

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN SOBRE PLATAFORMA
SOFTWARE-RADIO Y MEDIDAS DE UN DEMOSTRADOR DE
SISTEMAS MIMO PARA COMUNICACIONES INALÁMBRICAS

PROYECTO FIN DE CARRERA

Carlos Gómez Calero

Calificación: Matrícula de Honor

Resumen

Índice

1. Resumen del proyecto	2
1.1. Origen y objetivos	2
1.2. Desarrollo	3
1.2.1. Subsistema de procesado	3
1.2.2. Subsistema de radiofrecuencia	5
1.2.3. Subsistema de antena	6
1.2.4. Integración del sistema	7
1.3. Conclusiones	7
2. Originalidad del tema	8
3. Resultados	12
4. Aplicabilidad	15
A. Anexo	18
A.1. Publicaciones internacionales	18
A.2. Publicaciones nacionales	18
A.3. Otros	19
Referencias	20

1. Resumen del proyecto

1.1. Origen y objetivos

Los nuevos sistemas de comunicaciones inalámbricas requieren una mayor tasa de datos para el usuario, lo cual representa un importante reto de ingeniería. Para ello, recientemente se han considerado nuevos métodos y esquemas para hacer uso de la diversidad espacial del canal, tales como el uso de antenas inteligentes. En la actualidad, la generación de antenas inteligentes más avanzada la constituyen los sistemas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), los cuales se basan en una configuración donde múltiples elementos radiantes se distribuyen en el transmisor y en el receptor. Existen gran cantidad de estudios que muestran el incremento en capacidad que se puede obtener gracias al uso de múltiples elementos de antena a ambos lados del enlace, así como la notable eficiencia espectral de estos sistemas MIMO. Esto ha llevado a un creciente interés en dichos sistemas.

Por otro lado, para evaluar las prestaciones de estos sistemas en un entorno real, es deseable contar con prototipos y sistemas de medida MIMO reales. Las medidas de canal y posterior procesamiento de las mismas permiten analizar las características del mismo así como obtener la capacidad de estos sistemas. Además, el hecho de utilizar unos u otros algoritmos MIMO puede permitir aprovechar en mayor o menor medida las características de diversidad del canal. En este sentido, se han desarrollado y documentado en la literatura varias implementaciones reales MIMO, si bien cada una presenta ciertas ventajas y desventajas. Algunos de los sistemas MIMO implementados son medidores de canal que no incluyen ningún algoritmo MIMO. Otros prototipos consideran parte de procesamiento de señal, pero son bastante específicos para un cierto algoritmo o esquema. En cuanto a las características del array de antena, la mayoría de los prototipos usan una configuración poco flexible (atendiendo al espaciado de los elementos, polarización o diagrama de radiación).

Por tanto, el presente Proyecto Fin de Carrera tiene como objetivo la realización de un demostrador de sistemas MIMO de banda ancha que permita de forma flexible introducir algoritmos MIMO, ofrecer la posibilidad de soportar distintas configuraciones de antena y medidas de canal para aplicaciones WLAN y 4G. Ello implica cubrir todas las etapas que posee un proyecto de estas características: diseño, implementación y medidas. En este sentido, este proyecto abarca la realización de todos los elementos que forman un sistema de comunicaciones inalámbrico: transmisor, medio y receptor; junto con todos los subsistemas que los integran, es decir, procesamiento de señal, radiofrecuencia y antena. Esto aumenta la dificultad del proyecto, ya que abarca todos los aspectos de ingeniería dentro de un enlace real de comunicaciones radio.

1.2. Desarrollo

La figura 1 muestra el esquema general del sistema MIMO diseñado tanto para el transmisor como para el receptor. Consiste en un sistema MIMO $M_T \times M_R$, con M_T y M_R de 1 a 4. El funcionamiento del esquema es como sigue: en primer lugar se generan las señales

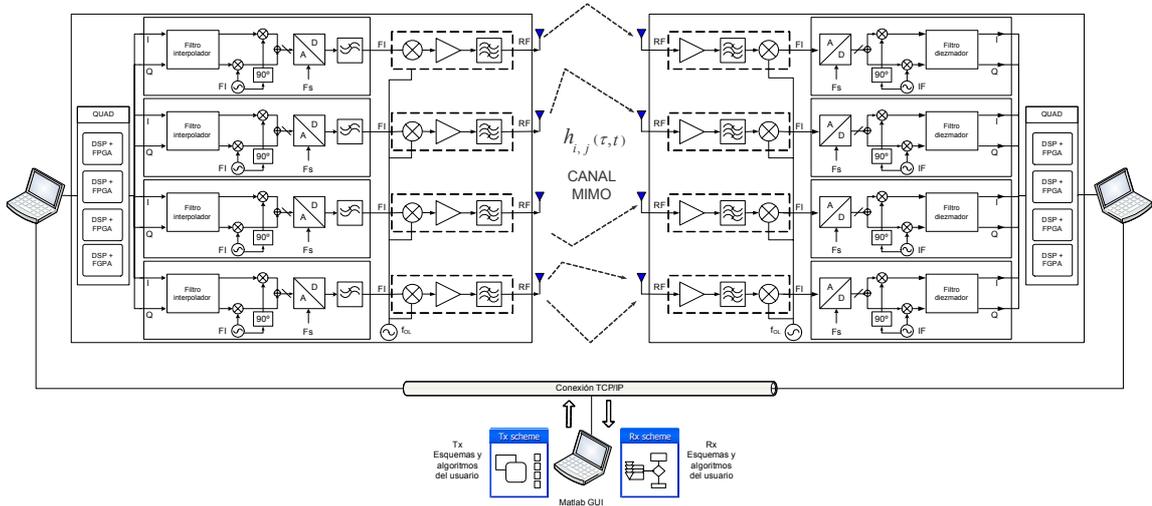


Figura 1: Esquema MIMO

a transmitir en el PC. Esto se realiza en lo que llamaremos procesamiento fuera de tiempo real (*offline*). Una vez esas señales generadas, se introducen a la parte de procesamiento en tiempo real (*online*), que está formado por plataformas Software-Radio (SDR) y se encarga de enviar las señales al siguiente subsistema. Éste es el denominado módulo o subsistema de radiofrecuencia (RF) y tiene como objetivo amplificar, filtrar y subir las señales en frecuencia para su envío. Para que eso ocurra, es necesario el subsistema de antena, cuya finalidad reside en transmitir al medio las señales procedentes de la etapa anterior. Además, cabe señalar que la señal transmitida se centra en la frecuencia de 2.45 GHz. En el lado del receptor se realiza la operación contraria al caso del transmisor. Es decir, se reciben las señales a través de las antenas, se amplifican, filtran y bajan en frecuencia, se muestrean y se envía al PC receptor para su posterior procesamiento *offline*.

A continuación, se describen los distintos subsistemas en los que se divide el demostrador realizado. Entre ellos se encuentran el subsistema de procesamiento, de RF y de antena.

1.2.1. Subsistema de procesamiento

El módulo de procesamiento del demostrador MIMO se encarga realizar las tareas correspondientes al procesamiento de señal, tanto en transmisión como en recepción. Para describirlo, este apartado se divide en las siguientes partes: la plataforma Software-Radio utilizada, el

procesado *online*, la comunicación entre los procesadores digitales (DSPs) y el PC y, por último, el procesado *offline*.



(a) Quad 4292



(b) Ventana de la aplicación

Figura 2: Procesado de señal

En lo que referente al procesado en tiempo real, se han utilizado plataformas DSP TMS320C6203 de Texas Instruments. Las cuatro cadenas transmisoras digitales se implementan en una placa DSP Quad Pentek 4292 (figura 2(a)) y dos placas *upconverters* digitales Pentek 6229. En el lado correspondiente a la recepción, las cuatro cadenas receptoras consisten en otra placa DSP Quad Pentek 4292 y dos placas digitales *downconverters* Pentek 6235.

La señal enviada desde el PC (Matlab, figura 2(b)) es recibida y almacenada en la memoria SDRAM de cada uno de los DSPs correspondientes. A continuación, se envían dichas señales al transmisor digital 6229 que se encarga de filtrar y subir la señal de banda base a frecuencia intermedia ($FI=40$ MHz) para su posterior conversión digital a analógico y salida a la parte de RF. Para ello, es necesaria una sincronización de los transmisores digitales con el objetivo de que todas las antenas transmitan la información a partir del mismo instante de tiempo. En recepción se realiza la operación inversa.

Por otro lado, al ser un sistema real, se han analizado también los aspectos de implementación, tales como errores de frecuencia por tener distintos relojes de muestreo en transmisión y recepción, así como los errores producidos por usar distintos osciladores locales, distintos relojes internos a ambos lados del enlace radio, ya que es necesaria una sincronización, estimación del offset de frecuencia y posterior corrección (figura 3), además de reducir las interferencias externas debidas a otros dispositivos que trabajan en esa banda (2.4 GHz). Esto se ha realizado en la etapa de procesado de manera que se han mitigado estos efectos, teniendo mucho cuidado de corregir todos los errores sin afectar a la matriz del canal. Cabe señalar, que todos los programas correspondientes a los transmisores, así como los receptores digitales y procesado en tiempo real, se han desarrollado en el lenguaje de programación C bajo la plataforma software utilizada de Swiftnet 4.0 de Pentek.

La comunicación entre los módulos de FPGAs-DSPs y los PCs se lleva a cabo a través de

librerías específicas para las plataformas SDR seleccionadas, lo que permite la comunicación con Matlab vía protocolo TCP/IP, como se describe en la figura 1. Esto es posible gracias al *stream* API de Swiftnet, que provee un medio para mover *streams* de datos entre el *host* y la placa en tiempo real. En nuestro caso, el Matlab es la aplicación cliente la cual se está ejecutando en el *host*, de ahí la realización flexible, así como los programas en Matlab con un interfaz amigable y de fácil manejo para el usuario, como muestra la figura 2(b).

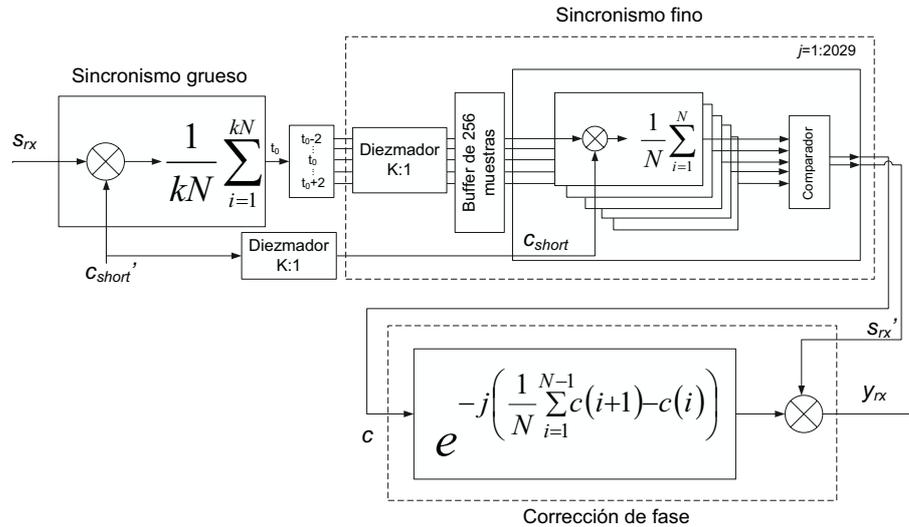


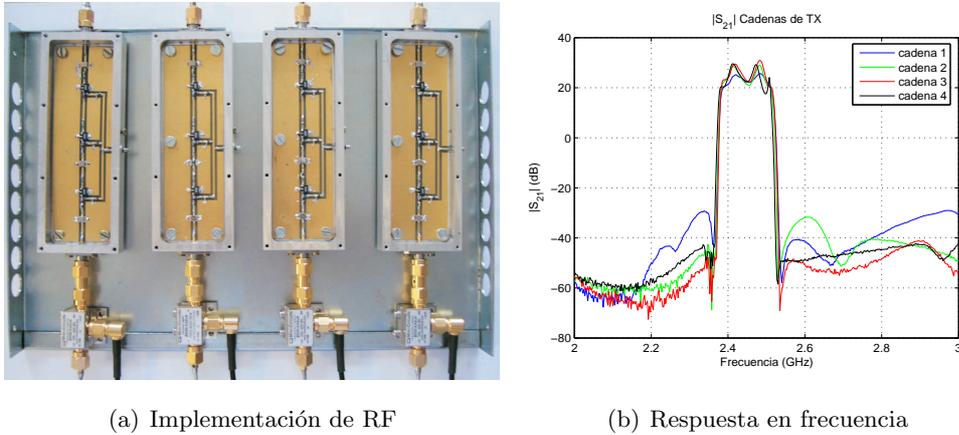
Figura 3: Esquema de la etapa de sincronismo y corrección de fase

Debido a la flexibilidad que se ofrece al usuario en el procesamiento, se puede transmitir cualquier tipo de señal (QPSK, OFDM, etc.) con el objetivo de estudiar cómo afectan los diferentes esquemas de modulación y/o codificación al canal MIMO. Se han utilizado modulaciones BPSK y QPSK, además de algoritmos espacio-temporales, como el de Alamouti.

1.2.2. Subsistema de radiofrecuencia

El módulo de radiofrecuencia se basa en un esquema heterodino en ambas cadenas de transmisor y receptor. En el transmisor, tenemos en primer lugar un mezclador para realizar la conversión de frecuencia superior de la señal en FI que entra en la cadena de RF. Para ello, se utiliza un oscilador local cuya señal se divide en cuatro ramas, mediante un divisor, para mezclarla con la señal FI de cada cadena transmisora. Para eliminar las mezclas espúreas producidas por el conversor se introduce seguidamente un filtro centrado en la frecuencia de transmisión. Posteriormente, esa señal filtrada es amplificada por una etapa formada por tres amplificadores, con un filtro entre los dos últimos para reducir los posibles productos de intermodulación o el nivel de los armónicos generados. Antes de la salida a la toma de antena que radiará la señal al medio, es necesario introducir un filtro que elimine las señales generadas fuera de la banda de trabajo para no interferir en

otros sistemas de comunicaciones que operen en esa banda de frecuencias. Además, en los receptores se incluye un amplificador de bajo ruido (LNA) para disminuir la figura de ruido del receptor aparte de otra etapa amplificadora.



(a) Implementación de RF

(b) Respuesta en frecuencia

Figura 4: Transmisor de RF

Se han diseñado dichas cadenas de RF transmisoras para proporcionar una potencia de salida de +15 dBm para medidas de indoor. En lo que respecta a los componentes utilizados para la realización de las etapas de RF se han elegido componentes de montaje superficial, así como algunos elementos conectorizados. Para los de montaje superficial (amplificadores y filtros) se han diseñado placas de circuito impreso, usando la tecnología de líneas coplanares, que se montan en cajas metálicas para evitar el acoplamiento y aislarlas de las otras cadenas o interferencias externas (figura 4).

1.2.3. Subsistema de antena

Para la estructura general del módulo de antena se dispone de hasta cuatro elementos radiantes apoyados sobre un soporte. Cada cadena de RF, tanto de transmisión como de recepción, se une a un elemento radiante. De esta manera, tenemos cuatro antenas situadas sobre un soporte que hará la función de plano de masa.

Dado que el objetivo es emplear antenas lo más omnidireccionales posibles para recibir el mayor número de rayos reflejados del canal debido al multitrayecto, se han diseñado e implementado monopolos como elementos radiantes. De este modo, esta antena puede servir de referencia para antenas posteriores específicas de MIMO.

En el diseño de la estructura del array de antena se ha pretendido usar una configuración de manera que se pueda variar la distancia entre los elementos para poder estudiar las correlaciones existentes entre los distintos canales que se formen entre transmisor y receptor del sistema MIMO. Por ello, sobre el plano de masa se sitúan las cuatro antenas diseñadas y unos agujeros en los que se pueden colocar dichas antenas con una separación de 0.1

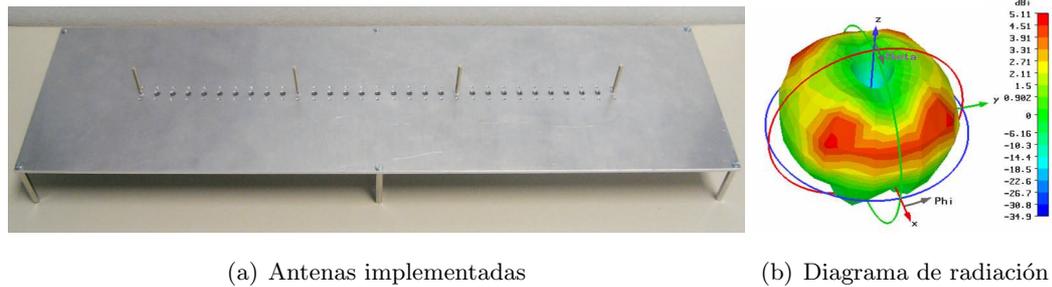


Figura 5: Resultados de la antena

veces la longitud de onda (a la frecuencia de diseño de 2.45 GHz, λ es de 12.25 cm), como muestra la figura 5.

Para la realización del plano de masa, además de la parte de RF correspondiente, se ha utilizado el AutoCAD 2005 como herramienta de dibujo. Además, los diagramas de radiación de los monopolos se han simulado usando la herramienta CST- Microwave Studio para comprobar las diferentes respuestas que presenta cada elemento radiante.

1.2.4. Integración del sistema

Una vez diseñadas e implementadas cada una de las partes que componen todo el sistema, tanto en transmisión como en recepción, se realiza la integración del mismo. Para realizar medidas en diferentes entornos y distintas situaciones, se ha situado el receptor en una plataforma móvil, como muestra la figura 6.

Una vez integrado todo el sistema, se han tenido en cuenta aspectos de calibración previa a las medidas. Para ello se han medido las respuestas de cada enlace por separado con el objetivo de corregir las diferencias existentes entre las cadenas tanto en módulo como en fase. Esta corrección se realiza de manera software en transmisión y en recepción.

1.3. Conclusiones

En el Proyecto Fin de Carrera se ha descrito el diseño, la implementación y posteriores medidas de un demostrador banda ancha para sistemas MIMO que trabaja en la banda de 2.45 GHz. Se han detallado los distintos subsistemas que lo componen, tanto en la parte del transmisor como del receptor.

El demostrador abarca todos los aspectos de un sistema real de comunicaciones desde la generación de señal en banda base hasta su recepción, previo paso por una conversión de frecuencia a RF y envío por el canal a través de las antenas; de ahí su complejidad. Además, posee una arquitectura modular, la cual hace fácil el incremento o cambio del número de transmisores y receptores, pudiendo variar así la configuración del sistema MIMO $M_T \times M_R$

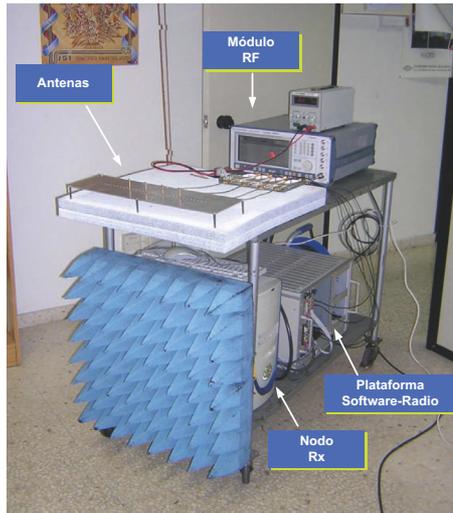


Figura 6: Montaje del receptor para medidas de movilidad

a medir, con M_T y M_R de 1 a 4. Asimismo, se ha realizado una estructura flexible basada en plataformas Software-Radio.

La principal ventaja de este demostrador es la flexibilidad que ofrece al usuario, ya que se ha realizado un entorno amigable y de fácil manejo para las distintas aplicaciones. Así, el usuario tiene la posibilidad de probar sus algoritmos MIMO bajo condiciones de un canal real de forma directa, siendo ésta una solución interesante en la etapa investigadora.

Por otro lado, se han obtenido medidas de canal con el demostrador en diferentes entornos. Las diferencias se han obtenido para casos de LOS, NLOS, *fading* y distinta separación entre elementos radiantes. La capacidad del canal MIMO bajo estudio se ve afectada por el espaciado entre antenas, debido a que a mayor proximidad, mayor correlación existe entre los distintos canales creados y, por ende, menor capacidad se obtiene en el sistema. Se ha mostrado un aumento de capacidad para entornos estáticos con respecto a situaciones de *fading*.

Además, el demostrador realizado puede ser utilizado como plataforma para la evaluación de distintas antenas MIMO a ambos lados del enlace. Por otro lado, este demostrador puede servir como herramienta para el estudio de planificación de red de comunicaciones móviles (WLAN y Cuarta Generación) evaluando diferentes entornos y configuraciones de antena para terminales de usuario.

2. Originalidad del tema

Los sistemas emergentes de comunicaciones inalámbricos y las nuevas aplicaciones suponen un incremento de la demanda en la tasa de datos deseable. Tradicionalmente se han

utilizado diversos métodos de multiplexación para optimizar los recursos disponibles. En la actualidad, la explotación del dominio espacial ha sido considerada como una manera muy interesante de incrementar la capacidad de estos sistemas. De este modo, recientemente han aparecido nuevos métodos y esquemas para hacer uso de la diversidad espacial del canal, tales como el uso de múltiples antenas a cada lado del enlace de la comunicación.

En el sistema GSM, se consiguió aumentar la capacidad mediante el uso de celdas de menor tamaño (microceldas y picoceldas) y, más recientemente, mediante la incorporación del sistema GPRS. Los nuevos sistemas de Tercera Generación (3G) UMTS presentan mayor capacidad, debido a su mayor ancho de banda y a la mejora en la eficiencia espectral respecto a GSM. Sin embargo, este incremento de la capacidad puede no ser suficiente en futuras aplicaciones o sistemas como el de Cuarta Generación (4G). Varias soluciones para aumentar la tasa binaria han sido estudiadas. Dos de ellas son la utilización de los nuevos canales de datos orientados a paquete (canales *High Speed Downlink Packet Access*, HSDPA, y *High Speed Uplink Packet Access*, HSUPA) y el aprovechamiento de la diversidad espacial. Ambas han sido consideradas dentro del estándar desarrollado por 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), lo que nos da idea de la importancia y alcance de las mismas.

Varios estudios teóricos [1] han demostrado un incremento en capacidad con el despliegue de múltiples elementos de antena a ambos lado del enlace. La notable eficiencia espectral que dichos estudios predicen con estos sistemas cuando el canal posee alta dispersión dio paso a un creciente interés en los sistemas MIMO. Como resultado, ha habido una explosión de actividad investigadora en este tema.

El prototipo MIMO realizado, al igual que los sistemas MIMO, se basa en una configuración donde múltiples elementos radiantes se distribuyen en transmisor y el receptor, como muestra el sistema de la figura 7. Las ventajas principales que ofrecen estos sistemas son la ganancia por diversidad espacial y la ganancia por multiplexación espacial. En el caso de utilizar M_T y M_R antenas en transmisor y receptor, respectivamente, la matriz del canal \mathbf{H} estará formada por $M_T \times M_R$ canales de propagación. Los sistemas MIMO combaten las pérdidas por desvanecimiento debidas al multitrayecto utilizando la independencia entre esos $M_T \times M_R$ canales. A medida que aumenta el número de antenas en ambos extremos, disminuye la probabilidad de que se desvanezcan simultáneamente.

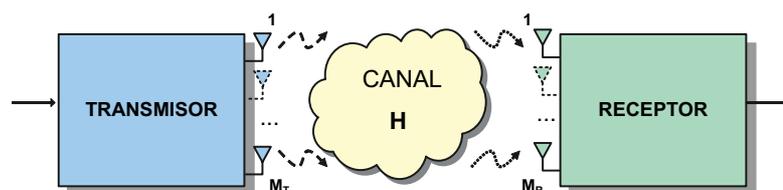


Figura 7: Sistema MIMO

Para asegurar la ganancia por diversidad espacial, las antenas deben estar separadas una distancia mayor que la distancia de coherencia del canal, que es la mínima separación para tener desvanecimientos independientes entre antenas. Esta distancia depende de la dispersión angular del multitrayecto.

En los sistemas 3G y 4G se busca un aumento de la capacidad del sistema, como se ha comentado. Un modo de lograrlo es gracias a la multiplexación espacial. Un esquema básico se basa en tomar un conjunto de símbolos en el transmisor y enviarlos en paralelo (al mismo tiempo y en la misma banda de frecuencia) por cada una de las M_T antenas, como muestra la figura 8. El receptor utiliza las diferentes firmas espaciales de la matriz de canal \mathbf{H} para separar los diferentes paquetes de bits transmitidos en cada antena. Por tanto, este aumento de capacidad se obtiene sin la necesidad de utilizar un mayor ancho de banda o potencia transmitida, con el inconveniente de aumentar el hardware en transmisor y receptor al emplear más de una antena. Así pues, el demostrador realizado se presenta como plataforma eficiente para implementar esta técnica en UMTS, WLAN y 4G, con el uso de OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*).

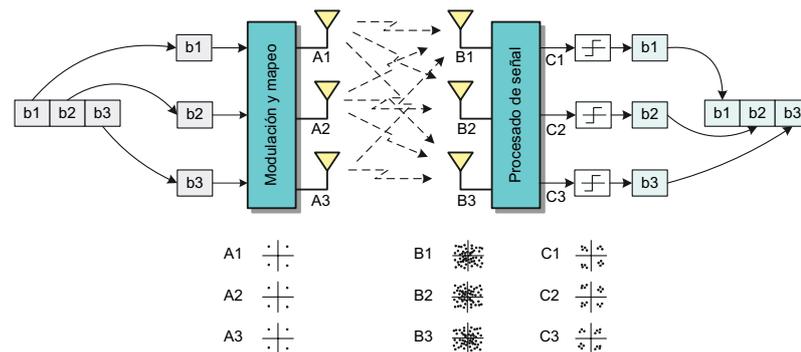


Figura 8: Sistema MIMO 3x3 con multiplexación espacial

Los sistemas MIMO, como el mostrado en este Proyecto, ofrecen mejores prestaciones en entornos muy dispersivos donde no hay visión directa, donde los canales de propagación son independientes. Las prestaciones logradas en un sistema MIMO depende principalmente de tres aspectos: las características de propagación del canal, los algoritmos MIMO usados en transmisión y recepción y, finalmente, la configuración del array de antena con sus características de radiación y polarización.

En la actualidad, numerosas investigaciones se llevan a cabo con respecto a estos sistemas. Así pues, existen varios estudios se centran en algoritmos espacio-temporales que ofrezcan altas prestaciones. En segundo lugar, se están realizando estudios de antenas útiles para MIMO en terminales de usuario para comunicaciones móviles. Además, distintas instituciones realizan medidas de canal con múltiples antenas para su modelado en entornos indoor.

Por otro lado, para evaluar el funcionamiento de los algoritmos de codificación en MIMO y los modelos de canal, se desean sistemas reales y prototipos. Varias implementaciones reales MIMO han sido desarrolladas y se pueden ver en la literatura [2]. Algunos de los sistemas MIMO implementados son *channel sounders*, usados para realizar medidas del canal, y no incluyen ningún algoritmo de codificación MIMO. Otros prototipos consideran algo de procesamiento de señal, pero son más específicos para un cierto algoritmo o esquema. En [2], el algoritmo MIMO lo define el usuario, pero el canal es simulado, lo cual no permite tener efectos reales. Atendiendo a las características del array de antena, la mayoría de los prototipos usan una configuración fija (espaciado en los elementos, polarización o diagrama de radiación) y las antenas empleadas son de tipo estándar en lugar de elementos especialmente diseñados para aplicaciones MIMO.

Recientemente, muchas de las actividades investigadoras se han centrado en aplicaciones para UMTS y WLAN. Un modo de implementación directa consiste en un procesamiento *offline* como modo de operación, lo cual permite implementar los algoritmos MIMO y el procesamiento en banda base en un entorno basado en PC. Varios prototipos MIMO han sido desarrollados por numerosas entidades como Virginia Polytechnic Institute, Georgia Tech o KTH. Muchas de ellas se centran en WLAN y basan su procesamiento en plataformas Software-Radio, pero no permiten flexibilidad al usuario a probar algoritmos o distintos arrays de antenas. Además, algunos sólo disponen de un ancho de banda estrecho (decenas de KHz), con lo que no pueden caracterizar un canal MIMO en banda ancha. Además, muchos poseen un array de antenas virtual como solución al subsistema de antena, es decir, una antena radia cada vez, pero se conmuta o varía la posición de las demás para obtener el conjunto. Esto es debido en gran parte a la limitación del procesamiento de señal o a la parte de RF. En otros, los posibles esquemas de codificación espacio-temporal son fijos ya que se programan en la plataforma SDR.

En base a todo lo anterior, el demostrador MIMO que se describe en este proyecto ofrece un número de características que lo hacen especialmente adecuado para propósitos de investigación en los nuevos sistemas de comunicaciones móviles avanzados. Como mejora de los prototipos existentes, el demostrador considera el uso de procesamiento de señal *offline* basado en un ordenador personal (PC) para la generación de señales en transmisión y proceso de demodulación en recepción. De este modo, y bajo una aplicación de fácil manejo, permite al usuario diseñar fácilmente e implementar sus propios algoritmos, sin la necesidad de gastar el tiempo en aspectos de implementación en tiempo real. Por otro lado, ofrece la ventaja de realizar medidas con diferentes esquemas MIMO, así como distintas configuraciones del array de antenas, ya que se han implementado las cadenas de RF correspondientes a cada una de las antenas, así como su procesamiento.

3. Resultados

En este apartado se muestran los resultados de las medidas llevadas a cabo por el sistema MIMO en diferentes entornos. Para ello, se envía una señal distinta por cada antena transmisora. Estas señales son códigos pseudoaleatorios (similares a los códigos cortos de aleatorización utilizados en UMTS) que, debido a sus buenas propiedades de correlación, facilitan la sincronización en el receptor y el cálculo posterior de la matriz \mathbf{H} del canal MIMO. Así pues, en la figura 9 se muestra el plano donde se han ubicado el transmisor y receptor para las distintas medidas. Por lo tanto, vamos a considerar dos tipos de entorno: visión directa entre ambos (LOS: *Line Of Sight*) y no visión directa (NLOS: *Non Line Of Sight*).

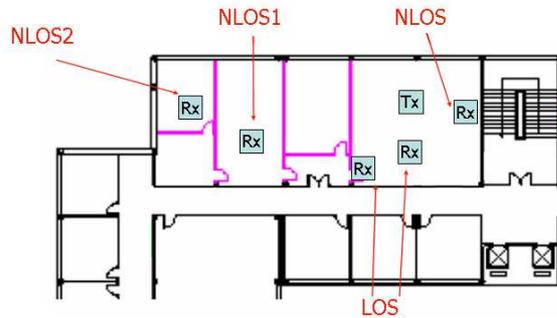


Figura 9: Situación del transmisor y receptor en las medidas

A continuación se presentan algunos de los elementos que componen la matriz \mathbf{H} del canal. Esos elementos $h_{ij}(\tau, t)$ representan la respuesta del canal correspondiente a la antena receptora i y la antena transmisora j en función del retardo y el tiempo. De este modo, se representa la respuesta del canal para un instante de t determinado muestra el perfil potencia-retardo del canal. Por el contrario, si elegimos un retardo constante ($\tau = 0$), obtenemos la respuesta del canal a lo largo del tiempo de medida. Concretamente, la figura 10(a) muestra el parámetro $h_{11}(\tau, t)$ de la matriz del canal para el caso de un entorno LOS en una situación estática. Por otro lado, la figura 10(b) representa el $h_{11}(\tau, t)$ para una situación de NLOS en movimiento. Ambas medidas se realizaron con una configuración MIMO 4×4 y con un espaciado de una longitud de onda entre las antenas.

En el primer caso, la respuesta del canal es plana a lo largo del tiempo. A diferencia de este caso, en la figura 10(b) se observa cómo el canal presenta un desvanecimiento bastante profundo.

Una vez obtenidos todos los elementos que constituyen la matriz \mathbf{H} del canal, se ha evaluado dicha matriz para el caso de $\tau = 0$. Por lo tanto, vamos a tener una matriz $H(t)$ de tamaño $4 \times 4 \times t$. Para realizar un estudio de los estadísticos de segundo orden de la capacidad, se ha calculado ésta mediante la expresión (1).

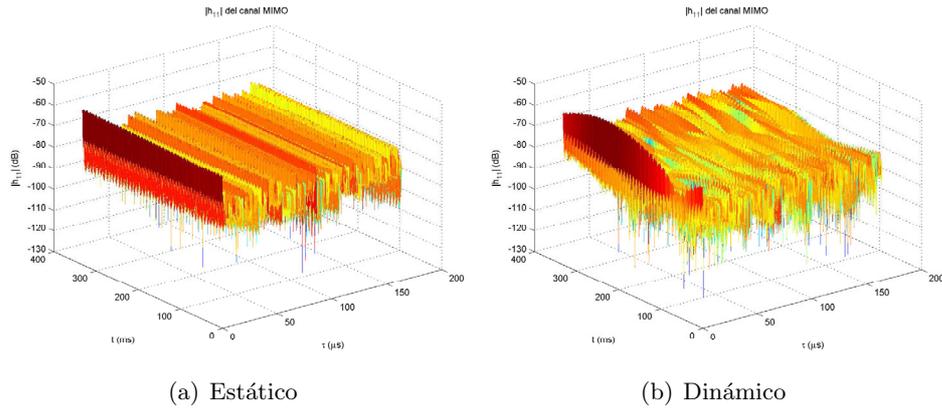


Figura 10: Medidas de canal MIMO

$$C = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{M_R} + \frac{\rho}{M_T} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right] \quad \text{bps/Hz} \quad (1)$$

Esta expresión es válida para el caso de no CSI (*Channel State Information*) en el transmisor. En este sentido se han obtenido las curvas de la CDF (*Cumulative Distribution Function*) que representan la distribución de probabilidad de la capacidad del canal MIMO que sea menor que un cierto valor.

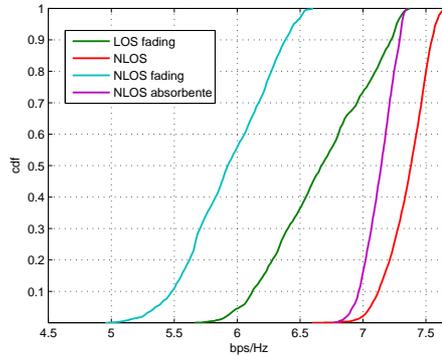


Figura 11: CDF de la capacidad en varias situaciones

Así pues, la figura 11 muestra la función de distribución acumulativa de la capacidad en función del entorno. Se observa que para el caso de desvanecimiento con dispersores (*fading*), la función de capacidad varía más lentamente, siendo mejor en el caso estático. Pero en realidad, el valor de la capacidad es el relativo, ya que no hemos normalizado la matriz del canal. Si normalizamos con respecto a la norma de Frobenius, obtenemos las capacidades reales en los canales MIMO bajo medida. De este modo, las figuras 12(a) y 12(b) representan la cdf de la capacidad normalizada en los diferentes entornos LOS y NLOS 1 y 2, es decir, en diferentes salas cada medida, y distintas separaciones entre elementos de antena, respectivamente. Como se observa, en una situación de NLOS, la

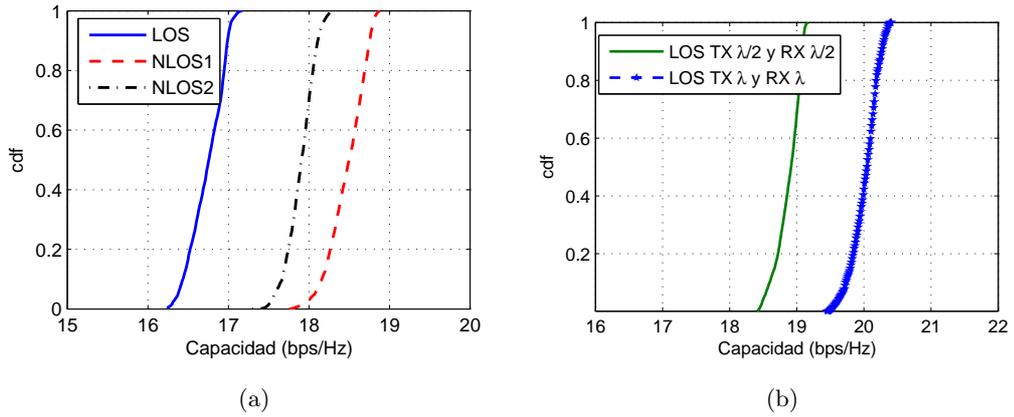
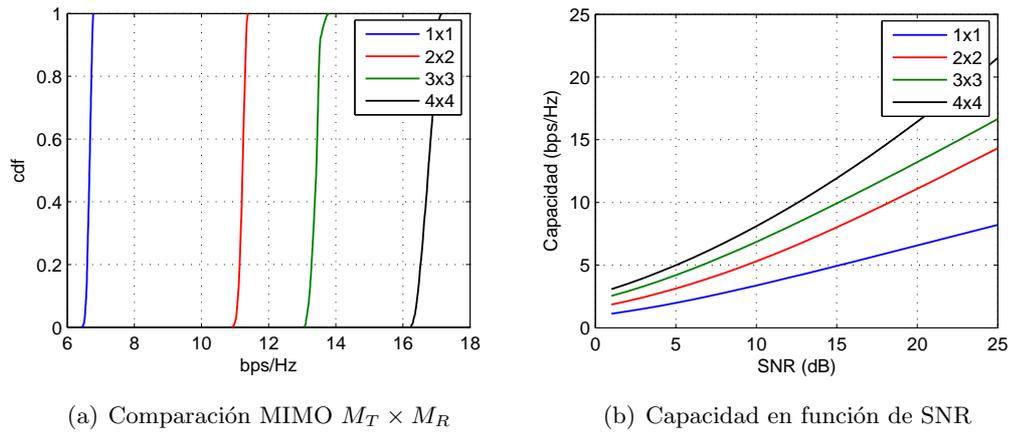


Figura 12: Función de distribución acumulativa de capacidad

capacidad aumenta debido a que los subcaminos creados en el canal están más incorrelados con respecto a un caso de LOS. Además, se muestra cómo a medida que aumentamos el espaciado entre elementos de antena, la capacidad aumenta debido a una menor correlación existente entre antenas. Por otro lado, para un caso concreto de LOS se han obtenido las



(a) Comparación MIMO $M_T \times M_R$

(b) Capacidad en función de SNR

Figura 13: Capacidades obtenidas

diferencias en el uso de diferentes números de antena en transmisión y recepción. Como se observa en la figura 13(a), al aumentar el número de antenas a cada lado del enlace radio se mejora la capacidad del sistema. Por lo tanto, se muestra la ventaja del uso de los sistemas MIMO para futuras redes inalámbricas. Además, la figura 13(b) representa la capacidad máxima obtenida de los distintos esquemas MIMO $M_T \times M_R$ en función de la relación señal a ruido (SNR) a transmitir.

4. Aplicabilidad

El presente Proyecto Fin de Carrera, como se ha comentado anteriormente, es una herramienta útil para comprobar distintas configuraciones de antena, algoritmos y esquemas MIMO en función del tipo de entorno y situación gracias a su arquitectura flexible y modular. Por ello, se presenta como una solución a la hora de realizar una planificación de red para cualquier operador teniendo en cuenta el uso de múltiples elementos en transmisión y recepción. Además, su uso permite obtener las características de antenas MIMO en dispositivos como terminales de usuario de UMTS/WLAN. En este sentido, los terminales móviles como teléfonos, PDAs, portátiles (figura 14), etc., se encuentran bajo estudio [3] ya que se están realizando pruebas con varias antenas para soportar MIMO y aumentar la velocidad de transmisión de datos.

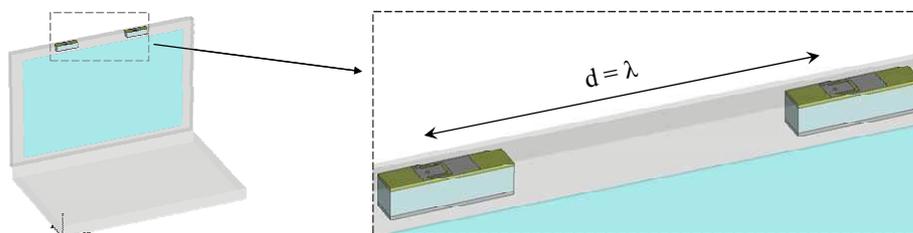


Figura 14: Antenas MIMO en un portátil

Una de las propuestas para aumentar la tasa binaria en UMTS fue la introducción de antenas inteligentes en estaciones base. Un paso más en este campo es la utilización de múltiples antenas tanto en el Nodo-B (o estación base) como en los terminales móviles de usuario.

En la actualidad existen numerosos grupos de investigación centrados en el estudio de este tipo de sistemas. Como muestra cabe destacar el interés en estandarizar las técnicas MIMO dentro de los sistemas de comunicaciones existentes, por ejemplo en UMTS [4]-[7], y también en sistemas WLAN. Para estos últimos es notable el esfuerzo realizado por el grupo de trabajo IEEE 802.11 *Task Group N* que, junto con varios grupos colaboradores, trabaja para definir el futuro estándar IEEE 802.11n [6], que incluirá el uso de MIMO en sistemas WLAN, y que pretende llegar hasta los 200 Mbps en la capa física.

Los sistemas donde resulta de interés utilizar el prototipo MIMO del presente proyecto son muy variados. Se han considerado interesantes típicamente para interiores, donde suele no haber visión directa entre la estación base y los usuarios, lo que permite obtener una menor correlación entre señales y aumentar la capacidad. En este sentido, las figuras 15 y 16 presentan los entornos y medidas con el demostrador MIMO realizado para interior y exterior/interior en la E.T.S.I. de Telecomunicación de la UPM, en la cuarta planta del edificio C y en la azotea del mismo, obteniendo los resultados de capacidad a lo largo de

los pasillos. Así, como se ha comentado anteriormente, actualmente se están intensificando



Figura 15: Medidas en la E.T.S.I. de Telecomunicación

los esfuerzos para estandarizar las técnicas MIMO en redes inalámbricas para interiores (por ejemplo, WLAN). En este sentido, se busca extender la norma 802.11 para que incluya MIMO con OFDM. Sin embargo, también ha surgido un gran interés para aplicar MIMO en WMAN (*Wireless Metropolitan Area Networks*), introduciendo técnicas MIMO como evolución de la norma 802.16 (estándar WiMax). Por otro lado, se han realizado trabajos para analizar y diseñar esquemas y algoritmos MIMO para UMTS, por lo que el demostrador propuesto se ha presentado como solución. En este sentido, el proyecto europeo IST METRA [8] estudia las configuraciones de procesamiento MIMO para UMTS [4] y su continuación IST I-METRA. El demostrador MIMO presentado demuestra las ventajas

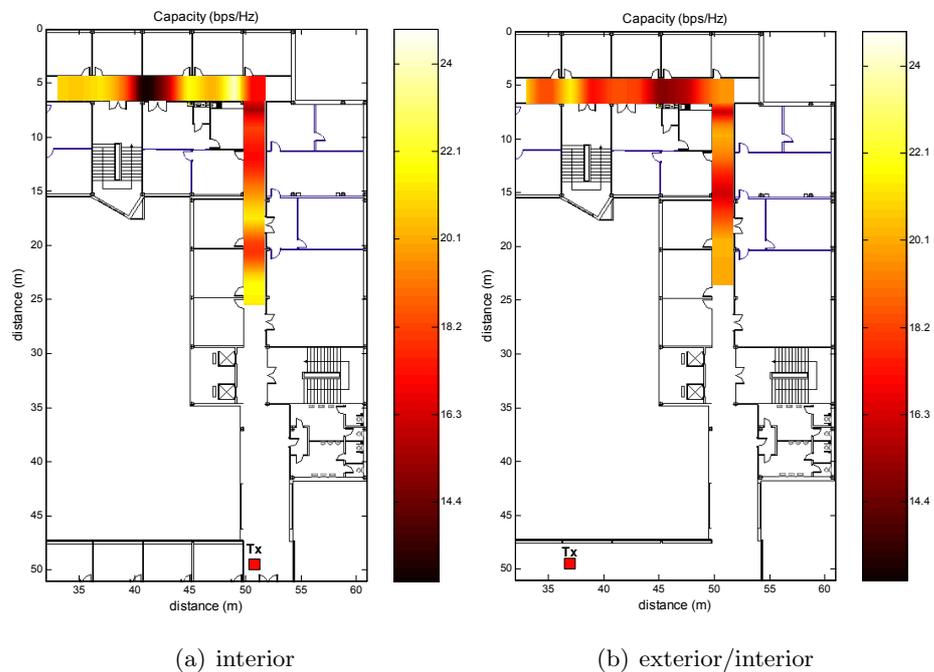


Figura 16: Capacidades obtenidas con el demostrador MIMO

de utilizar sistemas MIMO en diferentes entornos en comparación con sistemas de un solo elemento en transmisión y recepción (sistemas SISO: *Single Input Single Output*). Además del aumento de tasa binaria que se obtiene con el uso de este sistema en las comunicaciones

móviles, un importante aspecto a tener en cuenta es la potencia transmitida, tanto por la estación base como por el terminal de usuario. Debido a la diversidad espacial que ofrece el sistema MIMO, la potencia necesaria transmitida para una relación señal a ruido dada es menor que para el caso de un sistema SISO convencional. Esto es importante a la hora de reducir el nivel de potencia en el terminal de usuario y, por ende, disminuir el nivel de radiación al que está sometido.

Este proyecto abarca pues los fundamentos y tecnologías de la información en las comunicaciones inalámbricas, así como sus aplicaciones en comunicaciones inalámbricas, ya que se han tenido en cuenta todos los aspectos de un sistema de telecomunicaciones desde la compleja tarea de procesado en plataformas Software-Radio hasta el diseño y construcción de arrays de antenas, previo paso por la etapa de RF correspondiente.

Asimismo, este proyecto ha formado parte de una actividad de la red de excelencia de antenas europea ACE (*Antenna Center of Excellence*), del que son miembros diferentes universidades europeas e instituciones, como por ejemplo, Nokia Research Center, Sony Ericsson Mobile, Telefónica Móviles España, Siemens o Alcatel-Lucent Technologies Network Systems UK, entre otros. De este modo, el demostrador MIMO realizado ha supuesto un avance en la comunidad científica e investigadora europea como herramienta para medidas de canal, pruebas y medidas de configuraciones de array de antena y algoritmos de sistemas MIMO. En este sentido, diferentes organismos europeos tales como la universidad KTH de Suecia, así como la universidad NSCR de Grecia, han utilizado los planos de las antenas de este proyecto para su reproducción y posterior uso y medidas como antenas de referencia en los entornos que consideren.

Por otro lado, y para finalizar, en el Anexo se presentan las publicaciones originadas de este Proyecto Fin de Carrera, con mención especial al Premio al Mejor Student Paper en el AMTA Symposium 2005, celebrado en Newport (Rhode Island), EEUU.

A. Publicaciones originadas del Proyecto Fin de Carrera

A.1. Publicaciones internacionales

- Carlos Gómez-Calero, Laura García-García, Leandro de Haro-Ariet, *New test-bed for evaluation of antenna and system performance for MIMO systems*, European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006), Niza, Francia, noviembre 2006.

- Carlos Gómez-Calero, Laura García-García, Ramón Martínez, Leandro de Haro, *Comparison of Antenna Configurations in Different Scenarios Using a Wideband MIMO Test-bed*, 2006 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Albuquerque, EEUU, junio 2006.

- Carlos Gómez, Laura García, Leandro de Haro, *A Multi-Antenna Testbed for Research in Indoor Wireless Communications*, 8th International Symposium on DSP and Communication Systems, Noosa Heads, Australia, diciembre 2005.

- Carlos Gómez, Laura García, Leandro de Haro, Miguel Calvo, *A flexible demonstrator for evaluation of antenna configurations and algorithms testing in MIMO systems*, Antenna Measurement Techniques Association, Newport, Rhode Island, EEUU, octubre 2005.

- Laura García, Carlos Gómez, Leandro de Haro and Ramón Martínez, *Design and implementation of a MIMO testbed for wireless channel measurements and algorithms testing*, International ITG/IEEE Workshop on Smart Antennas 2005, abril 2005.

A.2. Publicaciones nacionales

- Carlos Gomez, Laura García, Ramón Martínez y Leandro de Haro, *Prototipo Multi-Antena para comunicaciones inalámbricas en sistemas WLAN y 4G*, XVI Jornadas Telecom I+D, Madrid, Noviembre 2006.

- Carlos Gómez, Laura García, Javier Simón y Leandro de Haro: *Efectos reales de implementación, medidas de canal y algoritmos espacio-temporales con un demostrador MIMO*, XXI Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, Oviedo 2006.

- Carlos Gómez, Laura García y Leandro de Haro, *Diseño e implementación de un demostrador MIMO para medidas de canal y pruebas de algoritmos*, XX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional Radio (URSI), Gandía, España, septiembre 2005.

A.3. Otros

- Premio al *Best Student Paper (1st place)* en el 2005 AMTA (*Antenna Measurement Techniques Association*) Symposium, con exposición incluida, por el paper: *A flexible demonstrator for evaluation of antenna configurations and algorithms testing in MIMO systems*, celebrado del 30 de octubre al 4 de noviembre de 2005 en Newport, Rhode Island, EEUU.

Referencias

- [1] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar and H. Bölcskei, *An overview of MIMO Communications. A key to Gigabit Wireless*, Proc. of the IEEE, vol. 92, No 2, Feb. 2004.
- [2] S. Caban et al., *Design and Verification of a Flexible and Scalable 4x4 MIMO Testbed*, IEEE Radio and Wireless Conference RAWCON 2004, Workshop on MIMO Implementation Aspects, Atlanta, GA, Sept. 2004.
- [3] D. Chizhik, J. Ling, P. W. Wolniansky, R. A. Valenzuela, N. Costa, and K. Huber, *Multiple-Input Multiple-Output Measurements and Modeling in Manhattan*, IEEE Journal On Selected Areas In Communications, vol. 21, No. 3, April 2003.
- [4] *Multiple Input Multiple Output (MIMO) antenna in UTRA*, TS 25.876, v1.8.0 (2005-12), Third Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification Group (TSG), RAN. Disponible en www.3gpp.org.
- [5] Third Generation Partnership Project (3GPP), *Spacial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations*, TS 25.996, v6.1.0 (2003-09), Technical Specification Group (TSG), RAN WG1.
- [6] Yang Xiao, *IEEE 802.11n: enhancements for higher throughput in wireless LANs*, IEEE Wireless Communications, vol. 12, no. 6, pp. 82 - 91, Dec. 2005.
- [7] E. Tiirola, J. Ylitalo, *Performance of a UMTS uplink MIMO scheme*, IEEE 58th Vehicular Tech. Conf., vol. 1, pp. 657-661, Oct. 2003.
- [8] J.R. Fonollosa et al., *The IST METRA project*, IEEE Comm. Magazine, vol. 40, no. 7, pp. 78-86, July 2002.