

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 7

Conclusiones y Líneas Futuras

7.1 Conclusiones

Dado el gran interés que suscitan los sistemas de múltiples antenas, principalmente motivado por su capacidad para mejorar la eficiencia espectral máxima, se ha realizado un amplio análisis del canal MIMO, el cual ha consistido en la medida, caracterización y el modelado del canal radio en diferentes escenarios y condiciones de propagación.

Los escenarios estudiados han sido picoceldas interiores y microceldas exteriores y mixtas. En los escenarios interiores el despliegue de redes inalámbricas de área local es una realidad hoy en día pero con unas velocidades de transmisión netas muy por debajo de las ofrecidas por las redes cableadas. Los sistemas MIMO permitirán que las WLAN sean una tecnología más competitiva y adaptada a las necesidades de comunicación. Los escenarios mixtos están más enfocados a las comunicaciones punto multipunto de redes de área metropolitana (WMAN). Las comunicaciones en este tipo de escenarios mixtos aportan numerosas ventajas: permiten mayor movilidad al usuario, facilitan la escalabilidad de la red, reducen los costes de instalación y mejoran el modelo de negocio para el operador.

Los estudios realizados, tanto en banda estrecha como en banda ancha, se han centrado en canales radio de sistemas MIMO 2×2 en escenarios de diferentes características (mayor o menor número de obstáculos) y diferentes condiciones de

propagación: orientación entre arrays, presencia de línea de vista o separación entre antenas receptoras.

Los sistemas de medida utilizados se han desarrollado mediante equipos de medida de propósito general habituales en un laboratorio de investigación. Las medidas se han realizado en bandas de 2.4 GHz y 3.5 GHz donde se prevé mayor desarrollo de los estándares de redes (IEEE 802.11n e IEEE 802.16).

Previo al estudio del canal MIMO, se ha caracterizado el comportamiento temporal y frecuencial de los subcanales entre cada antena transmisora y receptora. Se ha mostrado como el comportamiento de estos subcanales, junto con la dependencia estadística entre ellos, determina el carácter del canal MIMO.

El estudio del canal MIMO ha partido del análisis de la correlación espacial. Cuanto mayor es el grado de correlación, menor es el número de grados de libertad del canal y por tanto menor es la ganancia en capacidad introducida por el canal MIMO respecto al SISO. A partir del estudio realizado se han obtenido las siguientes conclusiones respecto a la correlación espacial:

- La correlación espacial muestra una gran dependencia con la línea de vista entre transmisor y receptor. Se ha observado, al analizar la correlación en recepción, como en presencia de línea de vista la correlación entre subcanales es elevada, incluso para separaciones altas entre elementos receptores. En situaciones NLOS, la ausencia de esta componente dominante genera mayor uniformidad del PAS proporcionando valores de correlación menores.
- En las áreas con línea de vista se ha observado la influencia de la orientación relativa entre arrays sobre la correlación. Cuando ambos arrays están paralelos, el aumento de la separación entre los elementos receptores permite un descenso mayor de la correlación que cuando los arrays están perpendiculares. De esta manera, para una separación dada, la correlación será menor cuando la orientación sea paralela. Este comportamiento no se aprecia en situaciones NLOS donde la mayor uniformidad de las componentes de *scattering* junto con su alta dispersión en las direcciones de llegada hacen que el comportamiento de la correlación sea inmune a la orientación relativa del array receptor respecto del transmisor.
- Las características del escenario y su riqueza de *scattering* también influyen notablemente sobre el comportamiento de la correlación. Así en las áreas LOS de los escenarios mixtos se ha observado que las características de la fachada condiciona el

número de componentes que acceden al interior del edificio. Cuanta más obstrucción presenta, menos elementos dispersores se iluminan, presentando un *scattering* pobre respecto al rayo directo. Por este motivo es necesario separaciones entre receptores altas para que la correlación baje a 0.5 ó 0.7.

La capacidad del canal ha sido el parámetro estudiado para evaluar el rendimiento de los canales MIMO medidos. El estudio del rendimiento se ha realizado para una SNR fija de 30 dB, con el objetivo de comparar los diferentes escenarios únicamente en función de las propiedades de la respuesta impulsiva matricial del canal. De este estudio se obtienen las siguientes conclusiones:

- El uso de sistemas MIMO realmente introduce una mejora en la capacidad del canal respecto a los canales SISO. Así para una SNR de 30 dB un canal SISO aporta una capacidad media de 10 bps/Hz, mientras que un sistema MIMO 2×2 con desvanecimiento Rayleigh incorrelado presenta una capacidad de 17.8 bps/Hz. Incluso en los canales MIMO medidos que presentan alta correlación, la mejora en la capacidad respecto al canal SISO es superior a 3.5 bps/Hz.
- Se ha observado como la correlación espacial condiciona el comportamiento de la capacidad. Su comportamiento, al igual que el de la correlación, depende de distintos aspectos como la presencia de línea de vista o la orientación relativa entre arrays.
- En canales MIMO-OFDM se ha observado como la selectividad frecuencial introduce una mejora en la capacidad outage que aumenta la capacidad mínima garantizada un amplio porcentaje del tiempo. La capacidad outage 10% presenta una mejora de 2 bps/Hz en interiores y entre 2 y 4 bps/Hz en los escenarios mixtos respecto al canal MIMO sobre un solo tono.

A partir de las medidas de canales SISO y MIMO realizadas, se han extraído modelos estadísticos de canal basados en líneas de retardo. Estos modelos permiten modelar eficientemente el canal de una manera sencilla y con poca carga computacional. A partir de las medidas de canal en un ancho de banda de 250 MHz, se desarrollan modelos de 50 MHz de ancho de banda que reproducen adecuadamente las características temporales del canal.

Partiendo de los modelos SISO obtenidos, se ha incorporando la correlación espacial entre los subcanales, obteniéndose modelos de canal MIMO. Una ventaja que aporta el modelado es que como la correlación espacial se aplica únicamente al primer *tap*, requiere una sola matriz de correlación, con independencia del número de *taps* del

modelo. La capacidad obtenida a partir de las realizaciones del modelo presenta una estadística muy similar a la obtenida a partir de las medidas, presentando, para una SNR de 30 dB, un error relativo en general por debajo del 5 %.

Este proceso de modelado representa una interesante aportación al modelado de canales MIMO en banda ancha gracias a su eficiencia y sencillez. Además permite aprovechar modelos SISO TDL existentes y ampliarlos a modelos MIMO con la única necesidad de incorporar una matriz de correlación espacial.

7.2 Líneas futuras de trabajo

Como líneas de trabajo que permanecen abiertas y que sería interesante desarrollar se pueden destacar las siguientes.

- La mejora del sistema medida que permita medir correctamente las fases del canal y prescindir de la aproximación de fase mínima. Además, en el sistema de medida de banda ancha sería interesante reducir los tiempos de medida y utilizar antenas de menor tamaño para evaluar la correlación espacial en ausencia de acoplo mutuo entre antenas.
- El acoplo mutuo entre antenas es un factor que puede afectar al análisis del canal MIMO. Es interesante realizar un estudio de la importancia del acoplo entre antenas, evaluando separaciones mínimas entre elementos, pérdida en SNR debida al desacoplo, modificación del diagrama de radiación que descorrela las señales.
- Desde el punto de vista de correlación sería interesante ampliar el estudio del PAS y su relación con la correlación. Sería interesante poder caracterizar la correlación del entorno simplemente a través de los parámetros de la distribución del PAS. Se propone desarrollar nuevos sistemas de medida o utilizar el trazado de rayos para poder conocer la distribución angular de potencia.
- Los valores propios del canal relacionan el efecto de la correlación con el comportamiento de la capacidad. La relación entre el valor propio superior e inferior, el número de condicionamiento, es una forma compacta que permite caracterizar el comportamiento del canal. Sería interesante estudiar el número de condicionamiento como valor que caracteriza el comportamiento del canal y su relación con la capacidad del canal.

- El análisis mostrado de la capacidad se realiza para una SNR constante dado que el objetivo es comparar la influencia de la matriz de canal. Para completar el estudio sería interesante evaluar la capacidad del canal en función de la SNR medida para así poder valorar la variación de la SNR de manera conjunta con correlación espacial.

Respecto a los modelos de canal y el método de modelado propuesto se destacan las siguientes posibles líneas futuras:

- En primer lugar validar los modelos obtenidos en otros escenarios para valorar el rango de escenarios en los que tienen validez.
- Por otra parte, evaluar la validez del modelo de Kronecker para modelar la correlación aplicada al primer *tap* de una manera aun más simple, pasando de 6 coeficientes de correlación en un sistema 2x2 a únicamente 2 coeficientes.
- Ampliar el modelado de canal a los escenarios de exteriores.

Acrónimos

AoA	Angulo de llegada – <i>Angle of arrival</i>
AoD	Angulo de salida – <i>Angle of departure</i>
AS	Dispersión angular – <i>Angular spread</i>
BER	Tasa de error en bit – <i>Bit error rate</i>
BFWA	Acceso Fijo inalámbrico de banda ancha – <i>Broadband fixed wireless access</i>
CCDF	Función de distribución de probabilidad acumulada complementaria – <i>Complementary cumulative distribution function</i>
CDF	Función de distribución de probabilidad acumulada – <i>Cumulative distribution function</i>
FCF	Función de correlación en frecuencia – <i>Frequency correlation Function</i>
ISM	Industrial, científica y médica – <i>Industrial, scientific and medical</i>
LMDS	Sistema de distribución multipunto local – <i>Local multipoint distribution system</i>
LOS	Línea de vista – <i>Line of sight</i>
MEA	Array de múltiples elementos – <i>Multiple element array</i>
MIMO	Múltiples entradas, múltiples salidas – <i>Multiple input multiple output</i>
MISO	Múltiples entradas, una salida – <i>Multiple input single output</i>
NLOS	No línea de vista – <i>Non line of sight</i>
OFDM	Multiplexación ortogonal por división de frecuencia – <i>Orthogonal frequency division multiplex</i>
PAS	Espectro de Potencia en azimut – <i>Power Azimuth Spectrum</i>
PDP	Perfil retardo potencia – <i>Power delay profile</i>
SIMO	Una entrada múltiples salidas – <i>Single input multiple output</i>
SISO	Una entrada una salida – <i>Single input single output</i>
SNR	Relación señal a ruido – <i>Signal to noise ratio</i>
TDL	<i>Tapped Delay line</i>
WLAN	Red inalámbrica de área local – <i>Wireless local area network</i>
WMAN	Red inalámbrica de área metropolitana – <i>Wireless metropolitan area network</i>
WPAN	Red inalámbrica de área personal – <i>Wireless personal area network</i>
WSSUS	Estacionario en sentido amplio con <i>scattering</i> incorrelado – <i>Wide sense stationary, uncorrelated scattering</i>