

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES



TESIS DOCTORAL

**Caracterización Experimental y Modelado de Canal
MIMO para aplicaciones WLAN y WMAN**

Autor: Oscar Fernández Fernández

Directores: Marta Domingo Gracia y Rafael P. Torres Jiménez

**Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria para la
obtención del título de Doctor por la Universidad de Cantabria**

Santander, Mayo de 2007

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Ha pasado más de un siglo desde que se realizase la primera transmisión vía radio, y a lo largo de este tiempo las comunicaciones inalámbricas han sufrido una notable evolución. Todas las mejoras introducidas tienen un denominador común, el afán de transmitir mayor cantidad de información, lo más lejos, en el menor tiempo y/o con la mejor calidad posible¹.

La era de la información y las comunicaciones multimedia actual demanda altas velocidades de transmisión y mayor calidad de las comunicaciones. En este sentido, se han realizado grandes avances en el campo de la modulación, la codificación y el procesado de señal para maximizar la eficiencia espectral. Sin embargo, esta eficiencia espectral está acotada superiormente por la capacidad de Shannon (eficiencia espectral máxima). Este factor unido al hecho de que el espectro radio es un recurso limitado con anchos de banda asignados finitos y reducidos supone un límite a la velocidad máxima de transmisión, obtenida como el producto del ancho de banda por la capacidad de Shannon. Aparte de esta limitación, el canal radio es un medio hostil que degrada la calidad de las comunicaciones. Para mantener la calidad de la comunicación es necesario bien reducir la tasa de transmisión o aplicar técnicas de codificación y corrección de errores que reducen la velocidad neta de transmisión.

¹ Y desde el punto de vista económico, con el menor coste posible.

El uso de múltiples antenas en transmisión y recepción se presenta como una de las tecnologías más prometedoras para obtener mejoras notables en la eficiencia espectral y poder satisfacer la demanda de alta velocidad de transmisión de datos sin necesidad de aumentar el ancho de banda disponible ni la potencia transmitida. Winters [1], Foschini [2] y Telatar [3] propusieron las bases de los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Estos sistemas explotan no solo la diversidad espacial en recepción mediante los sistemas clásicos, sino también la diversidad completa en transmisión. Este aspecto representa el avance más importante con respecto a los esquemas previos de diversidad en transmisión [4], [5]. A través de la codificación espacio-temporal o mediante el multiplexado de flujos de información por diferentes antenas es posible obtener diversidad espacial en transmisión completa que mejora la calidad del enlace o crear diferentes canales paralelos que aumentan la eficiencia espectral global.

Telatar en [6] cuantifica el potencial de los sistemas MIMO en términos de eficiencia espectral, presentando expresiones de capacidad en canales gaussianos equivalentes a las presentadas por Shannon para canales SISO. Estas expresiones muestran la ganancia tan notable que puede obtenerse respecto a los sistemas tradicionales de una antena transmisora y una receptora.

Aunque los sistemas MIMO aportan innegables ventajas, también añaden una mayor complejidad en las etapas transmisoras y receptoras así como una gran dependencia de las características del canal radio. La riqueza de scattering del escenario es crucial para que los subcanales generados entre cada antena transmisora y receptora estén decorrelados. Al igual que en los sistemas de diversidad en recepción tradicionales, la correlación espacial entre canales produce una disminución de la ganancia introducida por el uso de múltiples antenas. Dada esta dependencia con el canal radio, resulta necesario estudiar el comportamiento del canal MIMO en diferentes escenarios y analizar parámetros como la correlación espacial y la capacidad del canal que permiten caracterizar dicho comportamiento así como evaluar su rendimiento.

Esta tesis se inicia y desarrolla con el objeto de contribuir al estudio de los canales MIMO y aportar un mejor entendimiento del comportamiento del canal radio MIMO en diferentes escenarios y en diferentes condiciones.

1.2 Situación actual de los sistemas MIMO

Desde las primeras publicaciones aparecidas a mediados de los 90 [1], [2], [3], la actividad investigadora en el campo de los sistemas MIMO ha crecido significativamente.

El potencial de los sistemas MIMO es muy significativo y supone un gran avance en el campo de las radiocomunicaciones. Tal es su importancia que los sistemas MIMO están presentes en múltiples estándares actuales y en desarrollo.

La combinación MIMO-OFDM representa una mejora significativa del canal MIMO que aprovecha la selectividad del canal para introducir en canales de banda ancha ganancia por diversidad frecuencial y mejorar así las prestaciones del sistema. OFDM es una técnica simple de aplicar y ampliamente utilizada gracias a que ofrece gran robustez frente a la propagación multicamino.

A continuación se presentan varios de los estándares en desarrollo más importantes que incorporan a los sistemas MIMO como opcionales o como base del estándar.

MIMO en el estándar IEEE 802.16 – Wimax

Wimax, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, es una tecnología inalámbrica que define el interface inalámbrico de sistemas fijos de acceso inalámbrico de banda ancha (BFWA) que permite velocidades de transmisión de datos con una eficiencia espectral media de 3 bps/Hz. Wimax está basado en el estándar IEEE 802.16, aunque también abarca el estándar HiperMan de la ETSI como un subconjunto de IEEE 802.16. Este estándar IEEE 802.16 se divide en dos versiones, 802.16-2004 (aprobado Octubre de 2004) para comunicaciones fijas o portátiles y 802.16e-2005 (aprobado en diciembre de 2005) para comunicaciones móviles.

Dadas las características tan generales del estándar, diferentes fabricantes pueden desarrollar equipos acordes con el estándar pero no compatibles entre ellos. El Wimax Forum, conformado por un amplio conjunto de industrias, define diferentes perfiles de funcionamiento que reúnen un conjunto detallado de características del estándar. El cumplimiento de estos perfiles permitirá que los equipos sean compatibles con el estándar pero además garantizan la interoperabilidad con equipos de diferentes fabricantes.

Basados en el estándar IEEE 802.16-2004, se han definido 4 perfiles en la banda de 3.5 GHz y 1 en la banda de 5.8 GHz con diferentes anchos de banda de canal y duplex en el dominio del tiempo (TDD) o de la frecuencia (FDD). Los perfiles basados en el estándar IEEE 802.16e presentan todos ellos duplex en el dominio del tiempo y disponen de distintos anchos de canal en la banda de 2.5 GHz y 3.5 GHz.

Los perfiles de Wimax móvil contemplan el uso múltiples antenas para aumentar la eficiencia espectral o la calidad del enlace. El array de múltiples antenas puede utilizarse

como antenas adaptativas (AAS) técnica también denominada como beamforming, codificación Espacio-Temporal (STC) de Alamouti o multiplexado espacial. El estándar IEEE 802.16 asocia el término MIMO únicamente al multiplexado espacial, mientras que en esta tesis el concepto MIMO abarca tanto multiplexado espacial como codificación espacio temporal. Los perfiles de Wimax móvil permiten conmutar entre las diferentes técnicas para aprovechar al máximo el potencial aportado por cada esquema. Así en condiciones favorables de funcionamiento se busca maximizar la tasa de transmisión de datos utilizando multiplexación espacial, mientras que si la calidad del canal baja se opta por usar técnicas de diversidad como STC para garantizar la calidad y el alcance.

Para el enlace descendente, los perfiles definen que la codificación STC debe tener 2 antenas transmisoras, una o más antenas receptoras y usar codificación de Alamouti. Para antenas adaptativas se usa 2 o más antenas transmisoras y una o más antenas receptoras mientras que para los sistemas MIMO utiliza multiplexado espacial con dos antenas transmisoras y dos o más antenas receptoras [7].

Wimax es una alternativa real al bucle de abonado tradicional, DSL o cable, gracias a ser una tecnología inalámbrica orientada a servicios IP de banda ancha que permite nuevos modelos de negocio de pago por uso y uso bajo demanda. Es una mejora considerable de los accesos inalámbricos de banda ancha (BWA) actuales, los cuales son caros y propietarios o como en el caso de LMDS no han tenido mucho éxito. Wimax mejora el rendimiento de los sistemas BWA existentes gracias a que puede actuar en bandas libres o bajo licencia, proporciona buenas prestaciones en condiciones NLOS, soporta calidad de servicio, puede ser portable y dado que está basado en estándares su fabricación puede realizarse en masa para reducir el coste de los equipos.

Inicialmente Wimax está destinado a establecer enlaces fijos de banda ancha en escenarios exteriores o semi-exteriores, con los equipos receptores montados en la ventana. Sin embargo, la verdadera penetración de la tecnología se llevará a cabo con el desarrollo de modems de sobremesa o integrados en ordenadores portátiles que permitan explotar las características de portabilidad, llegando directamente al usuario final. Así fabricantes como Intel proporcionarán tarjetas Wimax para portátiles para 2008.

MIMO en el estándar IEEE 802.11n

Una de los estándares cuyo uso está más extendido es el IEEE 802.11 en sus diferentes versiones que define el interface radio para redes inalámbricas de área local. Su principal ventaja es utilizar bandas frecuenciales que no necesitan licencia lo que ha facilitado su penetración en el mercado. Sin embargo, los reducidos anchos de banda junto con la

necesidad de aplicar técnicas para combatir las interferencias de otras tecnologías con las que comparte la banda, solo consigue obtener velocidades brutas de transmisión limitadas, con valores máximos de 54 Mbps.

Para incrementar la velocidad de transmisión es necesario bien aumentar el ancho de banda o bien aumentar la eficiencia espectral. La nueva revisión del estándar de redes locales inalámbricas IEEE 802.11 desarrollada por el grupo de trabajo TGn propone el uso de múltiples antenas con multiplexación espacial combinados con la posibilidad de uso de canales de doble ancho (40MHz). Las primeras versiones contemplan el uso de dos antenas transmisoras que permitirán velocidades máximas de 300 Mbps con una eficiencia espectral de 7.5bps/Hz . Versiones posteriores utilizarán 3 y 4 antenas transmisoras.

Actualmente el estándar 802.11n se encuentra únicamente en su versión de borrador 2.0, y no será hasta octubre de 2008 cuando aparezca la versión definitiva.

MIMO en el estándar IEEE 802.20

En diciembre de 2002 se comienza el desarrollo del futuro estándar IEEE 802.20 para la especificación de un interface radio (capa física y de control de acceso al medio) para transmisión eficiente de paquetes optimizada para servicios IP. El objetivo es el desarrollo de redes de acceso inalámbrico de banda ancha móviles (MBWA). Este estándar nace con el objetivo de complementar al estándar IEEE 802.16a que inicialmente estaba destinado a enlaces fijos (FBWA). La evolución del estándar 802.16 hacia enlaces móviles implica que ambos estándares estarán orientados a cubrir el mismo tipo de comunicaciones móviles.

IEEE 802.20 está destinado a operar en bandas bajo licencia a velocidades de hasta 250 Km/h. IEEE 802.20 usa anchos de canal escalables entre 5-20 MHz e incorpora el uso de múltiples antenas tanto para realizar beamforming como para conformar canales MIMO. A diferencia de IEEE 802.16e, que es una evolución del 2004 para enlaces fijos, el 802.20 esta creado desde cero y orientado desde su inicio a comunicaciones móviles. Este hecho permite que sea un estándar más eficiente y de mayor rendimiento.

Su inconveniente es que aun se encuentra en estado de borrador su fecha de salida del estandar final es diciembre 2008, fecha en la cual su competidor, el estándar IEEE 802.16e-2005 llevará ya varios años en el mercado.

MIMO en el 3GPP

El *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) es un acuerdo de colaboración establecido en diciembre de 1998 con el objetivo de crear la especificación de un sistema de telefonía móvil global. Una de sus características más importante introducidas ha sido HSDPA (*High Speed downlink packet access*). HSDPA representa un avance en WCDMA para obtener mayores velocidades de transmisión de datos. Permitirá actualizar la arquitectura existente para lanzar servicios de alta velocidad con un mínimo de inversión. El 3GPP identifica 3 fases en la evolución de HSDPA. En primer lugar, “HSDPA básica”, definido en la release 5 que permite tasas de datos típicas de 10.8Mbit/s (máxima de 14.4Mbit/s). La segunda fase incorpora antenas inteligentes y HSUPA y la tercera fase ya contempla la combinación de OFDM y MIMO. Esta fase, desarrollada en el grupo de estudio RAN LTE, pronostica tasas de transmisión de datos de 100 Mbps en el enlace descendente mediante el uso de multiples antena con multiplexado espacial.

1.3 Contribución y Estructura de la Tesis

Ante la evolución de los sistemas MIMO, el trabajo desarrollado durante estos años, reflejado en esta memoria, es una contribución al estudio de canal radio que utiliza múltiples antenas. Apoyado en la amplia experiencia del grupo de trabajo en la medida y caracterización del canal radio de tipo SISO, se realiza el estudio del canal MIMO desde el punto de vista empírico en micro y picoceldas para diferentes escenarios. El objetivo es analizar el rendimiento del canal MIMO en redes inalámbricas de área local WLAN y en redes inalámbricas de área metropolitana WMAN. Este rendimiento del canal se cuantifica en términos de eficiencia espectral, evaluando la capacidad del canal, es decir la eficiencia espectral máxima en dicho escenario.

Aunque el rendimiento del canal se mide mediante la capacidad, la correlación espacial es un parámetro muy ligado al comportamiento de la capacidad. El estudio del canal MIMO parte del análisis de la correlación espacial que permitirá valorar e interpretar la degradación en el rendimiento que sufren los canales MIMO en diferentes escenarios y situaciones.

Los estándares IEEE 802.16-Wimax e IEEE 802.11n son actualmente dos de los estándares con más expectativas para poder obtener alta penetración en el mercado. En este sentido el análisis se realiza en escenarios y bandas frecuenciales utilizadas por estos sistemas. Así el estudio del canal se realiza para canales de banda estrecha en la banda de

2.4 GHz y para canales de banda ancha en las bandas de 2.4 GHz y 3.5 GHz. En banda estrecha se analizan picoceldas de tipo interior, escenarios típicos de funcionamiento de una WLAN, y picoceldas de tipo exterior-interior, también denominadas mixtas, donde el transmisor se encuentra en el exterior, en una terraza de un edificio próximo y el receptor se encuentra en el interior. Como se verá más adelante, este tipo de escenarios son de gran interés para los operadores de redes, principalmente por motivos económicos. En banda ancha, además de estos escenarios se analizan escenarios de tipo outdoor, representativos de situaciones actuales de enlaces fijos inalámbricos (FWA), donde el receptor se encuentra bien en el tejado del edificio o bien en la fachada del mismo, mientras que el transmisor se encuentra situado en la misma terraza que en los escenarios mixtos.

El desarrollo de cualquier estándar para comunicaciones vía radio contempla una fase de simulación para evaluar el rendimiento del enlace y del sistema. Para estas simulaciones se requiere modelos del canal radio que reproduzcan fielmente el comportamiento del canal pero que además sean simples de usar y no representen una carga computacional elevada. En este sentido, y basado en las medidas de canal realizadas, se desarrollan modelos basados en líneas de retardo, simples pero que modelan adecuadamente el comportamiento del canal. Estos modelos se definen para canales SISO y posteriormente se amplían a canales MIMO introduciendo la correlación espacial entre subcanales.

El contenido de esta memoria se ha estructurado en siete capítulos. El capítulo 2 presenta una introducción a los sistemas MIMO y a su significado físico, describiendo factores como la mejora de la fiabilidad, el aumento de la velocidad de transmisión o la ganancia de los arrays, factores que originan la ganancia de los sistemas MIMO frente a los sistemas SISO. En este capítulo se resumen los esquemas clásicos de diversidad en recepción y se presentan los esquemas de diversidad en transmisión en particular los sistemas de codificación espacio temporal que permiten reducir la tasa de error en bit (BER), mejorar la fiabilidad y calidad del enlace y los sistemas de multiplexado espacial (BLAST) que permiten explotar eficientemente el uso de múltiples antenas en transmisión para aumentar la eficiencia espectral. Se desarrolla en este capítulo un modelo equivalente del canal MIMO que aporta una interpretación física más intuitiva de las ventajas introducidas por el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción.

El capítulo 3 se encarga de describir aspectos previos que ayudarán al análisis de los canales MIMO que se estudian en esta tesis. Por una parte se describen los escenarios de medida seleccionados y los sistemas de medida utilizados para el estudio del canal MIMO tanto en banda ancha como en banda estrecha. Aunque los sistemas de medida están orientados a la medida y estudio de canales MIMO, se aprovecha que se dispone de

medidas de los correspondientes canales entre cada par de antenas transmisora y receptora para caracterizar los canales SISO. El rendimiento de los canales MIMO depende la estadística de los desvanecimientos o la dispersión temporal de estos canales SISO. Así este capítulo se centrará en caracterizar dichos canales en los escenarios presentados tanto en banda estrecha como en banda ancha.

Dada la importancia de la correlación espacial en los sistemas de diversidad espacial, el capítulo 4 se centra en estudiar la correlación espacial entre los diferentes subcanales del canal MIMO medido en los diferentes entornos. Este capítulo presenta el modelado matricial de la correlación espacial del canal MIMO, presentando el sentido físico de cada componente de la matriz así como posibles simplificaciones del modelo. Se analiza la influencia en la correlación de parámetros como el entorno que rodea a los arrays (densidad de scatters), la orientación de los arrays lineales, la separación entre elementos o la presencia de línea de vista. Para canales de banda estrecha, el análisis se realiza para una separación entre elementos receptores variable, siendo la separación entre transmisores fija. El motivo de centrar el análisis en uno de los extremos radica en que el transmisor suele permitir una separación entre antena mayor que el equipo receptor del usuario, generalmente un equipo portátil de pequeñas dimensiones que restringe la posible separación entre antenas.

En el capítulo 5 se analiza la capacidad de los canales MIMO previamente medidos. Se fijan las bases teóricas, desarrollando las expresiones de capacidad del canal MIMO obtenidas desde el punto de vista de la teoría de la información y desde el punto de vista de la ingeniería de comunicaciones que permite una interpretación de la capacidad a partir de las características físicas del canal. Se presentan parámetros que limitan la capacidad, como la correlación espacial, el fenómeno denominado keyhole, la selectividad frecuencial o la estadística de los desvanecimientos de los tonos frecuenciales en el caso de canales MIMO OFDM. Dada la importancia que tienen los valores propios en el cálculo de la capacidad se muestra como estos valores propios relacionan directamente las características físicas del canal con la eficiencia espectral.

El capítulo 6 presenta modelos de canal basados en líneas de retardo para escenarios interiores y escenarios exteriores – interiores para sistemas SISO. Los novedosos modelos para escenarios mixtos presentados constituyen una interesante aportación al desarrollo de las comunicaciones en este tipo de escenarios. Estos modelos permiten caracterizar y reproducir de manera eficiente y simple canales SISO en escenarios interiores y mixtos. Otra importante contribución es la extensión de los modelos desarrollados de canal SISO a canales MIMO. Esta extensión del modelo a canales MIMO resulta de especial interés, no solo por la mejora en el método de modelado de la correlación entre subcanales, sino

también porque se muestra el proceso completo de modelado y se comparan los resultados de capacidad del modelo con medidas reales de canal, aportando resultados muy buenos.

En este capítulo 6 inicialmente se desarrollan modelos para canales SISO a partir de las medidas de canal realizadas. Se describe el método para modelar y reproducir el canal a partir de los parámetros que lo describen. Se presentarán los modelos TDL de canales SISO en cada uno de los escenarios evaluados y se comprobará la bondad del método comparando los parámetros temporales y frecuenciales de las medidas con los del modelo obtenido. Una vez desarrollado el modelo de canal SISO se amplía a un modelo de canal MIMO, incorporando un parámetro más al modelo, la correlación espacial entre subcanales. La validación del modelo MIMO se realiza comparando la función de probabilidad acumulada de la capacidad obtenida a través de las medidas con la obtenida a partir del modelo.

Por último, el capítulo 7 presenta el resumen y conclusiones del estudio y caracterización del canal radio de múltiples antenas transmisoras y receptoras en diferentes escenarios y condiciones. En este capítulo también se presenta una serie de líneas de trabajo que quedan abiertas para su desarrollo así como otra serie de ideas que pueden ser de interés para abrirse en el futuro

1.4 Referencias

- [1] J. Winters, "On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment," *IEEE Journal on selected areas on communications*, Vol. 5, pp. 871-878, Junio 1987
- [2] G. J. Foschini, M.J. Gans, "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas," *Wireless Personal Communications*, Vol. 6, Issue 3, Marzo 1998, pp. 311-335.
- [3] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna gaussian channels," AT&T Bell Laboratories, BL0 112 170-950 615-07TM, 1995
- [4] Wittneben, "A new bandwidth efficient transmit antenna diversity for linear digital modulation," *Proceedings ICC*, pp. 1630-1634, 1993.
- [5] W. C. Jakes, "Microwave Mobile Communications," IEEE reissue 1994.
- [6] I. E. Telatar, "Capacity of multiple antenna Gaussian channels," *European Transactions on Communications*, Vol. 10, No. 6, Nov./Dec. 1999, pg 585-595.

- [7] Wimax Forum “Mobile WiMAX - Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation” Agosto 2006 <http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/>