

Aspectos Fundamentales de los Sistemas MIMO

J. M. Molina García Pardo, R. Ibernón Fernández, J. V. Rodríguez Rodríguez y L. Juan Llácer

Grupo de investigación SiCoMo

Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Universidad Politécnica de Cartagena
Campus Muralla de Mar. Edificio Antiguo Hospital de Marina

30202 Cartagena

Teléfono: 968 325954 Fax: 968 325973

E-mail: josemaria.molina@upct.es, ruben.ibernon@upct.es, jvictor.rodriguez@upct.es, leandro.juan@upct.es

Resumen. Este artículo realiza una introducción a los sistemas MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). Estos sistemas son capaces de aumentar la eficiencia espectral utilizando múltiples antenas tanto en transmisión como en recepción. El aumento de la capacidad viene determinado por el tipo de entorno de propagación, por lo tanto es importante realizar medidas experimentales del canal con el fin de observar en que entornos es propicio el uso de dichos sistemas. Por último, se muestra el sistema de medidas desarrollado por el grupo de investigación SiCoMo, así como parte de los resultados de una campaña de medidas realizada en un túnel peatonal dentro del Campus Muralla de Mar de la UPCT.

1 Introducción

El incremento de la demanda de espectro radioeléctrico ha motivado el estudio de nuevas técnicas que aumenten eficientemente el uso del mismo. Los sistemas tradicionales están formados por una antena transmisora y otra receptora (sistemas *Single-Input Single-Output*, SISO). En algunos casos, esta configuración se modifica aumentando el número de antenas transmisoras o receptoras para dotar al sistema de diversidad en transmisión o en recepción respectivamente, pero no para aumentar la velocidad de transmisión de datos (capacidad) ya en la interfaz radio del sistema. Sin embargo, el objetivo principal de los sistemas MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), sí es utilizar múltiples antenas en transmisión y en recepción, para garantizar un aumento de capacidad, si el entorno de propagación ofrece una rica dispersión de la señal [1].

Los trabajos de Foschini [1] y Telatar [2] demuestran que, aumentando el número de antenas a ambos lados del canal, aumenta sustancialmente el número de bits transmitidos por hercio (capacidad), cosa impensable en sistemas SISO. Este aumento de la capacidad espectral está asociado a una riqueza de dispersión en el entorno, la cual permite la transmisión de información por caminos independientes. Para un sistema con M antenas transmisoras, y N antenas receptoras, ese incremento de capacidad puede llegar a ser del orden del mínimo entre N y M .

2 Canales MIMO

En general, los sistemas MIMO están formados por un array de M antenas transmisoras y otro array de N antenas receptoras. La señal recibida se puede expresar de la siguiente forma:

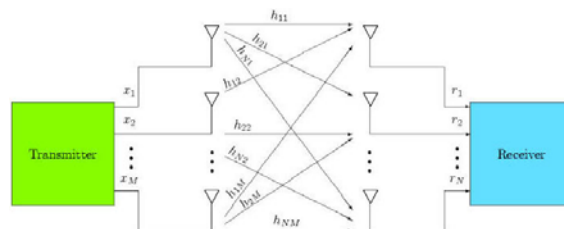


Fig 1. Representación genérica de un canal MIMO $N \times M$

$$\mathbf{r} = \mathbf{G}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (1)$$

donde \mathbf{r} es un vector de N señales recibidas, \mathbf{s} es un vector de M señales transmitidas, \mathbf{G} es una matriz de $N \times M$ funciones de transferencia y \mathbf{n} es un vector de ruido formado por N elementos.

De esta manera, el canal se convierte en una matriz de funciones de transferencia formada por $N \times M$ elementos. Cada elemento $G(n,m)$ de \mathbf{G} indica cómo se propaga la señal desde el elemento radiante m hasta el n .

En el caso de que el sistema sea de banda estrecha (ancho de banda de transmisión mucho menor que el ancho de banda del canal), la capacidad máxima teórica, cuando la potencia que se transmite por cada una de las antenas es la misma, se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$C_{MIMO} = \log_2(\mathbf{I}_N + \frac{\rho}{M} \mathbf{H}\mathbf{H}^*) \text{ bits/s/Hz} \quad (2)$$

Donde $()^*$ es el operador transpuesto conjugado, \mathbf{I}_N es la matriz identidad de N elementos, ρ es la relación señal a ruido y \mathbf{H} es la matriz transferencia normalizada a partir de la matriz \mathbf{G} , de dimensiones $N \times M$. La normalización se suele realizar por medio

de la norma de Frobenius, definida de la siguiente manera:

$$E\left[\|\mathbf{H}\|_F^2\right] = NM \quad (3)$$

En el caso de que se trate de un sistema de banda ancha, se debe calcular la capacidad en cada una de las frecuencias y realizar una media, tal y como se puede observar en la siguiente expresión:

$$C = \frac{1}{B} \int_{f_1}^{f_2} \log_2 \left(\det \left(\mathbf{I}_N + \frac{\rho}{M} \mathbf{H}(f) \mathbf{H}^H(f) \right) \right) \text{ bit/s/Hz} \quad (4)$$

donde B es el ancho de banda analizado, f_1 y f_2 son las frecuencias inicial y final respectivamente.

Otra forma de calcular la capacidad de un sistema MIMO es la utilización de la descomposición en valores singulares de la matriz \mathbf{H} para simplificar el sistema en m subcanales independientes, donde m es el mínimo de M y N , a los que se aplicará la capacidad de Shannon. La potencia de estos subcanales es dada por los valores propios de la matriz $\mathbf{H}^* \mathbf{H}$ (λ_i). De esta manera se puede calcular la capacidad de la siguiente forma:

$$C = \sum_{i=1}^m \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N} \lambda_i \right) \text{ bit/s/Hz} \quad (5)$$

2 Ganancia de Array, de diversidad y de multiplexado

La **ganancia de array** es un aumento de la relación señal a ruido ρ en el receptor debido a un procesamiento de la señal en el transmisor o en el receptor. Este procesamiento consiste en combinar varias señales. Para obtener esta ganancia, bien el transmisor o el receptor deben conocer el canal, y dado que es más sencillo que el receptor conozca la respuesta del canal, la ganancia de array se suele implementar en el receptor.

La **diversidad** consiste en obtener réplicas de la misma señal transmitida que se hayan propagado por canales cuyos desvanecimientos sean independientes. Esto garantiza en cierta medida que aunque una de ellas se desvanezca fuertemente, alguna de las otras posea el nivel suficientemente alto como para poder recuperar la señal. La diversidad puede hacerse en frecuencia, tiempo, espacio, polarización, etc. Se suele preferir la diversidad espacial ya que no repercute en la eficiencia espectral de un sistema.

La **ganancia por multiplexado** espacial es el incremento lineal que se produce en un sistema MIMO cuando aumenta el número de antenas sin coste extra alguno de potencia o ancho de banda [Fos96]. Esta ganancia se consigue mediante la transmisión de flujos de datos independientes en cada uno de los autovalores significativos de la matriz de transferencia.

3 Capacidad Ergódica y Outage

La capacidad, según Shannon, para un usuario en un canal invariante en el tiempo, es la máxima información mutua entre transmisor y receptor. También la podemos definir como la máxima tasa de transferencia de información que se puede transmitir por el canal con una probabilidad de error arbitrariamente baja.

Cuando el canal es variante y aleatorio, la capacidad se vuelve una variable aleatoria. Se utilizan generalmente dos criterios para la medida de la misma: la capacidad media o ergódica (*Ergodic capacity*) y capacidad Outage (*Outage Capacity*). La capacidad ergódica es la máxima transferencia de información mutua promediada entre todos los estados del canal.

La *Outage Capacity* viene expresada por un %, que indica el porcentaje de tiempo en el cual la capacidad del sistema es superior a ese valor.

4 Técnicas MIMO

Se han desarrollado diversas técnicas que aprovechan la diversidad espacial de los canales MIMO. Estas técnicas se dividen en dos grupos: *Space-Time Coding* y *Spatial Multiplexing*. La primera aprovecha la diversidad espacial para disminuir la probabilidad de error, manteniendo el régimen binario. La segunda aumenta la capacidad del canal para una relación señal a ruido ρ dada mediante la múltiplexación espacial de la información a transmitir.

En las técnicas *Space-Time Coding*, las señales que se entregan a las antenas son tratadas como vectores de símbolos que representan un cierto código. El objetivo de estas técnicas es diseñar un código óptimo para que la señal sea demodulada de una forma eficiente en el receptor, y se pueda recuperar la señal con una ρ más baja.

El principio básico de la técnica *Spatial Multiplexing* es transmitir la información de forma independiente en cada antena. A la técnica original se le llamó BLAST, aunque ahora se la conoce como Diagonal D-BLAST y Vertical V-BLAST [3]. En estas técnicas el receptor recupera la señal y la combina mediante procesamiento. La información se transmite por cada antena independientemente, y se reconstruye en el receptor para formar el código transmitido.

5 Sondador Canal MIMO SiCoMo

El grupo de investigación SiCoMo ha desarrollado un sistema de medidas basado en un analizador de redes vectorial multipuerto, configurando uno de sus puertos como transmisor y cuatro de ellos como receptores [4]. El puerto transmisor está conectado a un amplificador de bajo ruido, a cuya salida se conecta un conversor RF (radiofrecuencia)/óptico,

posteriormente a un carrete de fibra (de hasta 500m), luego a un conversor óptico/RF, y finalmente a un conmutador de estado sólido con el fin de realizar el cambio entre las cuatro antenas transmisoras. Los puertos receptores están conectados directamente a las cuatro antenas receptoras. Con esta configuración se consigue que el nivel de ruido esté por debajo de -100dB con respecto a la potencia entregada a las antenas, suficiente para la mayor parte de aplicaciones.

El proceso de medidas está totalmente automatizado por medio de un ordenador portátil desde el que controla tanto el analizador de redes como el conmutador de estado sólido. La comunicación con el analizador se realiza mediante una red LAN/WLAN y con el conmutador por medio de GPIB.

6 Ejemplo de Medidas en el pequeño túnel del Campus Muralla

Es este apartado se han incluido resultados de una campaña de medidas realizada en el pequeño túnel peatonal que une el campus Muralla del Mar de la UPCT con la cuesta del Batel. En la figura 2 se observa una foto de este entorno.



Fig 2. Entorno de medidas

Las medidas se han tomado en 15 posiciones del receptor, separadas un metro en un recorrido lineal en el interior del túnel. El transmisor se ha situado a 20 metros de la entrada del túnel y siempre en visión directa con el receptor. El sistema está formado por un array lineal de cuatro antenas en transmisión y cuatro antenas en recepción. Se ha medido el canal para el caso de tres separaciones distintas en longitudes de onda entre elementos radiantes ($\lambda/2$, λ y 2λ). El análisis ha sido realizado en la banda de frecuencias que va desde 2.4 GHz a 2.5 GHz.

En la figura 3 observamos la capacidad medida para 10dB de relación señal a ruido ρ . Podemos observar la importancia que tiene en estos sistemas la configuración de los elementos radiantes, y sobre todo la separación de los mismos. Para obtener eficiencias espectrales elevadas, la correlación entre los distintos elementos debe ser suficientemente baja.

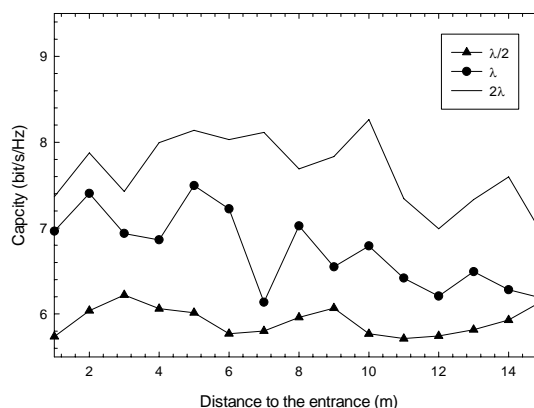


Fig 3. Capacidad medida en el recorrido

7 Conclusiones

En este artículo hemos presentado los sistemas MIMO, los cuales son capaces de aumentar considerablemente la eficiencia espectral respecto a los sistemas convencionales. Se ha hecho un recorrido sobre los aspectos fundamentales de estos sistemas. Además, se han presentado unas medidas realizadas en un entorno real en las que se aprecia que la capacidad puede llegar hasta los 8 bits/s/Hz para una ρ de 10 dB en un entorno donde los sistemas convencionales sólo habrían llegado a 3,45 bits/s/Hz.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a la Dirección General de Investigación (Consejería de Educación y Cultura de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia) por su financiación de este trabajo a través del proyecto con referencia 2I05SU0031), y a las empresa TECNICA y 102NOVADOC.

Referencias

- [1] G. J. Foschini and J Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas", *Bell Labs Technical Journal*, vol. 1, no. 2, Lucent Technologies, pp 41-59, Autumn 1996.
- [2] Telatar, I. E, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels" *AT&T Bell Labs internal report*, June 1995.
- [3] Wolniansky, P.W.; Foschini, G.J.; Golden, G.D.; Valenzuela, R.A., "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel", *Signals, Systems, and Electronics, ISSSE 98*, 29 Sep-2 Oct 1998.
- [4] J.-M. Molina-Garcia-Pardo, J.-V. Rodriguez and Leandro Juan-Llacer, "MIMO Channel Sounder Based on Two Network Analyzers", submitted to *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.