz)	91.32	92.34

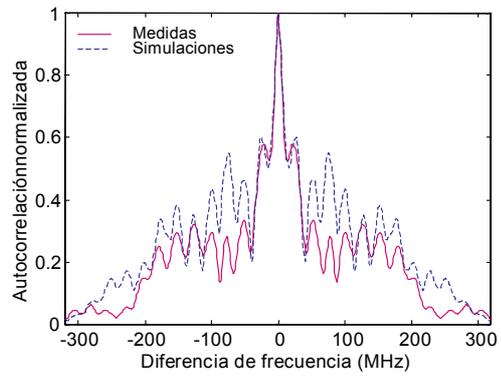
(b)

Figura 2. BW: 1550 - 2050 MHz, situación LOS, (a) perfiles potencia retardo promedio medido y simulado, (b) funciones de autocorrelación en frecuencia de la medida y de la simulación.



	medida	Simulación
$\bar{\tau}$ (ns)	29.06	33.14
τ_{rms} (ns)	22.43	24.33

(a)



	medida	simulación
Bcoh ₉₀ (MHz)	3.15	3.19
Bcoh ₅₀ (MHz)	29.35	30.73

(b)

Figura 3. BW: 1550 - 2050 MHz, situación OBS, (a) perfiles potencia retardo promedio medido y simulado, (b) funciones de autocorrelación en frecuencia de la medida y de la simulación.

La comparación cualitativa de los perfiles potencia retardo medidos y simulados (se han efectuado un total de 378 medidas) ha permitido comprobar que, en general, los tiempos de llegada y las amplitudes de las principales componentes multicamino pueden predecirse con suficiente precisión. Normalmente, los pulsos o ecos iniciales se predicen con exactitud, pues están asociados bien al rayo directo (en caso de que exista), bien a las reflexiones en el suelo, techo, paredes laterales, etc., es decir, obstáculos importantes que son obvios y sencillos de modelar. Sin embargo, los ecos con un retardo de propagación grande son más difíciles de predecir: en parte, porque pueden ser debidos a interacciones con obstáculos que, por estar alejados del entorno de las antenas, no se han incluido en el modelo y, en parte, porque estos rayos son ya el resultado de efectos múltiples y, por tanto, se va acumulando el error cometido en la estimación de los parámetros electromagnéticos de los materiales del modelo.

La caracterización en banda ancha es muy dependiente del grado de detalle que se asuma en la descripción del entorno de propagación y de la exacta localización de las antenas. Además, los parámetros que caracterizan el canal en banda ancha son muy sensibles y pequeñas variaciones en el perfil de potencia pueden suponer un cambio significativo de los valores de estos parámetros. En consecuencia, teniendo en cuenta la dificultad que supone conseguir gran exactitud en las respuestas impulsivas simuladas, puede considerarse que las predicciones de CINDOOR son buenas en la mayoría de las situaciones analizadas. Por otra parte, la comparación de las curvas de probabilidad de los parámetros medidos/simulados en cada escenario, bajo condiciones LOS y NLOS y para cada una de las bandas de frecuencia, ha sido satisfactoria.

Conclusiones

El valor principal de la tesis reside en la gran cantidad de datos experimentales aportados, que no sólo prueban la eficiencia de los algoritmos de trazado de rayos como herramientas de diseño y planificación de los nuevos sistemas inalámbricos, sino que también contribuyen a la caracterización del canal radio interior en las bandas de frecuencia analizadas. Se han realizado importantes contribuciones al modelado estadístico del canal radio a partir de la información obtenida mediante trazado de rayos (GO/UTD), siendo una de las aportaciones más interesantes la demostración de que tanto la estadística local de primer y segundo orden del canal radio interior como los parámetros de banda ancha pueden estimarse con muy buena precisión. Se ha investigado la utilización de diversidad de polarización en este tipo de escenarios y, respecto a las variaciones temporales del canal, los resultados obtenidos podrían ser el punto de partida de un modelo de propagación más general en que se superpusiesen las variaciones espaciales y temporales.

Un resumen más amplio de las conclusiones extraídas de la realización de este trabajo, muchas de las cuales han sido ya comentadas a lo largo de este documento, se expone en el Capítulo 7. Asimismo, se indican posibles líneas futuras de actuación.

Publicaciones

La realización de esta tesis ha dado lugar a las siguientes publicaciones en revistas y ponencias en congresos, tanto nacionales como internacionales.

Publicaciones en revistas internacionales

R.P. Torres, L. Valle, M. Domingo, S. Loredo, M.C. Díez, "CINDOOR: An Engineering Tool for Planning and Design of Wireless Systems in Enclosed Spaces", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 41, No. 4, Págs. 11-22, Agosto 1999.

S. Loredo, R.P. Torres, M. Domingo, L. Valle, J.R. Pérez, "Measurements and Predictions of the Local Mean Power and Small-Scale Fading Statistics in Indoor Wireless Environments", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 24, No. 5, Págs. 329-331, Marzo 2000.

R.P. Torres, S. Loredo, L. Valle, M. Domingo, "An Accurate and Efficient Method based on Ray-Tracing for the Prediction of Local Flat-Fading Statistics in Picocell Radio Channels", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 19, No. 2, Págs. 170-178, Febrero 2001.

R.P. Torres, L. Valle, M. Domingo, S. Loredo, "On the Suitability of GO/UTD Modelling of Microwave Propagation in Indoor Environments", *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol. 14, No. 3, Págs. 257-281, Junio 2001.

S. Loredo, L. Valle, R.P. Torres, "Accuracy Analysis of GO/UTD Radio Channel Modeling in Indoor Scenarios", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 43, No. 5, Octubre 2001.

S. Loredo, R.P. Torres, "An Experimental Analysis of the Advantages of Polarization Diversity in Indoor Scenarios at 1.8 and 2.5 GHz", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 31, No. 5, Págs. 355-361, Diciembre 2001.

S. Loredo, R.P. Torres, "Temporal Variations in Indoor Radio Channels at 1.8 GHz", submitted to *IEEE Transactions on Wireless Communications*.

Comunicaciones en congresos internacionales

R.P. Torres, S. Loredo, M. Domingo, L. Valle, "A New Method to Estimate Efficiently the Fast Fading Statistics from Ray-Tracing", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Págs. 412-415, Orlando (Florida, USA), Julio 1999.

R.P. Torres, L. Valle, M. Domingo, S. Loredo, "An Efficient Ray-Tracing Method for Enclosed Spaces based on Image and BSP Algorithm", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Págs. 416-419, Orlando (Florida, USA), Julio 1999.

R.P. Torres, S. Loredo, M. Domingo, L. Valle, "An Accurate and Efficient Method to Estimate the Local Fading Statistics from Ray-Tracing", *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 1999-Fall*, Págs. 92-96, Amsterdam (Holanda), Septiembre 1999.

R.P. Torres, L. Valle, M. Domingo, S. Loredo, "An Efficient Ray-Tracing Method for Radiopropagation Based on the Modified BSP Algorithm", *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 1999-Fall*, Págs. 1967-1971, Amsterdam (Holanda), Septiembre 1999.

S. Loredo, R.P. Torres, M. Domingo, L. Valle, "Measurements and Predictions of the Local Mean Power and Fast Fading Statistics in Indoor Wireless Environments", *7th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology*, Págs. 647-649, Málaga (España), Diciembre 1999.

S. Loredo, L. Valle, R.P. Torres, "Achievable Accuracy of Site-Specific Channel Modelling for Indoor Wireless Systems Simulations", *IEEE Benelux Chapter on Vehicular Technology and Communications. Symposium on Communications and Vehicular Technology (SCVT-2000)*, Págs. 1-4, Leuven (Bélgica), Octubre 2000.

S. Loredo, L. Valle, I. Páez, R.P. Torres, "Accuracy Analysis of GO/UTD Radio Channel Modelling in Indoor Scenarios Including Cross-polarisation", *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2001-Spring*, Pág. 280, P511.pdf, Rhodes (Grecia), Mayo 2001.

R.P. Torres, B. Manteca, S. Loredo, L. Valle, "Site-specific BER Simulation for Indoor Wireless Communications", *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2001-Spring*, Pág. 281, P512.pdf, Rhodes (Grecia), Mayo 2001.

R.P. Torres, S. Loredo, M. Domingo, L. Valle, "An Accurate and Efficient Method to Estimate the Local Fading Statistics from Ray-Tracing", *1st COST 273 meeting*, TD(01)014, Brussels (Bélgica), Mayo 2001.

Comunicaciones en congresos nacionales

R.P. Torres, S. Loredo, L. Valle, M. Domingo, "Caracterización Estadística de la Señal Radioeléctrica en Entornos Cerrados Mediante Modelos de Trazado de Rayos", *XII Symposium Nacional de la URSI*, Págs. 127-130, Bilbao, Septiembre 1997.

S. Loredo, J.R. Pérez, M. Domingo, L. Valle, R.P. Torres, "Medidas y Simulaciones de la Potencia Local y la Estadística de los Desvanecimientos Rápidos en Entornos "Wireless" de Interiores", *XIV Symposium Nacional de la URSI*, Págs. 500-501, Santiago de Compostela, Septiembre 1999.

B. Manteca, S. Loredo, R.P. Torres, "Estimación de la BER en Comunicaciones Digitales sobre Canales de Interiores No Analíticos", *XIV Symposium Nacional de la URSI*, Págs. 502-503, Santiago de Compostela, Septiembre 1999.

R.P. Torres, L. Valle, M. Domingo, S. Loredo, "CINDOOR: Una Herramienta Efectiva para el Diseño y Planificación de Sistemas Vía Radio en Interiores y Microceldas Urbanas", *IX JORNADAS de I+D en Telecomunicaciones*, Barcelona – Madrid, Noviembre 1999.

S. Loredo, J.R. Pérez, L. Valle, R.P. Torres, "Modelo de Canal Específico del Entorno para la Simulación de Sistemas Inalámbricos en Entornos de Interiores: Análisis Cuantitativo del Error", *XV Symposium Nacional de la URSI*, Págs. 19-20, Zaragoza, Septiembre 2000.

Proyectos de Investigación

El trabajo de investigación llevado a cabo durante la realización de esta tesis, se enmarca dentro de los siguientes proyectos de investigación, en los que la autora ha participado o participa:

- Título del proyecto: *Equipos terminales y herramientas de radiopropagación para servicios de banda ancha vía radio.*

Entidad financiadora: CICYT, TIC97-1129-C04-01.
Duración: 1997-1999.
Investigador principal: Eduardo Artal.

- Título del contrato / proyecto: *CINDOOR: Computer Tool for Planning and Design of Wireless Systems in Enclosed Spaces.*

Tipo de contrato: Proyecto (Artículo 11).
Entidad financiadora: Empresas varias.
Duración: 1997-1999.
Investigador principal: Rafael P. Torres.

- Título del proyecto: *Subsistemas de Radar y Radiocomunicaciones en Servicios de Tráfico Marítimo (VTS).*

Entidad financiadora: CICYT/ FEDER IFD97-0830 (TIC).
Entidades participantes: ENYCA S.A.
Duración: 1999-2001.
Investigador principal: Rafael P. Torres.

- Título del proyecto: *Desarrollo y Prototipado de un Sistema de Transmisión de Datos sin Cables para Optimización de Vehículos Espaciales.*

Entidad financiadora: CICYT ESP99-0553.
Duración: 1999-2001.
Investigador principal: Rafael P. Torres.

- Título del contrato / proyecto: *Temporal Variations in Outdoor Radio Channel at 3.4-3.6 GHz.*

Tipo de proyecto: Investigación contratada.
Entidad financiadora: IMEC VZW (Leuven, Belgium).
Duración: Febrero-Marzo 2002.
Investigador principal: Rafael P. Torres.

Referencias en Publicaciones

Se incluyen también publicaciones internacionales de otros autores en las que se ha hecho referencia a alguna de las publicaciones anteriores de la autora:

André Fourie, Derek Nitch, “SuperNEC: Antenna and indoor-propagation simulation program”, *IEEE Antenas and Propagation Magazine*, Vol. 42, Págs. 31-48, Junio 2000.

J.L. García, M. Lobeira, “Deliverable III.1. Channel Characterization and Model”, *IST-1999-10025, WIND-FLEX*, Diciembre 2000.

M. Lobeira, A. García Armada, R.P. Torres, J.L. García, “Channel Modelling and Characterisation at 17 GHz for Indoor Broadband WLAN”, aceptado para su publicación en *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*.