

SISTEMA MIMO EMPLEANDO ANTENAS ADAPTATIVAS

Yamelka Herrera Hernández¹, Francisco Marante Rizo²

1Departamento de Física. Facultad de Eléctrica. CUJAE, 2Departamento de Telecomunicaciones. Facultad de Eléctrica

e-mail: 1 yamelkah@electronica.cujae.edu.cu, 2 marante@electronica.cujae.edu.cu

RESUMEN

La utilización de múltiples antenas tanto en transmisión como en recepción sobre un enlace radio conlleva un aumento de la capacidad teórica del canal Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) resultante. Este hecho abre el camino hacia la obtención de altas eficiencias espectrales sobre el canal radio constituyendo, por tanto, una vía muy prometedora para satisfacer los altos requerimientos de tasa de transferencia de información de la futura Cuarta Generación (4G) de sistemas de comunicaciones móviles. En este trabajo se presentan distintas técnicas encaminadas a un uso efectivo de los canales MIMO, explotando la nueva dimensión espacial asociada a los mismos. Es importante resaltar que el coste de esta dimensión es además mucho menor que el del ancho de banda y/o tiempo. Primeramente se exponen los resultados obtenidos por distintas técnicas MIMO en un entorno de propagación real.

El análisis del canal MIMO se ha realizado a partir de diversas campañas de medidas realizadas en distintos escenarios interiores. Se han estudiado canales MIMO 2x2 a partir de dos aspectos fundamentales: la correlación espacial y la capacidad del canal. El primer aspecto, la correlación espacial, indica el grado de independencia estadística existente entre los subcanales generados entre cada antena transmisora y receptora. Ésta degrada el rendimiento del canal al reducir la diversidad espacial y la capacidad.

PALABRAS CLAVES: Multiple Input Multiple Output, Channel State Information

ABSTRACT

The use of multiple antennas as much in transmission as in reception on a link radio bears an increase of the theoretical capacity of the channel Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) resultant. This fact makes headway toward the obtaining of ghastly high efficiencies on the channel radio constituting, therefore, a very promising road to satisfy the high requirements of rate of transfer of information of the future Fourth Generation (4G) of systems of mobile communications. In this work they show up different techniques guided to an effective use of the channels MIMO, exploiting the space new dimension associated to the same ones. It is important to stand out that the cost of this dimension is also much smaller that that of the band width and/or time. Firstly, the results are exposed obtained by different techniques MIMO in an environment of real propagation.

The analysis of the channel MIMO has been carried out starting from diverse campaigns of measures carried out in interior different scenarios. Channels MIMO 2x2 have been studied starting from two fundamental aspects: the space correlation and the capacity of the channel. The first aspect, the space correlation, indicates the grade of statistical existent independence among the sub-channel generated between each antenna transmit and receive. This degrades the yield from the channel when reducing the space diversity and the capacity.

KEY WORDS: MIMO/Múltiple Input Múltiple Output CSI/Channel State Information

INTRODUCCIÓN

Ha pasado más de un siglo desde que hubo que realizarse la primera transmisión vía radio, y a lo largo de este tiempo las comunicaciones inalámbricas han sufrido una notable evolución. Todas las mejoras introducidas tienen un denominador común, el afán de transmitir mayor cantidad de información, lo más lejos, en el menor tiempo y/o con la mejor calidad posible.

La era de la información y las comunicaciones multimedia actual demanda altas velocidades de transmisión y mayor calidad de las comunicaciones. En este sentido, se han realizado grandes avances en el campo de la modulación, la codificación y el procesado de señal para maximizar la eficiencia espectral. Sin embargo, esta eficiencia espectral está acotada superiormente por la capacidad de Shannon (eficiencia espectral máxima). Este factor unido al hecho de que el espectro radio es un recurso limitado con anchos de banda asignados finitos y reducidos supone un límite a la velocidad máxima de transmisión, obtenida como el producto del ancho de banda por la capacidad de Shannon. Aparte de esta limitación, el canal radio es un medio hostil que degrada la calidad de las comunicaciones. Para mantener la calidad de la Comunicación es necesario reducir bien la tasa de transmisión o aplicar técnicas de codificación y corrección de errores que reducen la velocidad neta de transmisión.

El uso de múltiples antenas en transmisión y recepción se presenta como una de las tecnologías más prometedoras para obtener mejoras notables en la eficiencia espectral y poder satisfacer la demanda de alta velocidad de transmisión de datos sin necesidad de aumentar el ancho de banda disponible ni la potencia transmitida. Winters [1], Foschini [2] y Telatar [3] propusieron las bases de los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO/Múltiple Input Múltiple Output). Estos sistemas explotan no solo la diversidad espacial en recepción mediante los sistemas clásicos, sino también la diversidad completa en transmisión. Este aspecto representa el avance más importante con respecto a los esquemas previos de diversidad en transmisión [4], [5]. A través de la codificación espacio-temporal o mediante el multiplexado de flujos de información por diferentes antenas es posible obtener diversidad espacial en transmisión completa que mejora la calidad del enlace o crear diferentes canales paralelos que aumentan la eficiencia espectral global.

Aunque los sistemas MIMO aportan innegables ventajas, también añaden una mayor complejidad en las etapas transmisoras y receptoras así como una gran dependencia de las características del canal radio.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS MIMO

Un sistema MIMO tiene n_t antenas transmisoras y n_r antenas receptoras a diferencia de los sistemas SISO, sistema $n_t \times n_r$, se generan $n_t n_r$ subcanales entre el arreglo de antenas transmisoras y el arreglo de antenas receptoras. Existe un canal entre cada antena transmisora y cada antena receptora lo que obliga a representar la propagación mediante una matriz, conocida como matriz de transmisión o matriz H , que vendrá dada por (1):

$$\mathbf{H}(t) = \begin{pmatrix} h_{11}(t) & h_{12}(t) & \dots & h_{1M}(t) \\ h_{21}(t) & h_{22}(t) & \dots & h_{2M}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N1}(t) & h_{N2}(t) & \dots & h_{NM}(t) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Cada uno de los elementos $h_{ij}(t)$ representa el canal generado entre la antena transmisora j , con $j=1,\dots,n_t$ y la antena receptora i , con $i=1,\dots,n_r$. El canal MIMO se representa en la figura 1 pueden verse las n_t antenas transmisoras y las n_r antenas receptoras y como se generan $n_t n_r$ subcanales.

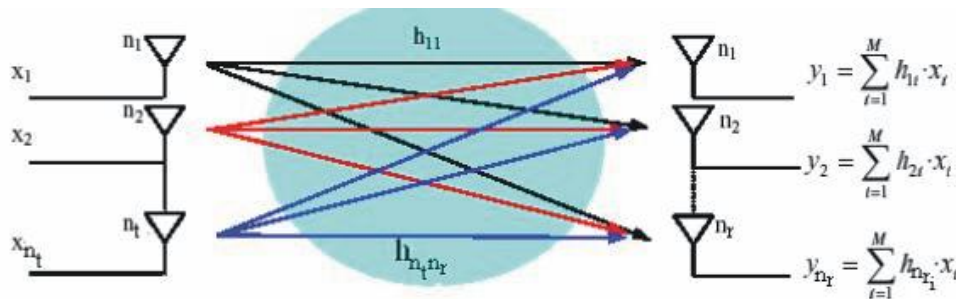


Figura 1: Esquema de un canal MIMO $n_t \times n_r$

La señal recibida por el arreglo receptor en un canal MIMO $n_t \times n_r$ se puede expresar como (2):

donde: \mathbf{v} es un vector columna $n_r \times 1$ cuyos elementos son ruido blanco gaussiano de media cero y varianza unidad.
 \mathbf{s} es el vector transmitido
 \mathbf{H} es una matriz $n_t \times n_r$ que representa la función transferencia del canal desde cada una de las antenas transmisoras hasta cada una de las antenas receptoras.

De esta manera se tiene un modelo sencillo, con matrices de números complejos. Cada término de la matriz representa un camino de señal distinto afectado por las antenas de transmisión/ recepción y la propagación.

MÉTODOS DE TRANSMISIÓN

Las altas velocidades de transmisión de los sistemas MIMO [6,7] dependen de diversas estrategias o métodos que mejoran o bien, los esquemas de transmisión o mejoran la fiabilidad del enlace. La primera, la multiplexación espacial, utiliza múltiples antenas para generar subcanales paralelos por los que se transmiten flujos de información independientes. La mejora obtenida a partir de estos sistemas se denomina ganancia por multiplexación espacial. La segunda estrategia mejora las características del canal minimizando la probabilidad de error y mejorando la relación señal a ruido lo que permite el uso de velocidades de transmisión más altas a través de esquemas de codificación superiores, aumentar el alcance o reducir la potencia transmitida. Entre estos sistemas se destaca la codificación espacio temporal que introduce ganancia por diversidad o la combinación de la señal en transmisión y/o en recepción que aporta ganancia de arreglo.

Ganancia por multiplexación espacial.

El objetivo del multiplexado espacial, a diferencia de la codificación espacio-temporal, es maximizar la tasa de transmisión, es decir, la eficiencia espectral. Transmite flujos de información independientes por cada antena, ocupando todos ellos el mismo ancho de banda y el mismo slot temporal. Gracias a la no correlación entre canales producida por el multicamino y al conocimiento del canal en el receptor es posible separar los distintos flujos de información. Así en un sistema $n_t \times n_r$, n_t símbolos independientes se transmiten simultáneamente en un período de símbolo, luego la tasa del código para una longitud de trama unitaria es n_t . Para este tipo de transmisiones es obligatoria una configuración de antenas adaptativas

La multiplexación espacial consiste en la transmisión de flujos de información independientes por las diferentes antenas de manera simultánea. Matemáticamente el número de subcanales equivalentes K viene dado por el número de valores singulares distintos de cero de la matriz de canal H , es decir, el rango de la matriz H , el cual está acotado al número de transmisores o de receptores (3).

$$(K = \text{rank}(H) \leq \min\{n_t, n_r\}) \quad (3)$$

La magnitud de los valores singulares elevada al cuadrado (valor propio de HH^H) representa la ganancia en potencia de cada uno de los subcanales. El multiplexado de la información en K canales consigue, en teoría, aumentar la velocidad global de transmisión de datos en un factor K sin mayores requerimientos de potencia ni ancho de banda, consiguiendo una eficiencia espectral próxima a la capacidad del canal y sin necesidad de conocer el estado del canal (CSI/Channel State Information) en el transmisor. En condiciones de dispersión, que generalmente implica correlación baja, gracias a la no correlación entre canales producida por el multicamino y al conocimiento del canal en el receptor es posible separar los distintos flujos de información. Así en un sistema $n_t \times n_r$, n_t símbolos independientes se transmiten simultáneamente en un período de símbolo, luego la tasa del código para una longitud de trama unitaria es n_t . Para este tipo de transmisiones es obligatoria una configuración de antenas adaptativas.

Por ejemplo si es utilizada la multiplexación espacial [8] entonces la transmisión se obtiene por la demultiplexación a la llegada de una cadena de datos $s(n)$ en dos cadenas de datos, $s_p(n)$ y $s_i(n)$. Esto puede hacerse dirigiendo todos los símbolos índices par en $s_p(n)$ y los impares hacia la cadena $s_i(n)$. Entonces el vector transmitido es creado como (4):

$$c(n) = \sqrt{\frac{P_T}{2}} \begin{bmatrix} s_p(n) \\ s_i(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde: P_T es la potencia total transmitida. Las dos cadenas de datos se transmiten por antenas separadas y la señal se recibe por otras dos antenas separadas.

Las técnicas B son las más utilizadas en la multiplexación espacial. La técnica D-BLAST (Diagonal-BLAST) permite el aprovechamiento de la diversidad espacial proporcionada por el canal y la aplicación de un

algoritmo de detección de los símbolos basado en la cancelación sucesiva de los flujos de datos ya detectados.

Ganancia por diversidad.

La ganancia por diversidad en el sistema MIMO representa la mejora en la SNR, promediada en el tiempo, con respecto a la SNR del mejor canal SISO. La idea de ganancia por diversidad está unida al concepto de fiabilidad, el cual se analiza mejor desde el análisis de la probabilidad de "outage" del canal (probabilidad de que la SNR se encuentre por debajo de un cierto nivel umbral que haga que el sistema no esté disponible), indicando así la calidad del rendimiento del canal garantizada con un cierto nivel de probabilidad [9]. Por tanto la definición de ganancia por diversidad está condicionada por el valor mínimo de referencia de la SNR. Por ejemplo, en la figura 2 se muestra la función de densidad de probabilidad acumulada (CDF) de la SNR en un sistema SIMO. Se observa que la ganancia por diversidad para una probabilidad "outage" de 1% es superior a la probabilidad de "outage" 5%.

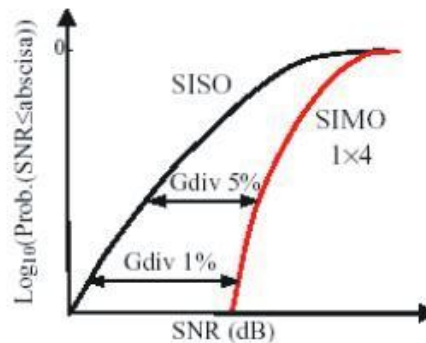


Figura 2: Ejemplo de ganancia por diversidad en recepción [9,10].

Según Weichelsberger [10] la ganancia por diversidad es una mejora en la probabilidad de "outage" del canal. Esta mejora afecta a la capacidad del canal, aumentando la capacidad mínima, garantizando un cierto porcentaje amplio de tiempo o reduciendo la probabilidad de que la capacidad se encuentre por debajo de un cierto valor umbral. A este valor se le conoce como capacidad de indisponibilidad o de "outage". Esta ganancia por diversidad no afecta a la capacidad media dado que ésta representa un promedio de las capacidades a lo largo del tiempo.

De manera intuitiva, la ganancia por diversidad se corresponde con el número de caminos independientes que recorre un símbolo, es decir, el número de subcanales que se pueden promediar para detectar el símbolo. Por tanto la ganancia por diversidad está limitada al grado de diversidad espacial ofrecido por el canal. En condiciones ideales, el orden de diversidad de un sistema MIMO $n_t \times n_r$ es de $n_t n_r$, luego $d_{\max} = n_t n_r$.

Obtener ganancia de diversidad en el transmisor, sin conocer el canal en el mismo, es posible codificando las señales transmitidas de una manera adecuada. Esta técnica se conoce como Codificación Espacio Temporal (STC), Alamouti [11], Tarokh [12].

Ganancia de arreglo o ganancia por beamforming.

La ganancia de arreglo se obtiene a través del procesado de las señales en el transmisor y en el receptor. Combinando coherentemente la señal en el transmisor o en el receptor se consigue un aumento de la

relación señal a ruido media recibida. Dado que se pesa la señal transmitida/recibida por cada antena, en ocasiones la ganancia de arreglo también se conoce como ganancia por conformación de haz (beamforming). Para realizar la combinación es necesario conocer el estado instantáneo del canal (CSI) en el extremo correspondiente.

Transmitir beamforming es, por definición, la transmisión estratégica de la matriz de covarianza R_{cc} de los datos seleccionados transmitidos a priori para así tener un rango. Esto puede ser logrado formando (5):

$$c(n) = w_T s(n) \quad (5)$$

Donde: w_T es $n_t \times 1$ es el vector del beamforming transmitido o simplemente el vector de peso y $s(n)$ es el símbolo transmitido.

Es posible implementar la formación del haz por hardware usando cambios de fase y atenuadores [8]. También es posible la implementación usando una red fija de formación de haz (consistente en componentes pasivos) y también conmutando los haces fijos. El vector de peso es una constante durante la transmisión en bloque de los símbolos N durante el tiempo donde el canal H es invariante en el tiempo y luego es re calculado en cada uno de los bloques.

La matriz covarianza es (6):

asumimos que

que es la potencia total transmitida.

La recepción del beamforming está definida como una combinación lineal de n_r señales recibidas en un instante de tiempo n , usando $n_r \times 1$ vector normalizado del beamforming recibido, que es $|w_R|=1$. Un sistema MIMO con beamforming en el aparato receptor y el transmisor tiene una la relación entrada-salida igual a (7):

$$s(n) = w_R^* y(n) = w_R^* H w_T s(n) + w_R^* v(n) \quad (7)$$

Donde $v(n)$ es el ruido del receptor más la interferencia. La señal de interferencia recibida más el ruido (SINR) para un sistema (7) es (8):

$$SINR = \frac{E \left\{ \left| w_R^* H w_T s(n) \right|^2 \right\}}{E \left\{ \left| w_R^* v(n) \right|^2 \right\}} = \frac{w_R^* H w_T w_T^* H^* w_R}{w_R^* R_v w_R} \quad (8)$$

Donde es la matriz covarianza de la interferencia más el ruido. Maximizando (1.16) con respecto a w_T , primero se selecciona el vector de peso transmitido w_T como el vector principal e_1 , H y se obtiene (9):

$$SINR = P_T \frac{w_R^* e_1 e_1^* w_R \lambda_{\max}}{w_R^* R_{ww} w_R} \quad (9)$$

donde λ_{\max} es el valor propio principal de HH^* .

Estos tres métodos presentados, diversidad espacial, multiplexación espacial y ganancia de arreglo, no se pueden aplicar simultáneamente. Si se persigue una ganancia por diversidad alta se sacrifica parte de la ganancia por multiplexado y viceversa, siendo posible una solución de compromiso entre la ganancia por diversidad y la ganancia por multiplexado [6, 13].

CAPACIDAD DE CANAL

La capacidad de un canal es un concepto fundamental que caracteriza la máxima tasa de información que se puede transmitir con fiabilidad (es decir, con probabilidad de error arbitrariamente pequeña). El teorema sobre la capacidad de un canal obtenido por Shannon en 1948 es el éxito más importante y famoso de la teoría de la información desde la aparición de éste resultado, con el cual se definieron los fundamentos básicos de la teoría de la información.

La expresión de la capacidad de un canal MIMO ofrece una visión muy interesante sobre los beneficios en términos de velocidad, que ofrece el empleo de diversidad en uno o ambos extremos del canal transmitido. Para simplificar la presentación y con el fin de establecer una base de comparación se supondrá que el transmisor emplee una potencia uniformemente distribuida, es decir se supondrá que la matriz de covarianza del transmisor, ya normalizada a la energía transmitida iguala la matriz unidad dividida por el número de antenas transmisoras.

Asumimos que el canal es conocido por el receptor, podamos calcular la capacidad como (10):

$$C = \max_{R_{zz} \text{Tr}[R_{zz}] = n_t} \log_2 \det \left(I_{n_r} + \frac{P_T}{n_t \sigma_n^2} H R_{zz} H^* \right) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (10)$$

donde: I_{n_r} es la matriz idéntica de dimensión N , $(.)^*$ denota la operación Transpuesto Complejo Conjugado.

y se define como la matriz covarianza de la señal transmitida , además

es la potencia máxima transmitida y se define la relación señal a ruido

(SNR) como

Es interesante destacar ahora que la capacidad depende tan solo de la matriz covarianza de la señal transmitida, del ruido y de la matriz del canal. También es importante normalizar la participación de estas tres señales en la capacidad.

La capacidad máxima (sin CSI disponible en el transmisor) es lograda por códigos aleatorios independientes y de simetría circular distribuida de Gauss [14]. Entonces la Capacidad es (11):

Utilizando la descomposición en valores singulares (SVD/Singular value decomposition) de $HH^* = Q\Lambda Q^*$ [15], podemos expresar la ecuación anterior como (12) :

$$C = \log_2 \det \left(I_{n_r} + \frac{P_T}{n_t \sigma_n^2} Q \Lambda Q^* \right) \quad (12)$$

Utilizando la identidad para matrices y , la ecuación (10) se simplifica a (13):

$$C = \log_2 \det \left(I_{n_r} + \frac{P_T}{n_t \sigma_n^2} \Lambda \right) \quad (13)$$

que es lo mismo (14):

$$C = \sum_{i=1}^m \log_2 \left(1 + \frac{P_T}{n_t \sigma_n^2} \lambda_i \right) \quad (14)$$

Donde m es el rango de H, o sea $\min(n_t, n_r)$ y λ_i es el i-ésimo valor propio de HH^* . Además si tenemos que δ_i^2 es el i-ésimo valores singular de H, entonces el i-ésimo valor propio de HH^* es $\lambda_i = \delta_i^2$. Esto nos permite ver la capacidad de un canal MIMO como la suma de las capacidades de M canales SISO, cada uno con ganancia de potencia λ_i y potencia transmitida P_T/n_t . Por lo tanto el uso de múltiples antenas en Transmisión y recepción en un canal radio equivale a varios canales escalares entre el transmisor y el receptor [15].

Conociendo el canal en transmisión, la matriz H puede ser descompuesta explícitamente en m canales SISO paralelos independientes, ver figura 3, satisfaciendo (15):

$$\bar{y}_i = \sqrt{\frac{P_T}{n_t}} \sqrt{\lambda_i} \bar{s}_i + \bar{n}_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

Figura 3: Modelo del canal equivalente para una descomposición de valores singulares de la matriz H

La capacidad del canal MIMO será la suma de las capacidades de los m canales SISO paralelos [14] (16):

$$C = \log_2 \prod_{i=1}^m \left\{ 1 + \frac{P_T \gamma_i}{n_t \sigma_n^2} \lambda_i \right\} \quad (16)$$

Donde $\gamma_i = E\{|s_i|^2\}$ es la energía transmitida a través del i -ésimo subcanal. Estas energías deben cumplir $\sum_{i=1}^m \gamma_i = n_t$, por tanto, la capacidad depende de los valores λ_i . El transmisor debe utilizar los valores óptimos para maximizar la capacidad total del canal MIMO: por tanto la capacidad máxima es (17):

$$C = \max_{\sum_{i=1}^m \gamma_i = P_T} \sum_{i=1}^m \log_2 \det \left\{ 1 + \frac{P_T \gamma_i}{n_t \sigma_n^2} \lambda_i \right\} \quad (17)$$

La política óptima de asignación de energía cumple (18):

$$\gamma_i^{opt.} = \left(\mu - \frac{\sigma_n^2 n_t}{P_T \lambda_i} \right)^+ \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

$$y(x)^+ = \max(0, x). \quad (19)$$

Donde μ se toma por el criterio

La capacidad de desvanecimiento plano de canales en sistema MIMO cuando CSI está disponible en el transmisor está dada por (20):

$$C = \sum_{i=1}^{m'} \log_2 \left\{ \frac{\mu \lambda_i}{\sigma_n^2} \right\} \quad (20)$$

Donde m' es el número de asignaciones, donde la potencia λ_i no es cero. Se aprecia que el transmisor también necesita conocimiento de σ_n^2 la potencia de ruido en el aparato receptor se calcula como la información mutua de potencia optima asignada.

CARACTERIZANDO EL CANAL DE RADIO

La evolución de estos sistemas estándares se realiza sobre la banda 2.4 GHz (2.405-2.485 GHz), por lo que se caracteriza el canal MIMO en interiores para dicha frecuencia. Para caracterizar el canal de radio hemos tomado los diferentes datos experimentales de la investigación realizada [7]. Se han seleccionado entornos típicos para el despliegue de redes inalámbricas. Estos datos los hemos tomado de acuerdo a la proximidad del transmisor- receptor y de los elementos dispersos que afectan el enlace.

Se ha tenido en cuenta dos escenarios en interiores (uno con poca dispersión y otro con mayor grado de dispersión) en los que se han estudiado el comportamiento de los canales MIMO. Para los escenarios interiores se ha mostrado la relevancia del despliegue de redes inalámbricas en picoceldas. La evolución

de estas redes, en concreto las basadas en el estándar IEEE802.11 tienden al uso de sistemas MIMO para aumentar la velocidad de transmisión de datos.

En los escenarios interiores el despliegue de redes inalámbricas de área local es una realidad hoy en día pero con unas velocidades de transmisión netas muy por debajo de las ofrecidas por las redes cableadas.

En los sistemas de banda estrecha en los escenarios interiores la diferencia de la capacidad entre LOS y NLOS es menos notable, con diferencias entre 0.5-1 bps/Hz. Sin embargo sí se observa una gran dependencia de la capacidad con la orientación relativa entre arreglos, principalmente en situaciones de línea de vista. Así en las situaciones LOS se observa una diferencia entorno a 2 bps/Hz entre la orientación paralela y la orientación perpendicular.

En las situaciones NLOS el comportamiento en ambos escenarios es ligeramente diferente. Así en el escenario # 1, aunque la línea de vista está obstruida, el resto de componentes multicamino pueden llegar al receptor sin obstáculos intermedios, lo que no ocurre en el escenario # 2 en las que todas las componentes deben atravesar al menos la pared. Esta diferencia en el escenario # 2 hace que la capacidad para ambas orientaciones sea similar, entorno a 17.5 bps/Hz mientras que en el escenario # 1 la orientación paralela continua siendo superior en capacidad a la perpendicular, situándose la capacidad media casi 1.2 bps/Hz por encima.

En los sistemas de banda ancha, se añade un nuevo orden de diversidad, la diversidad frecuencial. La selectividad en frecuencia contribuye a que los tonos de un sistema MIMO-OFDM sufran variaciones más independientes entre ellos y por tanto permite obtener ganancia por diversidad frecuencial. Los resultados de capacidad obtenidos en banda ancha comparados con la capacidad de un único tono, muestran que la ganancia por diversidad frecuencial se manifiesta en la capacidad "outage", manteniendo la capacidad media prácticamente constante.

En los escenarios interiores, para ambos escenarios y orientaciones, se observa cómo la ganancia por diversidad frecuencial introduce una mejora en la capacidad "outage" 10% de entre 1.5-2 bps/Hz. Gracias a la ganancia por diversidad frecuencial, la capacidad "outage" 10% del canal en banda ancha es entre 1 y 2 bps/Hz superior a la capacidad obtenida a partir de un único tono. Esta ganancia implica que se incrementa la eficiencia espectral mínima por encima de la cual se trabaja en el 90% de las ocasiones.

El uso de sistemas MIMO realmente introduce una mejora en la capacidad del canal respecto a los canales SISO. Así para una SNR de 30 dB un canal SISO aporta una capacidad media de 10 bps/Hz, mientras que un sistema MIMO 2x2 con desvanecimiento Rayleigh no correlacionado presenta una capacidad de 17.8 bps/Hz. Incluso en los canales MIMO medidos que presentan alta correlación, la mejora en la capacidad respecto al canal SISO es superior a 3.5 bps/Hz.

Se ha observado como la correlación espacial condiciona el comportamiento de la capacidad. Su comportamiento, al igual que el de la correlación, depende de distintos aspectos como la presencia de línea de vista o la orientación relativa entre arreglos.

CONCLUSIONES

Dado el gran interés que suscitan los sistemas de múltiples antenas, principalmente motivado por su capacidad para mejorar la eficiencia espectral máxima, se ha realizado un amplio análisis de distintas estrategias de procesamiento de señal y codificación especialmente concebidas para sistemas Multiple-Input Multiple-Output (MIMO). Estos sistemas se caracterizan por el uso de múltiples antenas tanto en transmisión como en recepción de un canal con multitrayecto que resulta de un entorno de propagación electromagnética. El interés de estas estrategias propuestas proviene, en última instancia, de la gran capacidad asociada al canal MIMO considerado. Dicha capacidad crece de modo directamente proporcional al mínimo del número de antenas transmisoras y receptoras del canal MIMO.

Un factor importante al escoger la estrategia de transmisión es la relación entre los valores principales o valores propios para $\mathbf{H}\mathbf{H}^*$, que tiene una interpretación física de cuán direccional es el canal.

La correlación espacial muestra una gran dependencia con la línea de vista entre transmisor y receptor. Se ha observado, al analizar la correlación en recepción, como en presencia de línea de vista la correlación entre subcanales es elevada, incluso para separaciones altas entre elementos receptores. En situaciones NLOS, la ausencia de esta componente dominante genera mayor uniformidad del PAS proporcionando valores de correlación menores.

En las áreas con línea de vista se ha observado la influencia de la orientación relativa entre arreglos sobre la correlación. Cuando ambos arreglos están paralelos, el aumento de la separación entre los elementos receptores permite un descenso mayor de la correlación que cuando los arreglos están perpendiculares. De esta manera, para una separación dada, la correlación será menor cuando la orientación sea paralela. Este comportamiento no se aprecia en situaciones NLOS donde la mayor uniformidad de las componentes dispersas, junto con su alta dispersión en las direcciones de llegada hacen que el comportamiento de la correlación sea inmune a la orientación relativa del arreglo receptor respecto del transmisor.

Referencias

- [1] J. WINTERS, "On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment," IEEE Journal on Selected Areas on Communications, Vol. 5, pp. 871-878, Junio 1987.
- [2] G. J. FOSCHINI, "Layered space-time architecture for wireless communication in fading environments when using multi-element antennas," Bell Labs Technology Journal, pp-41-59, 1996.
- [3] I. E. TELATAR, "Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels," AT&T Bell Laboratories, B10 112 170-950 615-07TM, 1995.
- [4] Wittneben, "A new bandwidth efficient transmit antenna diversity for linear digital modulation," Proceedings ICC, pp. 1630-1634, 1993.
- [5] W. C. JAKES, "Microwave Mobile Communications," IEEE reissue 1994.
- [6] S. N. DIGGAVI, N. AL-DHAHIR, A. STAMOUIS, A.R. CADERBANK, "Great Expectations: The Value of Spatial Diversity in Wireless Networks," Proceedings of the IEEE, Vol. 92, No. 2, Feb 2004.
- [7] O. FERNÁNDEZ, "Caracterización Experimental y Modelo de Canal MIMO para Aplicaciones WLAN Y WMAN. Mayo 2007.
- [8] WENNSTROM M. "On MIMO systems and adaptive arrays for wireless communication". Uppsala University, 2002.
- [9] ROIT U. NABARR, HELMU BOLCSKEI, y AROGYASWAMI J. PAULRAJ "Outage Properties Of Space-Time Block Codes In Correlated Rayleigh Or Rician Fading Environments," IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2002 (ICASSP '02). Vol. 3 pp. III-2381- III- 2384.
- [10] W. WEICHSEBERGER, "Spatial Structure of Multiple Antenna Radio Channels. A signal Processing Viewpoint," Tesis doctoral, Universidad Técnica de Viena, Diciembre 2003.
- [11] S. ALAMOUTI, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," IEEE Journal on Selected Areas on Communications, Vol. 16, Oct. 1998.
- [12] V. TAROKH, N. SESHADRI y A. CALDERBANK, "Space-Time codes for high data rate wireless communications: Performance criterion and code construction," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 44, Mar. 1998.
- [13] L. ZHENG y D. N. C. TSE, "Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple- Antenna Channels," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 49, No. 5 Mayo 2003.
- [14] R.W. HEATH.JR. and A. PAULRAJ, "Switching between multiplexing and diversity based on constellation distance," in Proceedings of the Allerton Conference on communications, Monticello, USA, Oct. 2000.
- [15] M. GONZÁLEZ , "Técnicas Avanzadas de Procesado de Señal para Sisitemas Multiple Input Multiple Output (MIMO). Feb- 2004