

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES**



**TESIS DOCTORAL**

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

**Oscar Fernández Fernández**

**Santander, Mayo de 2007**

**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**

# Agradecimientos

Son muchas las personas que han contribuido a que esta tesis pueda ver la luz y como tal quiero dedicarles estas líneas en señal de agradecimiento.

En primer lugar me gustaría agradecer a los directores de la tesis su dedicación, esfuerzo y tiempo extraído de sus obligaciones para elaborar de la tesis, tanto en la investigación realizada como en el desarrollo de esta memoria. Quiero dar las gracias a Marta Domingo, “culpable” de que hace ya unos años comenzase esta andadura, por todo su inestimable apoyo, por la ayuda en las campañas de medida a media noche (gracias por las tortillas) y por su cercanía en el plano personal, en particular en esos momentos en los que el “vaso está medio vacío”. Quiero agradecer a Rafael Torres su gran contribución a la tesis y toda la ayuda prestada desde el inicio de la misma.

Además de los directores de tesis quiero y debo dar las gracias a mis compañeros y amigos del grupo GISAR, porque siempre me han prestado su apoyo, siempre de manera desinteresada. A Luis por su amistad, por las agradables conversaciones, por “mojarse” a la hora de aconsejar y por el gran conjunto de pequeñas contribuciones en las que me ha ayudado. A Jesús por su ayuda y colaboración en todo lo que podía, por esas largas charlas optimistas y porque la vida del becario se lleva mejor cuando no estas solo. También quiero dar las gracias al resto de compañeros del grupo GISAR que han contribuido de alguna manera a la elaboración de esta tesis, en particular a José por mis irrupciones en su despacho en busca de respuestas.

Quiero extender este agradecimiento a todos los que, de alguna manera, me han apoyado y ayudado para que esta tesis sea una realidad.

Quisiera agradecer muy especialmente a mi familia el apoyo prestado, no solo durante esta tesis, sino desde siempre. A mi madre y a mi padre que yo se que estaría muy orgulloso de ver como se termina esta historia que un día empezamos juntos. También quiero agradecer a Javi su apoyo y su forma de ser que en muchas ocasiones te hace plantear la vida de otra manera.

Por último quiero agradecer profundamente a María José todo el apoyo que me ha ofrecido, su alegría, optimismo y la paciencia que ha tenido que tener conmigo, que tengo que reconocer ha sido mucha. Sin duda tu ánimo, compañía y forma de ser han sido las mejores ayudas para completar esta tesis y superar los momentos difíciles y negativos.

*A mi Padre*

# Resumen

El uso de múltiples antenas en transmisión y recepción en los sistemas de radiocomunicaciones representa uno de los avances más importantes desarrollados en la última década dado que permiten reducir la probabilidad de error y aumentar la velocidad de transmisión sin necesidad de incrementar ni la potencia transmitida ni el ancho de banda utilizado. Estos sistemas presentan una mayor dependencia con las características de propagación que los sistemas tradicionales de una entrada y una salida. Esta tesis tiene como objetivo caracterizar experimentalmente el comportamiento del canal MIMO en diferentes escenarios y evaluar la dependencia del rendimiento del canal con la tipología del escenario y diferentes condiciones de propagación. Para facilitar el desarrollo de futuros sistemas con múltiples antenas en estos escenarios, se presentan modelos sencillos y eficientes de canales SISO y MIMO.

El análisis del canal MIMO se ha realizado a partir de diversas campañas de medidas realizadas en distintos escenarios interiores, exteriores y mixtos. Se han estudiado canales MIMO  $2 \times 2$  a partir de dos aspectos fundamentales: la correlación espacial y la capacidad del canal. El primer aspecto, la correlación espacial, indica el grado de independencia estadística existente entre los subcanales generados entre cada antena transmisora y receptora. Ésta degrada el rendimiento del canal al reducir la diversidad espacial y la capacidad.

El estudio se completa con el desarrollo de un método de modelado basado en líneas de retardo. Mediante este método se obtienen modelos sencillos y eficientes de canales SISO y MIMO de los escenarios interiores y mixtos medidos. Así se contribuye al desarrollo de nuevos sistemas de comunicaciones inalámbricos en escenarios mixtos y a facilitar la simulación de sistemas MIMO gracias a los nuevos modelos propuestos.

# Abstract

The use of multiple antennas on the transmit and receive side of radiocommunications systems represents one of the most important advances developed in the last decade because it reduces the error probability and increases the data rate without rising either the transmitted power or the used bandwidth. These systems present greater dependency of the propagation conditions than the traditional single input – single output systems. The aim of this thesis is the experimental characterization of the MIMO channel behavior in different scenarios, including the evaluation of the channel performance dependency with the type of scenario and different propagation conditions. In order to facilitate the development of future systems with multiple antennas in these scenarios, simple and efficient SISO and MIMO channel models are presented.

The analysis of the MIMO channel has been based on several measurement campaigns carried out in different outdoor, indoor and mixed environments.  $2 \times 2$  MIMO channels are studied with regard to two fundamental aspects: the spatial correlation and the channel capacity. The first aspect, the spatial correlation, indicates the degree of statistical independence among the subchannels generated between each transmitter and receiver antenna. This correlation degrades the channel performance, as it reduces the spatial diversity and the capacity.

The analysis is completed with the development of a method to model the radio channel based on tapped delay lines. Using this method, simple and efficient SISO and MIMO channel models of indoor, outdoor and mixed scenarios have been obtained. In this way this work contributes to the development of new wireless communication systems and to facilitate the simulation of MIMO systems by means of the new proposed models.

# Índice

<b>Capítulo 1.- Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Situación actual de los sistemas MIMO .....	2
1.3 Contribución y estructura de la tesis.....	6
1.4 Referencias .....	9
<b>Capítulo 2.- Introducción a los sistemas MIMO .....</b>	<b>11</b>
2.1 Introducción .....	11
2.2 Introducción a los sistemas MIMO.....	14
2.3 Bases de los sistemas MIMO.....	15
2.3.1 Ganancia por multiplexación espacial.....	15
2.3.2 Ganancia por diversidad .....	16
2.3.3 Ganancia de array .....	17
2.3.4 Solución de compromiso .....	18
2.4 Diversidad espacial en recepción.....	19
2.5 Diversidad espacial en transmisión .....	22
2.5.1 Codificación espacio temporal .....	23
2.5.1.1 Codificación espacio temporal Trellis (STTC).....	24
2.5.1.2 Codificación espacio temporal de bloque (STBC) .....	24
2.5.2 Multiplexado espacial.....	25
2.6 Modelo equivalente del canal MIMO.....	26
2.7 Correlación espacial .....	29
2.8 Capacidad .....	30
2.9 Bibliografía.....	31
<b>Capítulo 3.- Caracterización experimental del Canal Radio.....</b>	<b>35</b>
3.1 Introducción.....	35
3.2 Escenarios de Medida.....	37

3.3	Caracterización del canal en banda estrecha.....	44
3.3.1	Potencia Media.....	45
3.3.2	Estadística de los desvanecimientos.....	45
3.3.3	Sistema de medida en banda estrecha .....	48
3.3.3.1	Coherencia del sistema de medida.....	51
3.3.4	Resultados .....	51
3.3.4.1	Escenarios interiores.....	52
3.3.4.2	Escenarios exteriores-interiores.....	54
3.4	Caracterización del canal en banda ancha .....	57
3.4.1	Caracterización en el dominio del tiempo .....	58
3.4.2	Caracterización en el dominio de la frecuencia.....	59
3.4.3	Sistema de medida en banda ancha .....	60
3.4.3.1	Coherencia del sistema de medida.....	63
3.4.3.2	Procesado de las medidas .....	64
3.4.4	Resultados escenarios interiores.....	66
3.4.5	Resultados escenarios exteriores-interiores.....	69
3.4.6	Resultados escenarios exteriores .....	72
3.5	Conclusiones.....	74
3.6	Bibliografía.....	77

## **Capítulo 4.- Correlación espacial en canales MIMO ..... 81**

4.1	Introducción.....	81
4.2	Efecto de la correlación en los canales MIMO.....	83
4.3	Modelado de la correlación espacial.....	84
4.3.1	Simplificación del cálculo de la matriz de correlación.....	87
4.4	Correlación compleja vs correlación de envolvente .....	89
4.5	Influencia de diversos parámetros en la correlación.....	90
4.5.1	Dependencia de las características físicas .....	90
4.5.2	Dependencia con el entorno .....	92
4.5.2.1	Relación entre correlación, PAS y dispersión angular .....	94
4.5.3	Parámetros físicos vs parámetros del entorno .....	96
4.6	Estudio experimental de la correlación espacial.....	96
4.6.1	Procesado de la medidas para obtener la correlación .....	97
4.6.2	Escenarios interiores.....	99
4.6.2.1	Escenario hall .....	100
4.6.2.2	Escenario CDTUC.....	104
4.6.2.3	Conclusiones escenarios-interiores.....	108
4.6.3	Escenarios exteriores-interiores.....	110
4.6.3.1	Escenario oficinas.....	110
4.6.3.2	Escenario laboratorios .....	113



4.6.3.3	Escenario salón de actos .....	116
4.6.3.4	Conclusiones escenarios exteriores-interiores .....	118
4.6.4	Correlación del canal en banda ancha .....	119
4.6.4.1	Escenarios interiores.....	119
4.6.4.2	Escenarios exteriores-interiores.....	121
4.6.4.3	Escenarios exteriores .....	123
4.7	Conclusiones.....	124
4.8	Bibliografía.....	128

## **Capítulo 5.- Capacidad de los sistemas MIMO ..... 133**

5.1	Introducción .....	133
5.2	Capacidad en sistemas MIMO.....	135
5.2.1	Interpretación teoría de la Información .....	136
5.2.2	Interpretación Ingeniería de comunicaciones.....	138
5.2.3	Consideraciones sobre la capacidad .....	139
5.3	Conceptos de capacidad.....	140
5.3.1	Capacidad Ergódica.....	140
5.3.2	Capacidad outage .....	140
5.4	Capacidad en sistemas de banda ancha.....	141
5.5	Valores Propios.....	143
5.6	Factores que limitan la capacidad.....	146
5.6.1	Influencia de la correlación espacial .....	147
5.6.2	Influencia de los <i>keyholes</i> .....	148
5.6.3	Influencia de la dispersión temporal.....	149
5.6.4	Influencia de la estadística de los desvanecimientos.....	149
5.7	Resultados.....	150
5.7.1	Capacidad banda estrecha .....	152
5.7.1.1	Escenarios Interiores .....	152
5.7.1.2	Escenarios exteriores interiores .....	155
5.7.2	Capacidad Banda ancha.....	159
5.7.2.1	Escenarios interiores.....	160
5.7.2.2	Escenarios mixtos, exteriores – interiores .....	161
5.7.2.3	Escenarios exteriores .....	165
5.8	Conclusiones.....	167
5.9	Bibliografía.....	169

## **Capítulo 6.- Modelado de canales MIMO ..... 173**

6.1	Introducción.....	173
6.2	Modelado de canales SISO.....	177

6.2.1	Proceso de obtención del modelo de canal.....	179
6.2.2	Reproducción de canales modelados.....	182
6.2.3	Modelos de canal TDL.....	184
6.2.4	Validación de los modelos TDL SISO.....	189
6.3	Modelado de canales MIMO.....	195
6.3.1	Modelos de canal TDL MIMO.....	196
6.3.2	Validación de los modelos TDL SISO.....	198
6.4	Conclusiones.....	202
6.5	Bibliografía.....	203
<b>Capítulo 7.- Conclusiones y líneas futuras .....</b>		<b>207</b>
7.1	Conclusiones.....	207
7.2	Líneas futuras de trabajo.....	210
<b>Acrónimos .....</b>		<b>213</b>