

ANÁLISIS DE RENDIMIENTO DE SISTEMAS MIMO-SDM OFDM

D. Morales-Jiménez, Juan J. Sánchez, G. Gómez, J. T. Entrambasaguas
morales@ic.uma.es, jjsanch@ic.uma.es, ggomez@ic.uma.es, jtem@ic.uma.es
Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Málaga.
Campus Universitario de Teatinos s/n E-29071 Málaga (ESPAÑA).

Abstract- Multiple Input Multiple Output (MIMO) techniques are currently a hot topic in the definition of next cellular standards. Concretely, Spatial Division Multiplexing (SDM) together with Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), allows a very high spectral efficiency over wireless environments. This paper analyses the performance of a MIMO-SDM OFDM system in terms of Bit Error Rate (BER) and spectral efficiency gain versus a Single Input Single Output (SISO) scenario. Special emphasis is given to the impact of antenna correlation on the aforementioned performance indicators.

I. INTRODUCCIÓN

La evolución actual de las comunicaciones móviles se encuentra en pleno proceso de estandarización. El 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) está actualmente trabajando en este proceso, que tiene como objetivo la definición de la tecnología LTE (*Long Term Evolution*). El estándar LTE [1] pretende definir una tecnología de acceso radio con una alta velocidad binaria, baja latencia y optimizada para el tráfico de paquetes de datos.

La transmisión *downlink* LTE está basada en OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), que permite alcanzar una gran eficiencia espectral en redes inalámbricas de banda ancha. La transmisión OFDM se sustenta en un uso eficiente del ancho de banda mediante la multiplexación de la información en distintas portadoras ortogonales entre sí [2]. Además, LTE considera el uso de modulación adaptativa AQAM (*Adaptive Quadrature Amplitude Modulation*) para maximizar la eficiencia de la transmisión manteniendo la BER (*Bit Error Rate*) por debajo de un valor objetivo. Esta técnica requiere que el transmisor conozca en todo momento el estado del canal (CSI, *Channel State Information*), de forma que se emplee el esquema de modulación apropiado en cada instante. El nivel de modulación es seleccionado dinámicamente para las distintas sub-bandas frecuenciales en que se divide el ancho de banda. Así, el régimen binario se adapta a las variaciones del canal de forma instantánea, lográndose maximizar el *throughput* a la vez que se mantiene la BER por debajo del umbral máximo aceptable por el usuario.

Las tecnologías de múltiples antenas constituyen un elemento indispensable en la definición del estándar LTE [1]. Los requerimientos en cuanto a cobertura y capacidad hacen necesaria la incorporación de nuevos esquemas de transmisión basados en MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). En concreto, la multiplexación por división espacial (SDM, *Spatial Division Multiplexing*) permite transmitir varios flujos de datos por las distintas antenas transmisoras,

produciéndose una considerable ganancia en la capacidad del sistema mientras se emplea el mismo ancho de banda.

La conjunción de las técnicas MIMO-SDM con la transmisión multiportadora OFDM [3] permite obtener altas velocidades binarias a la vez que un acceso múltiple muy eficiente en entornos inalámbricos. En este artículo se analizan las prestaciones de un sistema MIMO-SDM OFDM adaptativo, y se plantean las posibles limitaciones existentes. El estudio de estas limitaciones está centrado en el efecto que produce la correlación espacial entre antenas en los parámetros de rendimiento más significativos.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente forma. La sección II presenta el sistema analizado, detallándose las partes más significativas del mismo y haciéndose especial hincapié en el modelado de canal MIMO. El proceso de adaptación en la modulación particularizado para sistemas MIMO-SDM se aborda en la sección III. Los resultados obtenidos son analizados en la sección IV. Finalmente, en la sección V se exponen las conclusiones.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Se ha considerado un sistema OFDM dotado de dos antenas transmisoras y dos antenas receptoras (MIMO 2x2), en el que se realiza multiplexación espacial (SDM). Se transmiten de forma simultánea dos flujos de datos, de acuerdo a la arquitectura V-BLAST (*Vertical Bell Labs Layered Space-Time*) [4]. La arquitectura global del sistema analizado se muestra en la Fig. 1.

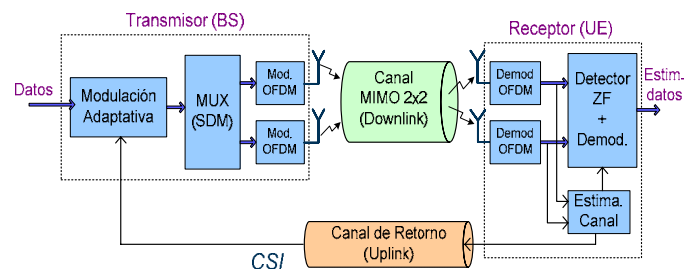


Fig. 1. Modelo de sistema MIMO-SDM OFDM

El sistema está compuesto por un transmisor OFDM, un canal MIMO 2x2 y un receptor de usuario. Además, se modela un canal de retorno por el que se transmite la información necesaria en el proceso de modulación adaptativa. El canal de retorno se asume ideal, es decir, no introduce errores ni retardo. De este modo, el transmisor conoce el CSI de forma instantánea.

A. Transmisor

Se ha considerado un transmisor OFDM en el que los datos para un único usuario son multiplexados en dos niveles. En primer lugar, se realiza multiplexación espacial de los datos, separando el flujo inicial en dos flujos de transmisión (uno por cada antena). Además, cada uno de estos flujos de datos es a su vez multiplexado en diferentes sub-bandas frecuenciales de acuerdo al esquema de transmisión OFDM.

La selección del esquema de modulación se realiza a partir de la Relación Señal a Ruido (SNR, *Signal to Noise Ratio*) [5], que se estima en el receptor en base a la información de estado del canal. Los posibles esquemas de modulación empleados son: QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*), 16-QAM y 64-QAM.

Se asume potencia constante en transmisión, con valor medio normalizado a la unidad para cada una de las antenas.

B. Modelo de canal MIMO 2x2

El modelo MIMO empleado consiste en un canal radio móvil con desvanecimientos (efecto multicamino) y ruido blanco y gaussiano que se añade a la señal recibida en cada una de las dos antenas. El modelo propuesto se muestra de forma esquemática en la Fig. 2.

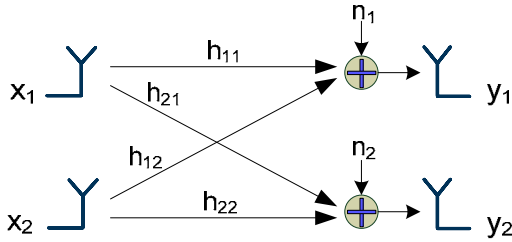


Fig. 2. Modelo de canal MIMO 2x2

La señal recibida en cada una de las dos antenas (y_1, y_2) puede expresarse de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde x_1 y x_2 representan los símbolos transmitidos por las antenas 1 y 2 respectivamente. Los elementos de la matriz $\mathbf{H}=\{h_{ij}\}$ corresponden a la respuesta del canal que une la antena transmisora j con la antena receptora i . De este modo, el estado del canal queda definido por la matriz \mathbf{H} de 2 filas y 2 columnas. Por último, la señal recibida por cada una de las dos antenas se ve afectada por ruido blanco, aditivo y gaussiano representado por n_i .

Cada uno de los cuatro caminos existentes entre las antenas (elementos de \mathbf{H}) se ha modelado como un canal radio móvil selectivo en frecuencia. Los elementos h_{ij} siguen una distribución de Rayleigh y su varianza es la unidad. Sin embargo, estos cuatro caminos no son totalmente independientes, sino que existe cierta correlación entre las señales por la proximidad espacial de las antenas. Este efecto ha de ser incluido a la hora de modelar la matriz del canal MIMO. Para ello, se generan cuatro canales independientes y la matriz resultante se multiplica por la matriz mezcladora de entrada (efecto de la correlación en transmisión), y por la matriz mezcladora de salida (efecto de la correlación en recepción).

Sean h^{11}, h^{12}, h^{21} , y h^{22} las repuestas de cuatro canales generados de forma independiente. La matriz del canal MIMO (\mathbf{H}), que incluye el efecto de la correlación entre antenas, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{H} = \sqrt{\begin{bmatrix} 1 & \rho \\ \rho^* & 1 \end{bmatrix}} \cdot \begin{bmatrix} h^{11} & h^{12} \\ h^{21} & h^{22} \end{bmatrix} \cdot \sqrt{\begin{bmatrix} 1 & \rho \\ \rho^* & 1 \end{bmatrix}} \quad (2)$$

donde ρ representa el coeficiente de correlación entre antenas y se asume igual para las antenas transmisoras y las receptoras.

Desarrollando la expresión (2), los elementos de la matriz \mathbf{H} pueden ser expresados como:

$$\begin{aligned} h_{11} &= h^{11} + \sqrt{\rho} \cdot h^{21} + \sqrt{\rho^*} \cdot h^{12} + |\rho| \cdot h^{22} \\ h_{12} &= h^{12} + \sqrt{\rho} \cdot h^{11} + \sqrt{\rho} \cdot h^{22} + |\rho| \cdot h^{21} \\ h_{21} &= h^{21} + \sqrt{\rho^*} \cdot h^{11} + \sqrt{\rho^*} \cdot h^{22} + |\rho| \cdot h^{12} \\ h_{22} &= h^{22} + \sqrt{\rho} \cdot h^{21} + \sqrt{\rho^*} \cdot h^{12} + |\rho| \cdot h^{11} \end{aligned} \quad (3)$$

Las respuestas de los canales generados de forma independiente h^{ij} están normalizadas y tienen varianza unidad. Es decir, se cumple que:

$$E[h^{ij} \cdot h^{ij*}] = E[|h^{ij}|^2] = 1 \quad (4)$$

Sin embargo, debido a la multiplicación por la matriz mezcladora de correlación, los elementos de \mathbf{H} tienen una varianza distinta de la unidad. A partir de (3), siendo h^{ij} independientes y asumiendo que el coeficiente de correlación es real, se llega a:

$$E[h_{ij} \cdot h_{ij}^*] = E[|h_{ij}|^2] = 1 + 2 \cdot \rho + \rho^2 \quad (5)$$

Es decir, al atravesar el canal MIMO, la señal de entrada se ve amplificada por un factor que depende del grado de correlación entre las antenas. Con el fin de fijar a la unidad la potencia media de señal recibida en cada antena, se ha realizado la siguiente normalización para la matriz \mathbf{H} :

$$\mathbf{H}' = \frac{\mathbf{H}}{\sqrt{2 \cdot (1 + 2\rho + \rho^2)}} \quad (6)$$

donde \mathbf{H}' es la matriz resultante del canal MIMO 2x2 que se ha empleado en este modelo.

C. Receptor: Detección Zero-Forcing

El receptor realiza la demodulación de la señal OFDM recibida en cada una de las dos antenas. Los símbolos OFDM recibidos contienen información superpuesta de las señales transmitidas por las dos antenas. Se realiza entonces la detección de los símbolos transmitidos, para lo que resulta necesario conocer la respuesta del canal. La estimación de canal se ha supuesto ideal, de forma que el receptor conoce en todo momento la matriz \mathbf{H} .

El proceso de recuperación de los símbolos transmitidos a partir de las señales recibidas está basado en un método de detección *Zero-Forcing* (ZF). La expresión (1) para la señal recibida en el sistema MIMO 2x2 puede ser expresada de forma abreviada como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (7)$$

La detección lineal ZF consiste en multiplicar el vector de la señal recibida \mathbf{y} por una matriz de filtrado que corresponde a la matriz inversa de \mathbf{H} . La salida del filtrado lineal es:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{y} = \mathbf{x} + \mathbf{H}^{-1}\mathbf{n} \quad (8)$$

De este modo se obtiene el vector de símbolos transmitidos \mathbf{x} , contaminado por una componente de ruido. El ruido aparece multiplicado por la matriz inversa \mathbf{H}^{-1} , lo cual puede producir una amplificación indeseada del mismo. Este efecto es tanto mayor cuanto peor condicionada esté la matriz \mathbf{H} , lo cual guarda una estrecha relación con la correlación entre antenas. Cuando existe un alto grado de correlación, la matriz del canal está mal condicionada y \mathbf{H}^{-1} tiende a infinito a medida que el coeficiente de correlación se aproxima a la unidad.

Una vez realizado el filtrado, es necesario decidir los símbolos que fueron transmitidos. El proceso de decisión consiste en seleccionar el elemento del alfabeto de símbolos transmitidos situado a distancia mínima.

III. MODULACIÓN ADAPTATIVA EN SISTEMAS MIMO-SDM

La idea de la modulación adaptativa consiste en modificar la velocidad binaria de transmisión en función de la Relación Señal a Ruido (SNR) que se obtiene para un flujo de datos. Se define SNR como el cociente entre las potencias de señal y ruido para el flujo de datos, una vez recuperado este último a partir de las señales recibidas. Es decir, la SNR se refiere en todo momento a los símbolos obtenidos tras el proceso de detección ZF. La estimación de la SNR depende por tanto del método de detección empleado.

El objetivo es maximizar la cantidad de información transmitida a la vez que se asegura un nivel mínimo de calidad en el enlace, manteniendo en todo momento la BER por debajo de un valor umbral.

El proceso de modulación adaptativa implementado para la transmisión MIMO-SDM consiste en adaptar los distintos flujos de datos de forma independiente, seleccionando la modulación apropiada para cada uno de ellos. La SNR se estima para cada flujo de datos recibido y, a partir de este valor, el transmisor decide la modulación a emplear.

Asumiendo el modelo MIMO 2x2 y el esquema de detección ZF que han sido descritos en los apartados anteriores, se pueden definir las expresiones para la SNR en cada uno de los flujos de datos recibidos. A partir de (8) es posible expresar los símbolos recuperados (correspondientes a cada uno de los flujos), de la siguiente forma:

$$\tilde{x}_1 = x_1 + \frac{1}{[h_{11} \cdot h_{22} - h_{12} \cdot h_{21}]} \cdot [h_{22} \cdot n_1 - h_{12} \cdot n_2] \quad (9)$$

$$\tilde{x}_2 = x_2 + \frac{1}{[h_{11} \cdot h_{22} - h_{12} \cdot h_{21}]} \cdot [h_{21} \cdot n_1 - h_{11} \cdot n_2] \quad (10)$$

donde x_1 y x_2 representan los símbolos transmitidos por las antenas 1 y 2 respectivamente. El segundo sumando que aparece en (9) y (10) corresponde a la contribución del ruido. Puede observarse que, debido al esquema de detección ZF,

aparecen de forma conjunta los términos de ruido introducidos por las dos antenas receptoras.

De este modo, la relación señal a ruido instantánea para el primer flujo de datos se obtiene de forma inmediata:

$$SNR_1 = \left(\frac{|h_{11} \cdot h_{22} - h_{12} \cdot h_{21}|^2}{|h_{22}|^2 + |h_{12}|^2} \right) \cdot \frac{\sigma_x^2}{\sigma_n^2} \quad (11)$$

Para llegar a (11) se ha asumido que las componentes de ruido n_1 y n_2 , correspondientes a cada antena receptora, son independientes. La potencia media de la señal transmitida se ha supuesto unitaria para ambos flujos de datos.

La expresión de la SNR para el segundo flujo se obtiene de forma análoga:

$$SNR_2 = \left(\frac{|h_{11} \cdot h_{22} - h_{12} \cdot h_{21}|^2}{|h_{21}|^2 + |h_{11}|^2} \right) \cdot \frac{\sigma_x^2}{\sigma_n^2} \quad (12)$$

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se muestran distintos resultados de simulación para el esquema de transmisión MIMO-SDM OFDM que ha sido presentado. Los resultados se centran en la eficiencia espectral alcanzada, en comparación con un esquema de transmisión SISO (*Single Input Single Output*). En el escenario SISO no existe multiplexación espacial, puesto que sólo se dispone de una antena por la que se transmite un único flujo de datos. Además, el efecto de la correlación entre antenas en la eficiencia espectral es analizado. Los parámetros más significativos de la simulación se muestran en la Tabla 1.

Parámetro	Valor
Longitud simulación	7.5 s
Número de usuarios (N_u)	1
Modulación	AQAM
Frecuencia de portadora (f_c)	1.8 GHz
Frecuencia de muestreo (f_s)	30.72 MHz
Canal (Perfil de potencia)	Típico Urbano
Velocidad (v)	6 Km/h
Tamaño FFT	2048
Portadoras de datos	1200
Método de detección	<i>Zero-Forcing</i>

Tabla 1. Parámetros de la simulación

La Fig. 3 muestra resultados de eficiencia espectral para los esquemas de transmisión SISO y MIMO-SDM 2x2 con independencia entre antenas ($\rho=0$). En trazo continuo se presentan de forma comparativa los resultados para SISO y MIMO 2x2, ambos para una BER objetivo de 10^{-2} . Se observa que la multiplexación espacial de los flujos (MIMO-SDM) consigue duplicar la eficiencia espectral con respecto a la transmisión SISO. Además se presentan resultados para otros valores de la BER objetivo (en trazo discontinuo), observándose que a medida que el objetivo es más restrictivo se obtiene una menor eficiencia.

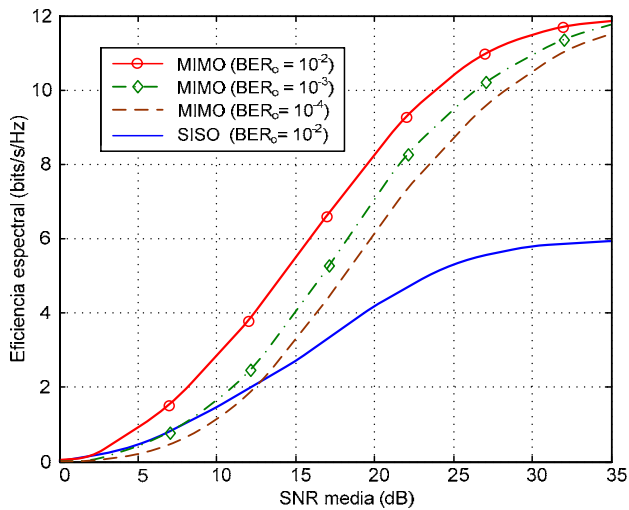


Fig. 3. Eficiencia espectral en función de la SNR media para los escenarios MIMO-SDM (2x2) y SISO

La Fig. 4 representa el efecto de la correlación espacial entre antenas (ρ) en la eficiencia espectral. El mejor de los casos corresponde a la independencia total entre caminos ($\rho=0$). A medida que la correlación entre antenas aumenta, la eficiencia espectral se hace sensiblemente menor. Puede observarse cómo para valores de ρ mayores que 0.3 la eficiencia incluso empeora con respecto a la transmisión SISO en condiciones de SNR < 25 dB.

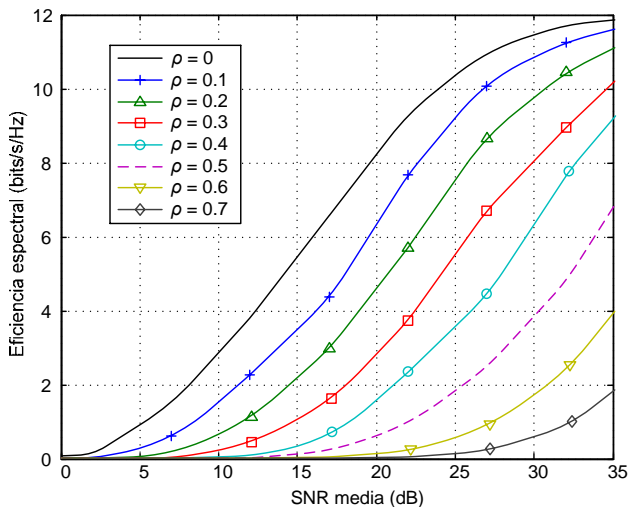


Fig. 4. Impacto de la correlación entre antenas en la eficiencia espectral

El procesado para la detección ZF hace que la SNR efectiva del flujo de datos sea más pequeña cuanto mayor es la correlación entre antenas (los caminos h_{ij} están más correlados). Esto mismo puede comprobarse de forma analítica en las expresiones (11) y (12), donde la semejanza entre los distintos caminos h_{ij} implica un decrecimiento en la SNR.

La Fig. 5 ilustra el efecto que la correlación entre antenas produce en el valor medio de la BER. Para el caso de independencia entre antenas, la BER se mantiene por debajo del valor objetivo (10^{-2}) en todo el margen de variación de la SNR. Esta condición deja de cumplirse en cuanto existe cierta correlación, y se observa cómo con valores de $\rho=0.4$ no es posible satisfacer la calidad de servicio requerida. La correlación máxima admisible se incrementa a medida que crece la SNR, siendo $\rho=0.6$ para una SNR media de 20 dB.

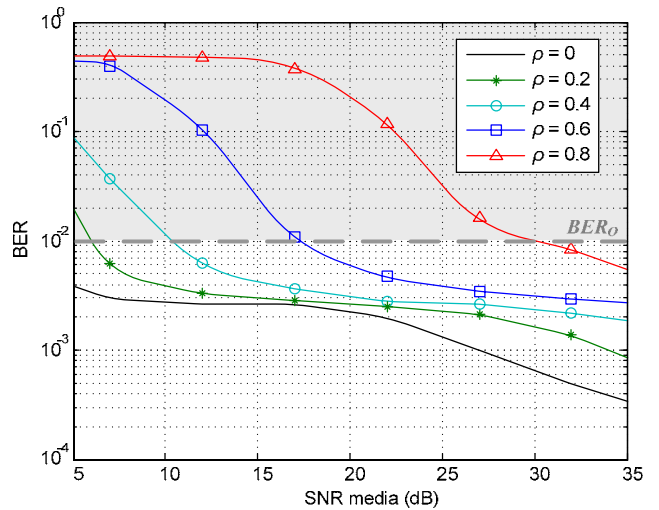


Fig. 5. Impacto de la correlación entre antenas en la BER

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un modelo de sistema MIMO-SDM OFDM en el que se multiplexan los datos de un usuario a través de dos antenas transmisoras. Se ha realizado un análisis de las prestaciones de este tipo de sistemas a través de simulaciones que se centran en la influencia de la correlación entre antenas sobre la eficiencia espectral y la tasa de error de bit.

La ganancia en cuanto a capacidad ha quedado patente, llegando casi a duplicarse la eficiencia espectral con respecto a la transmisión por una única antena (SISO). Sin embargo, la transmisión MIMO-SDM está fuertemente limitada por la correlación espacial entre antenas. Esta limitación se hace incluso más visible cuando se emplean técnicas de detección *Zero-Forcing*, donde ha de realizarse una inversión de la matriz del canal. A partir de un cierto grado de correlación ($\rho>0.2$), los resultados de simulación muestran una importante degradación en la eficiencia espectral y en la BER media debido a que los distintos canales dejan de ser independientes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el gobierno español y la Unión Europea en el marco del proyecto TIC2003-07819 (FEDER) y por la empresa AT4Wireless S.A.

REFERENCIAS

- [1] 3rd Generation Partnership Project. "TSG RAN; Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)", Release 7, Technical Specification 25.814, <http://www.3gpp.org>.
- [2] R. Nee, R. Prasad, *OFDM for wireless multimedia communications*, Artech House Publishers, Boston, 2000.
- [3] A. Zelst, R. Nee, and G.A. Awater, "Space division multiplexing (SDM) for OFDM systems", Proc. IEEE VTC 2000-Spring, pp.1070-1074, May 2000.
- [4] P. W. Wolniansky et al., "V-BLAST: An Architecture for Realizing Very High Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel", in Proc. ISSSE, Pisa, Italy, Sep 1998.
- [5] M.C. Aguayo-Torres, "Modulación multiportadora adaptativa para canales selectivos en frecuencia con desvanecimientos", Ph.D. Thesis, Universidad de Málaga, Sep 2001.