

# MODELADO DE CANALES MIMO 2x2 DE BANDA ANCHA EN INTERIORES

Oscar Fernández, Marta Domingo, Rafael P. Torres  
fernamos@unican.es, domingom@unican.es, torresrp@unican.es.  
Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria.  
Plaza de la Ciencia S/N, 39005 Santander, Cantabria, España

**Abstract-** A stochastic 2x2 MIMO wideband channel modelling method is presented. This channel model uses tapped delay lines (TDL) to model the subchannels and a single channel spatial correlation matrix to introduce the statistical dependence. This model represents a novel simplification with respect to other wideband MIMO models. The channel models obtained from this method are accurate and computationally efficient. Using this method channel models of indoor scenarios are obtained. The results show that the simulated channels provides channel capacity results similar to the measured ones.

## I. INTRODUCCIÓN

Dado el gran interés en los sistemas MIMO, motivado principalmente por el notable incremento que generan en la capacidad del canal [1-3], se están desarrollando sistemas de comunicaciones que implementan múltiples antenas en transmisión y recepción. Para el diseño de estos sistemas de comunicación es necesario definir modelos que describan correctamente el canal MIMO. Entre las características principales que deben tener estos modelos se destaca su grado de ajuste al canal real, la sencillez del modelo para facilitar su implementación su eficiencia computacional.

En banda ancha se han desarrollado varios modelos de canal MIMO basados en líneas de retardo. Distintos autores presentan diferentes métodos para modelar los taps. Oestges [4] y Pätzold [5] definen un modelo geométrico basado en la distribución de los scatterers en elipses de diferentes tamaños (modelo descrito por la distribución de los scatterers y las dimensiones de las elipses). Bolskei [6] describe un modelo basado en taps definido a partir de las características geométricas de diferentes clusters de scatterers. Pedersen [7] y Kai Yu [8] describen un modelo basado en taps ampliando el modelo estocástico de banda estrecha a banda ancha.

Estos modelos geométricos o estocásticos requieren un amplio número de parámetros que añaden complejidad al modelo. El método de modelado propuesto es una simplificación de los modelos estocásticos anteriores que requiere un menor número de parámetros para describir adecuadamente el canal. El modelado parte del presentado en [9] para canales SISO y se amplía, añadiendo poca complejidad, al modelado de canales MIMO.

Este método de modelado necesita una única matriz de correlación, permitiendo aprovechar modelos TDL SISO ya publicados para generar canales MIMO. Para ello solo es necesario obtener, a través del método más adecuado, dicha matriz de correlación. Este paper describe el método de modelado propuesto y comprueba su rendimiento a partir de

la extracción de modelos MIMO 2x2 de escenarios interiores típicos.

## II. ESCENARIOS Y SISTEMA DE MEDIDAS

### A. Escenarios

Con el objetivo de caracterizar y modelar modelos MIMO en escenarios interiores, se han llevado a cabo varias campañas de medidas en la banda frecuencial entorno a 2.5 GHz con un ancho de banda de 250 MHz.

Se han medido dos escenarios de diferente tipología. El primer escenario es un Hall de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (ETSIT) de la Universidad de Cantabria. El Hall representa un área abierta con pocos scatterers próximos al transmisor o receptor. El segundo escenario es una planta de oficinas y despachos de la ETSIT. Este escenario es un entorno más cerrado que el anterior, con muchos obstáculos próximos a los extremos del canal.

En ambos escenarios se han estudiado zonas con y sin línea de vista (LOS y NLOS).

### B. Sistema de medidas

Las campañas de medida del canal MIMO 2x2 de banda ancha se han realizado mediante un sistema basado en un generador de señal Agilent E4433B y un PNA Agilent E8362A. El sistema realiza un barrido frecuencial de 400 tonos en la banda de interés: 2.5 - 2.75 GHz. Transmisor y receptor se encuentran sincronizados mediante un oscilador local común.

El array transmisor está formado por antenas de tipo monopolo, con polarización vertical separadas  $1\lambda$ . Los elementos del array receptor son antenas bicónicas omnidireccionales con una ganancia típica de 0 dBi. La separación entre los centros de las antenas receptoras es de  $1.5\lambda$ . En cada área local se miden 32 realizaciones del canal MIMO 2x2.

Las medidas se realizaron en ausencia de personas para mantener la estacionariedad del canal.

## III. MODELADO DE CANAL

El modelado de los canales MIMO se describe a partir del modelo TDL de los subcanales SISO que conforman el canal conjugado con la relación estadística entre los taps: Matrices de correlación espacial.

### A. Modelado de Canal SISO

El modelo de canal SISO basado en líneas de retardo con un número de taps  $L$  se define mediante dos conjuntos de parámetros, la ganancia compleja del canal asociada a cada tap  $\{a_k\}$  y sus correspondientes retardos  $\{\tau_k\}$  con  $k=1, \dots, L$ . La ganancia compleja es una variable aleatoria compleja cuya amplitud sigue una distribución de Rice. Así, la amplitud de cada tap se puede modelar mediante su valor medio  $m_k=E[|a_k|]$ , siendo  $E[\cdot]$  el valor esperado, y el parámetro  $K_k$  de la distribución de Rice que sigue  $|a_k|$ .

La obtención de estos parámetros se realiza de manera empírica a través de las medidas de canal en banda ancha descritas en el apartado II. En cada área local se han medido 128 realizaciones de la respuesta del canal SISO. Cada una es procesada para reducir el sidelobe leakage, minimizar la influencia del ruido y normalizar todas las respuestas al impulso.

A partir de las realizaciones de la respuesta al impulso procesadas se genera el modelo TDL. Para cada respuesta al impulso se agrupan un conjunto de  $D$  componentes formando cada uno de los taps. Esta agrupación se puede interpretar como si cada tap representase la llegada de  $D$  componentes en el mismo instante. El valor del tap  $k$ -ésimo obtenido de la  $i$ -ésima respuesta al impulso  $h_i(\cdot)$  es:

$$\bar{h}_i(\tau_k) = \sum_{n=(k-1)D}^{kD-1} h_i(\tau_n) \quad (1)$$

Un buen compromiso entre simplicidad del modelo, fidelidad del mismo y ancho de banda de la respuesta frecuencial se obtiene considerando  $D=4$  ó  $5$ .

El modelo vendrá definido por la estadística de cada tap, la cual se obtiene a partir del conjunto de  $\bar{h}_i(\tau_k)$ , con  $k = 0, \dots, L$  e  $i = 1, \dots, M$ , siendo  $M$  el número de realizaciones del canal. El valor medio de la magnitud del tap  $k$ -ésimo se calcula según (2),

$$m_k = E_i \left[ \left| \bar{h}_i(\tau_k) \right| \right] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \bar{h}_i(\tau_k) \right| \quad (2)$$

mientras que el parámetro  $K_k$  de la distribución de Rice que sigue las variaciones en la amplitud del tap  $k$ -ésimo se extrae de (3).

$$\frac{E \left[ \left| \bar{h}_i(\tau_k) \right| \right]}{\sqrt{E \left[ \left| \bar{h}_i(\tau_k) \right|^2 \right]}} = e^{-\frac{K_k}{2}} \sqrt{\frac{\pi}{4(K_k+1)}} \left[ \left(1+K_k\right) I_0 \left( \frac{K_k}{2} \right) + K_k I_1 \left( \frac{K_k}{2} \right) \right] \quad (3)$$

Los retardos de cada tap se calculan según (4) asumiendo que los taps no se encuentran equiespaciados sino que se pondera el valor de cada retardo según el valor del perfil potencia retardo promedio,  $PDP_{prom}$ .

$$\tau_k = \frac{\sum_{n=(k-1)D}^{kD-1} \tau_n \cdot PDP_{prom}(\tau_n)}{\sum_{n=(k-1)D}^{kD-1} PDP_{prom}(\tau_n)} \quad (4)$$

Dado que la separación entre taps es mayor que el inverso del ancho de banda del canal medido, la respuesta frecuencial sufrirá una limitación en banda y el modelo tendrá un ancho de banda menor. Al agrupar 5 muestras en cada tap,  $D=5$ , la separación entre taps es de aproximadamente  $\Delta\tau=5/250\text{MHz}$  y por tanto el ancho de banda del modelo se limita a  $\Delta\tau^{-1} = 50 \text{ MHz}$ .

### B. Modelado de Canal MIMO

El modelado del canal MIMO parte del obtenido para canales SISO. Cada uno de los subcanales se genera utilizando el mismo modelo SISO e incorporando información adicional en forma de matrices de correlación que reflejan la dependencia existente entre los distintos subcanales. Los coeficientes de correlación que conforman las matrices de correlación, indican la dependencia estadística de los *taps* de cada subcanal, con los *taps* de los demás subcanales. Se asume que los canales son WSSUS y por tanto solo habrá correlación entre *taps* con el mismo retardo, mientras que *taps* con diferentes retardos (5) se suponen incorrelados.

$$\frac{E \left[ \left( h_{11}^k - \mu^k \right) \left( h_{21}^{k'} - \mu^{k'} \right)^* \right]}{\sqrt{\sigma_k^2 \sigma_{k'}^2}} = \begin{cases} \rho_{11}^{21,k} & \text{si } k = k' \\ 0 & \text{si } k \neq k' \end{cases} \quad (5)$$

En (5)  $h_{ij}^k$  representa la respuesta del canal para el tap  $k$ -ésimo, mientras que  $\mu_k$  y  $\sigma_k^2$  representan la media y la varianza de la distribución de dicho tap.

Un canal MIMO cuyos subcanales están modelados con  $N$  taps necesitan de  $N$  matrices de correlación. La matriz de correlación  $k$ -ésima,  $\mathbf{R}_k$ , describe la relación estadística entre los *taps*  $k$ -ésimos de los distintos subcanales. Cada uno de sus coeficientes se obtiene según (6) obteniendo para un canal MIMO  $2 \times 2$  la matriz presentada en (7). Aprovechando las propiedades de simetría de la correlación, la matriz de correlación de un canal MIMO  $2 \times 2$  se puede describir únicamente mediante seis coeficientes de correlación diferentes.

$$\rho_{h_{pq}}^{h_{mn}} = \rho_{pq}^{mn} = \langle h_{pq}, h_{mn} \rangle, \quad p, m \in [1, 2, 3, \dots, M_{Rx}] \text{ y } q, n \in [1, 2, 3, \dots, M_{Tx}] \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_k = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{11,k}^{21,k} & \rho_{11,k}^{12,k} & \rho_{11,k}^{22,k} \\ \rho_{11,k}^{21,k*} & 1 & \rho_{21,k}^{12,k} & \rho_{21,k}^{22,k} \\ \rho_{11,k}^{12,k*} & \rho_{21,k}^{12,k*} & 1 & \rho_{12,k}^{22,k} \\ \rho_{11,k}^{22,k*} & \rho_{21,k}^{22,k*} & \rho_{12,k}^{22,k*} & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Cuando los canales son de tipo Rayleigh, el tap  $k$ -ésimo del canal MIMO resultante se puede expresar como

$$\text{vec}(\mathbf{H}_k) = v_k \cdot \text{vec}(\mathbf{I}_2) + \sigma_k \cdot \mathbf{R}_k^{1/2} \cdot \text{vec} \left( \begin{pmatrix} a_1 + j a_2 & a_3 + j a_4 \\ a_5 + j a_6 & a_7 + j a_8 \end{pmatrix} \right) \quad (8)$$

donde  $v_k$  representa la amplitud de la componente determinista y  $\sigma_k^2$  representa la varianza de la amplitud del tap  $k$ -ésimo, siendo  $K_k = v_k^2 / (2\sigma_k^2)$ ,  $a_i$  son realizaciones independientes de variables aleatorias gaussianas de media cero y varianza unidad,  $\mathbf{I}_2$  es la matriz unitaria de orden  $2 \times 2$ ,

$\mathbf{R}_k^{1/2}$  se obtiene a partir de la descomposición de Cholesky de la matriz de correlación  $\mathbf{R}$ , tal que  $\mathbf{R}_k = \mathbf{R}_k^{1/2} \cdot (\mathbf{R}_k^{1/2})^H$  y la función  $\text{vec}(\mathbf{H})$  agrupa las columnas de  $\mathbf{H}$  en un único vector columna.

La correlación especial entre los distintos taps induce un cierto nivel de correlación entre los tonos en el dominio frecuencial. El coeficiente de correlación  $r$  entre los subcanales  $H_{mn}(f_t)$  y  $H_{pq}(f_t)$  se obtiene para cada todo según (9).

$$r_{H_{mn}}^{H_{pq}}(f) = \frac{\sum_{k=1}^L \rho_{mn,k}^{pq,k} \sigma_k^2}{\sum_{k=1}^L \sigma_k^2} \quad (9)$$

Cada coeficiente de correlación  $r_{H_{mn}}^{H_{pq}}$  es proporcional al valor promedio de los correspondientes coeficientes de correlación,  $\rho_{mn,k}^{pq,k}$ , ponderado por la varianza de la amplitud de los taps (proporcional a la potencia de los taps). Esto implica que el modelado de canal solo necesita que la correlación se aplique a los taps con la mayor potencia, generalmente el primer tap, dado que es éste el que aporta la contribución más significativa.

La respuesta de los canales generados con el modelo descrito y una única matriz de correlación se ajusta fielmente al comportamiento de los canales reales medidos, validando de esta manera la simplificación realizada en el método presentado.

#### IV. RESULTADOS

##### A. Modelos de canal MIMO

Una vez descrito el método de modelado, éste se valida en los escenarios interiores indicados en el apartado II. Los modelos de canal MIMO 2x2 se describen por medio del correspondiente modelo SISO TDL (tabla I) y su matriz de correlación (tabla II).

La tabla II presenta las matrices de correlación obtenidas en cada área de cada escenario. Los valores de los coeficientes de correlación son elevados dado que el primer tap presenta una estadística de tipo Rice (Tabla I), es decir, hay una componente dominante que aumenta el grado de correlación.

##### B. Resultados de los modelos de canal

Utilizando los canales MIMO, es posible reproducir el comportamiento del canal en escenarios con condiciones similares a los estudiados. Para demostrar la fiabilidad de los modelos, el comportamiento de los canales MIMO simulados se compara con el correspondiente comportamiento de los canales medidos.

TABLA I. MODELOS DE CANAL TDL PARA DIFERENTES ÁREAS EN AMBOS TIPOS DE ESCENARIO.

		Tap	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LOS	Hall	K Rice	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Mean (dB)	0	-12	-13	-20	-22	-24	-26	-26	-30	-28
		Delay (ns)	4	31	47	68	87	107	127	149	166	187
	Oficinas	K Rice	2	0	0	0	0	0	0	-	-	-
		Mean (dB)	0	-13	-22	-27	-33	-29	-29	-	-	-
		Delay (ns)	4	26	46	66	87	124	144	-	-	-
NLOS	Hall	K Rice	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Mean (dB)	0	-10	-14	-18	-20	-20	-22	-24	-23	-22
		Delay (ns)	5	27	48	67	87	108	127	148	169	189
	Oficinas	K Rice	4	0	0	0	0	-	-	-	-	-
		Mean (dB)	0	-10	-12	-16	-22	-	-	-	-	-
		Delay (ns)	5	27	48	66	87	-	-	-	-	-

TABLA II. MATRICES DE CORRELACIÓN (MÓDULO) DE LOS MODELOS MIMO PARA DIFERENTES ESCENARIOS Y ÁREAS

		Hall				Oficinas			
LOS		1	0.93	0.92	0.93	1	0.85	0.87	0.83
		0.93	1	0.90	0.92	0.85	1	0.79	0.84
		0.92	0.90	1	0.94	0.87	0.79	1	0.90
		0.93	0.92	0.94	1	0.83	0.84	0.90	1
NLOS		1	0.73	0.80	0.77	1	0.77	0.78	0.74
		0.73	1	0.73	0.77	0.77	1	0.79	0.78
		0.80	0.73	1	0.79	0.78	0.79	1	0.75
		0.77	0.77	0.79	1	0.74	0.78	0.75	1

Este comportamiento se estudia a través de la eficiencia espectral máxima, comparando la función de probabilidad acumulada (CDF) de la capacidad de los canales modelados con la de los canales medidos.

Las figuras 1 y 2 muestran la CDF de la capacidad en zonas LOS y NLOS en ambos escenarios interiores. Estas figuras incluyen como referencia la capacidad de dos canales de banda ancha de tipo Rayleigh teóricos, uno de tipo flat fading y otro totalmente selectivo en frecuencia. Estas dos referencias corresponden a canales con desvanecimiento Rayleigh incorrelado en el dominio espacial y un distinto grado de correlación en el dominio frecuencial: uno totalmente correlado (flat fading) y otro totalmente incorrelado (frequency selective fading).

Los canales medidos y simulados sufren el efecto de la correlación especial y frecuencial de manera conjunta e inseparable, mostrando una capacidad inferior a la de los canales de referencia. Cabe señalar que, para una relación señal a ruido constante, al pasar de LOS a NLOS las curvas de capacidad se acercan a las teóricas. La comparación de las curvas de capacidad también muestra que el método de modelado propuesto aporta una notable mejora con respecto a los modelos de canal teóricos que no consideran la correlación espacial.

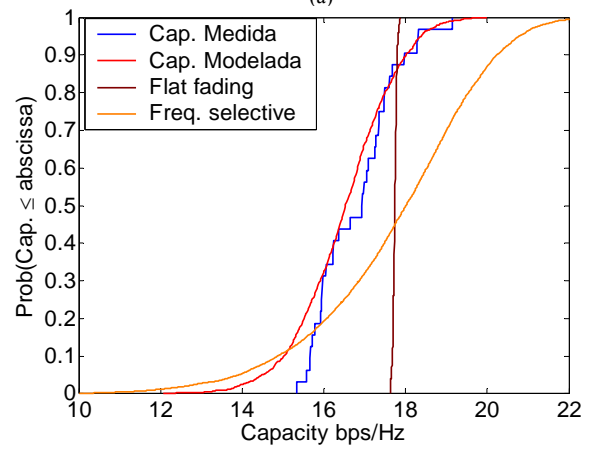
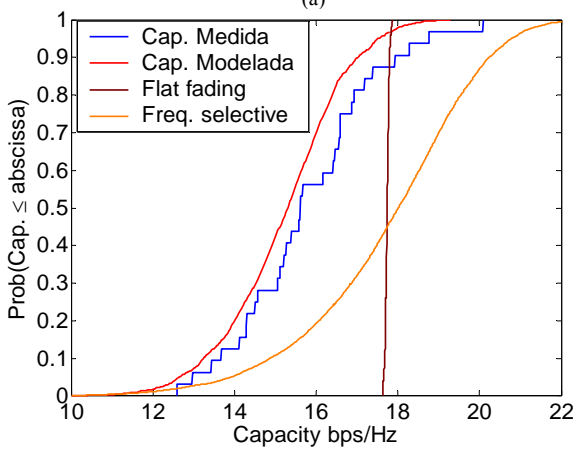
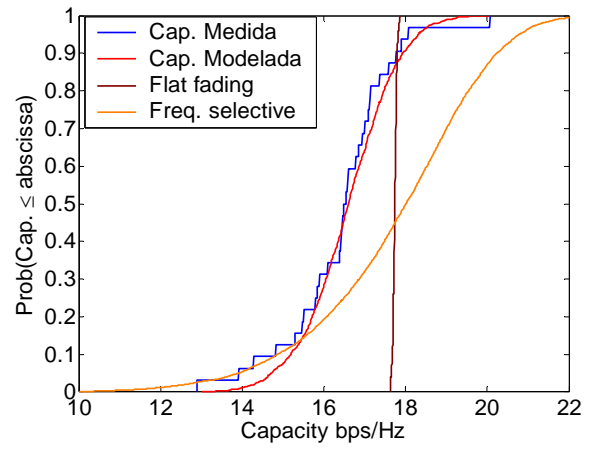
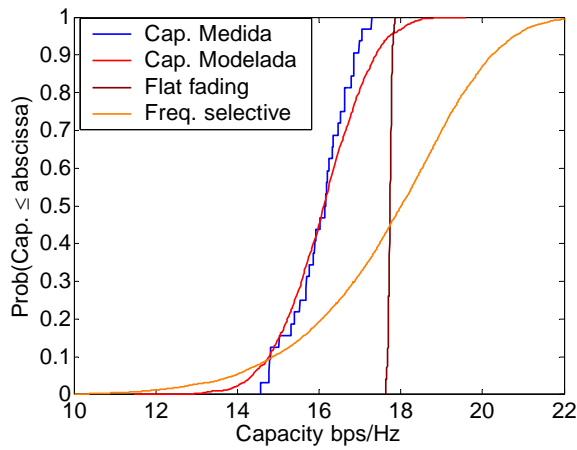


Fig. 1. CDF de la capacidad del canal MIMO con SNR=30dB medida y modelada en áreas LOS (a) área abierta - hall (b) área cerrada - oficinas

Fig. 2. CDF de la capacidad del canal MIMO con SNR=30dB medida y modelada en áreas NLOS (a) área abierta - hall (b) área cerrada - oficinas

## V. CONCLUSIONES

EL modelado de canales de comunicación es un aspecto clave en la implementación y configuración de distintas etapas del sistema de comunicación: modulación, codificación o ecualización y para la valoración del rendimiento del sistema final: capacidad o tasa de error en bit BER. Este paper presenta un método de modelado de canales MIMO validado en escenarios interiores.

El método de modelado propuesto requiere un reducido número de parámetros (número de taps, amplitud relativa y estadística de los taps) es computacionalmente eficiente y reproduce adecuadamente el comportamiento de los canales reales. Estas prestaciones hacen que el modelo sea adecuado para su aplicación.

El método de modelado de canales MIMO combina un modelo de canal SISO TDL con una matriz de correlación. Esta matriz de correlación espacial aporta la relación estadística entre los taps de los distintos subcanales. Este modelo necesita una única matriz de correlación, aplicada al primer tap, para reflejar la dependencia entre subcanales. Los resultados obtenidos muestran que la capacidad de los canales MIMO simulados se ajusta correctamente a la de los canales medidos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto TEC2008-02730/TEC)

## REFERENCIAS

- [1] J. Winters, "On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 5, pp. 871-878, June 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, pp. 311-335, March 1998.
- [3] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," AT&T Bell Laboratories, BL0 112 170-950 615-07TM, 1995.
- [4] C. Oestges, V. Erceg and A. J. Paulraj, "A physical scattering model for MIMO macrocellular broadband wireless channels," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 25, No. 5, pp. 721-729, June 2003.
- [5] M. Pätzold and B. O. Hogstad, "A wideband MIMO channel model derived from the geometric elliptical scattering model," Proc. 3rd International Symposium on Wireless Communication System, ISWCS'06, Valencia, Spain, pp. 138-143, September 2006.
- [6] H. Bolcskei, D. Gesbert, and A. J. Paulraj, "On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems," IEEE Transactions on Communications, vol. 50, pp. 225-234, February 2002.
- [7] K. I. Pedersen, J. B. Andersen, J. P. Kermaol and P. Mogensen, "A stochastic multiple input multiple-output radio channel model for evaluation of space-time coding algorithms," Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference, Fall 2000, Vol. 2, pp. 893-897.
- [8] K. Yu, M. Bengtsson, B. Ottersten, D. McNamara, P. Karlsson and M. Beach, "A wideband model for NLOS INDOOR MIMO channels," IEEE Vehicular Technology Conference VTC 2002, pp. 370-374.
- [9] Mohr, W., "Modeling of wideband mobile radio channels based on propagation measurements," Sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC'95. "Wireless: Merging onto the Information Superhighway", vol. 2, pp. 397-401, 27-29 Sep 1995