

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE COMUNICACIONES



TESIS DOCTORAL

**Caracterización Experimental y Modelado de Canal
MIMO para aplicaciones WLAN y WMAN**

Autor: Oscar Fernández Fernández

Directores: Marta Domingo Gracia y Rafael P. Torres Jiménez

**Tesis Doctoral presentada en la Universidad de Cantabria para la
obtención del título de Doctor por la Universidad de Cantabria**

Santander, Mayo de 2007

Capítulo 4

Correlación Espacial en Canales MIMO

4.1 Introducción

Los primeros estudios que proponen el uso de diversidad espacial en ambos extremos del canal de comunicaciones [1-3] asumen que los desvanecimientos sufridos por los distintos subcanales generados entre cada par de antenas transmisora y receptora son independientes, gracias a lo cual se obtienen altas eficiencias espectrales. En entornos reales se ha observado que esta suposición es demasiado idealista [4] debido a que los escenarios no presentan suficiente riqueza de elementos dispersores o bien a que la separación entre los elementos del array es limitada.

Se ha visto en el capítulo 2 que la presencia de correlación entre subcanales degrada el rendimiento del sistema; por tanto, la correlación se presenta en este capítulo como un parámetro clave en el uso de múltiples antenas dado que condiciona la eficiencia de los sistemas de diversidad.

La correlación se define para diferentes ámbitos, espacial, temporal o frecuencial; así en el caso de diversidad espacial se habla de correlación espacial para indicar el grado de similitud estadística entre dos canales cuyas antenas transmisoras y/o receptoras se encuentran separadas una cierta distancia. De la misma manera se puede hablar de

correlación temporal o correlación en frecuencia. Los sistemas MIMO tratados en esta tesis se centran en diversidad espacial y por tanto se estudiará la correlación espacial entre arrays de antenas cuyos elementos se encuentran separados espacialmente.

Diversos autores [5-8] han estudiado el efecto de la correlación espacial en sistemas de diversidad en recepción, mostrando como para valores de correlación por debajo de 0.5 la pérdida de ganancia por diversidad es pequeña, mientras que para valores por encima de 0.5 ó 0.7, la pérdida es considerable [9]. El uso de diversidad espacial también en transmisión hace necesario modelar y cuantificar el efecto de la correlación en ambos extremos del canal.

En paralelo con el desarrollo de esta tesis, en la literatura aparecen diferentes referencias que abordan la caracterización de la correlación bien a través de modelos geométricos del canal [9, 10], bien a través de medidas [11-14] o bien a través de simulaciones como por ejemplo el trazado de rayos [15, 16]. Aun así, la correlación espacial y su efecto sobre la capacidad son aspectos de actualidad todavía abiertos. Este trabajo presentado tiene el objetivo de ser una aportación al estudio de la correlación espacial y su influencia sobre los canales MIMO.

Así, en este capítulo se caracterizará la correlación espacial entre los diferentes subcanales MIMO, principalmente en función de la separación entre elementos receptores, manteniendo la separación entre transmisores fija. El motivo de centrar el análisis en uno de los extremos se debe a que el transmisor suele permitir una separación entre antenas mayor que el equipo receptor del usuario, generalmente un equipo portátil de pequeñas dimensiones que restringe la posible separación entre antenas.

Se analizará como influye en la correlación parámetros como el entorno que rodea a los arrays (densidad de *scatters*), la orientación de los arrays lineales o la presencia de línea de vista. Así en primer lugar se describirá en qué manera afecta la correlación al rendimiento del sistema MIMO, para así valorar la importancia del estudio de este parámetro. A continuación, se presentará el modelado de la correlación del canal MIMO de manera matricial, presentando el sentido físico de cada componente así como posibles simplificaciones del modelo. Posteriormente se explica desde el punto de vista teórico la influencia en la correlación de parámetros como la separación entre elementos de los arrays, el espectro de potencia en acimut, orientación entre arrays, etc... Por último, en el apartado 4.6, se estudia de manera experimental la correlación espacial en función de los parámetros analizados.

4.2 Efecto de la correlación en los canales MIMO

Como en otros sistemas de diversidad, la correlación, en este caso espacial, es uno de los condicionantes del rendimiento de los sistemas MIMO [9]. El modelo equivalente del canal MIMO muestra como se generan subcanales paralelos e independientes con ganancias en potencia λ_i [9], con $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > 0$, siendo λ_i el valor propio i -ésimo del canal. La distribución de los valores propios viene determinada por la correlación en el canal MIMO.

Al aumentar la correlación disminuyen los grados de libertad, pudiendo llegar, en caso extremo, a un único grado de libertad. Los valores propios en un sistema MIMO $M \times N$ con la matriz \mathbf{H} normalizada tal que $E[\|\mathbf{H}\|_F^2] = MN$, cumplen que $\sum \lambda_i = MN$. Al aumentar la correlación, los valores propios de menor magnitud pierden importancia llegando incluso a desaparecer. Con la normalización aplicada el incremento de la correlación se traduce en un aumento de la dispersión entre los valores propios. Por el contrario, al reducirse la correlación, los λ_i más pequeños tienden a tomar valores más altos, es decir, se potencian más subcanales (modos propios).

La Figura 4.1 muestra la distribución de los dos valores propios y la capacidad para un sistema 2×2 con diferentes grados de correlación en uno de los extremos del canal (Correlación introducida según modelo de Kronecker, ver apartado 4.3.1). A medida que aumenta el coeficiente de correlación, el valor propio menor, λ_2 , pierde peso frente al más significativo, λ_1 , lo cual se traduce en una disminución de la capacidad¹.

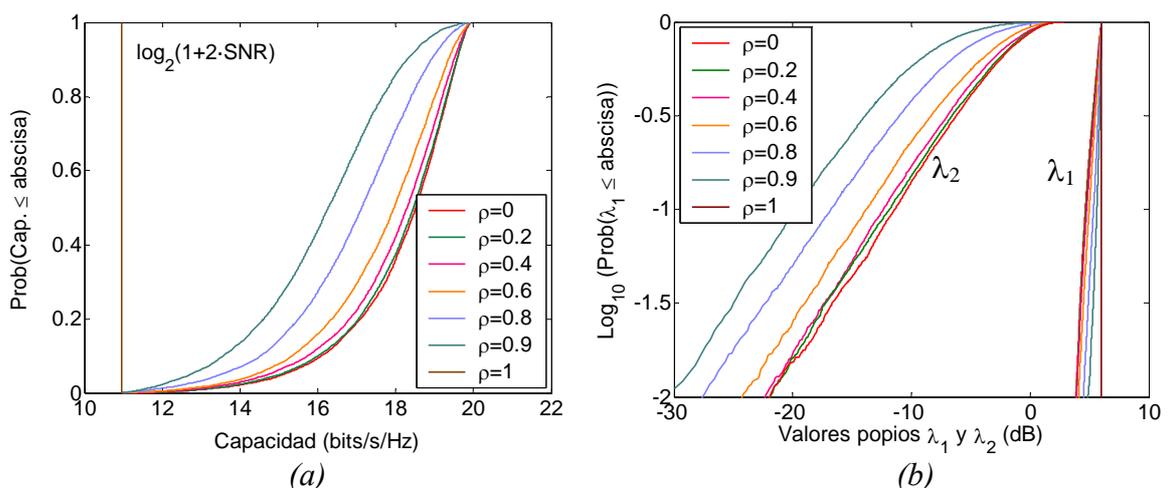


Figura 4.1. Valores propios (a) y capacidad para $SNR=30dB$ (b) de un sistema MIMO 2×2 con diferentes valores de correlación ρ

¹ Como se mostrará en el capítulo siguiente, el canal MIMO ideal es aquel que presenta todos los valores propios iguales.

4.3 Modelado de la correlación espacial

La correlación de un sistema MIMO se describe mediante la denominada matriz de correlación, la cual, como su propio nombre indica, modela la correlación entre los elementos de la matriz respuesta al impulso. Cada uno de los elementos de la matriz de correlación se puede calcular como:

$$\rho_{pq} = \langle \text{vec}(\mathbf{H})_p, \text{vec}(\mathbf{H})_q^H \rangle, p, q \in [1, 2, 3, \dots, MN] \quad (4.1)$$

donde \mathbf{H} es la matriz del canal MIMO normalizada, $\text{vec}(\mathbf{H})$ representa la agrupación de las columnas de \mathbf{H} a modo de vector, $\text{vec}(\mathbf{H}) = [(\mathbf{h}^1)^T, (\mathbf{h}^2)^T, \dots, (\mathbf{h}^m)^T]^T$ siendo \mathbf{h}^i la i -ésima columna de \mathbf{H} , $(\cdot)^T$ es la operación de transposición y $(\cdot)^H$ el transpuesto conjugado [5, 17].

La operación $\langle a, b \rangle$ representa el coeficiente de correlación entre las variables aleatorias a y b (4.2).

$$\langle a, b \rangle = \frac{E[ab^*] - E[a]E[b^*]}{\sqrt{E[|a|^2 - (E[a])^2]} \sqrt{E[|b|^2 - (E[b])^2]}} = \frac{E[ab^*] - \mu_a \cdot \mu_{b^*}}{\sqrt{\sigma_a^2 \sigma_b^2}} \quad (4.2)$$

siendo $(\cdot)^*$ la operación complejo conjugado, μ_a , μ_b , σ_a y σ_b el valor medio y la desviación estándar de las variables aleatorias a y b respectivamente. Si la varianza es unitaria, se puede hablar indistintamente de coeficiente de correlación o de covarianza [9, 17, 18].

La normalización de la matriz de canal se realiza mediante la norma de Frobenius [5] con el objeto de que la ganancia en potencia del canal sea MN , así, de manera equivalente, la ganancia de cada subcanal h_{ji} es 1 [11, 19].

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{H}'}{\sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M |h'_{ji}|^2}} \quad (4.3)$$

La notación utilizada para definir la correlación entre dos canales h_{pq} y h_{mn} se define a continuación:

$$\rho_{h_{pq}}^{h_{mn}} = \rho_{pq}^{mn} = \langle h_{pq}, h_{mn} \rangle, p, m \in [1, 2, 3, \dots, N] \text{ y } q, n \in [1, 2, 3, \dots, M] \quad (4.4)$$

La matriz de correlación es una matriz cuadrada de orden MN con la diagonal principal unitaria.

$$\mathbf{R}_{MN \times MN} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{11}^{21} & \cdot & \cdot & \rho_{11}^{NM} \\ \rho_{21}^{11} & \cdot & & & \\ & & \cdot & & \\ & & & \cdot & \\ \rho_{NM}^{11} & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Aprovechando que $\rho_{mn}^{pq} = \rho_{pq}^{mn}^*$, siendo $p, m \in [1, 2, 3, \dots, N]$ y $q, n \in [1, 2, 3, \dots, M]$, se puede simplificar el cálculo de la matriz de correlación al cálculo de los coeficientes que se encuentran por encima de la diagonal principal. Así por ejemplo en un sistema 2×2 la matriz de correlación resulta:

$$\mathbf{R}_{4 \times 4} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{11}^{21} & \rho_{11}^{12} & \rho_{11}^{22} \\ \rho_{21}^{11} & 1 & \rho_{21}^{12} & \rho_{21}^{22} \\ \rho_{12}^{11} & \rho_{12}^{21} & 1 & \rho_{12}^{22} \\ \rho_{22}^{11} & \rho_{22}^{21} & \rho_{22}^{12} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{11}^{21} & \rho_{11}^{12} & \rho_{11}^{22} \\ \rho_{11}^{21}^* & 1 & \rho_{21}^{12} & \rho_{21}^{22} \\ \rho_{11}^{12}^* & \rho_{21}^{12}^* & 1 & \rho_{12}^{22} \\ \rho_{11}^{22}^* & \rho_{21}^{22}^* & \rho_{12}^{22}^* & 1 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

De esta forma el cálculo de la matriz se ha simplificado, pasando de 12 coeficientes (la diagonal principal son unos) a sólo 6.

En general en un sistema $M \times N$, la matriz de correlación correspondiente tendrá $\frac{1}{2}MN(MN-1)$ coeficientes diferentes, que se pueden agrupar en tres subconjuntos:

- a) Coeficiente de correlación en transmisión (t)
- b) Coeficiente de correlación en recepción (r)
- c) Coeficiente de correlación cruzada (s)

En un sistema MIMO 2×2 los tres subconjuntos se distribuyen en la matriz de correlación de la siguiente forma [19]:

$$\mathbf{R}_{4 \times 4} = \begin{pmatrix} 1 & r_1 & t_1 & s_1 \\ r_1^* & 1 & s_2 & t_2 \\ t_1^* & s_2^* & 1 & r_2 \\ s_1^* & t_2^* & r_2^* & 1 \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Si se asume que la correlación entre los elementos en un array es independiente de la

antena seleccionada en el otro array [11, 20] se puede afirmar que $t_1=t_2=t=\rho_{nm_1}^{nm_2}$ y que $r_1=r_2=r=\rho_{n_1m}^{n_2m}$. Esta suposición se puede realizar dado que los M elementos transmisores, con igual diagrama de radiación, iluminan los mismos *scatteres* del escenario y por tanto generan el mismo espectro de potencia en azimut en el receptor y, por tanto, la misma correlación [11, 20].

a) El coeficiente de correlación en transmisión representa la correlación espacial entre canales con distinto transmisor pero mismo receptor, tal como se representa en la Figura 4.2a.

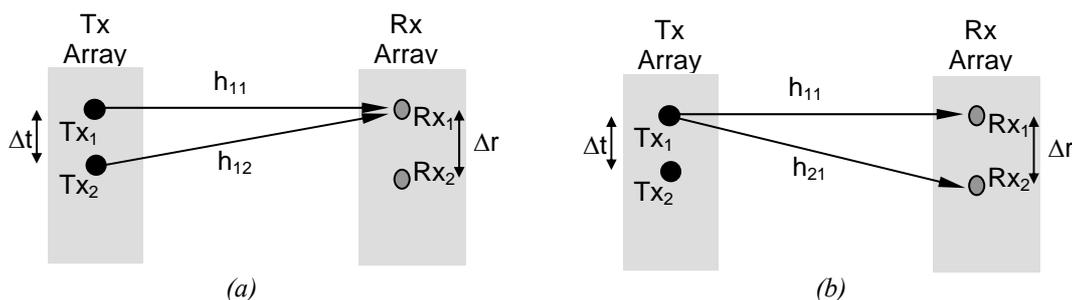


Figura 4.2. Esquema de la correlación en transmisión (a) y en recepción (b)

$$\rho_{m_1m_2}^{Tx} = \rho_{nm_1}^{nm_2} = \langle h_{nm_1}, h_{nm_2} \rangle = t_n \quad (4.8)$$

b) El coeficiente de correlación en recepción representa la correlación espacial entre canales con mismo transmisor pero distinto receptor, Figura 4.2b.

$$\rho_{n_1n_2}^{Rx} = \rho_{n_1m}^{n_2m} = \langle h_{n_1m}, h_{n_2m} \rangle = r_m \quad (4.9)$$

c) El coeficiente de correlación cruzada representa la correlación espacial entre canales que no comparten ni el mismo transmisor ni el mismo receptor

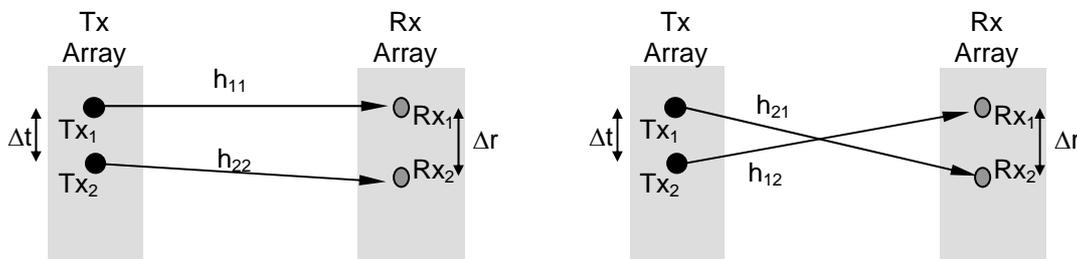


Figura 4.3. Esquema de la correlación cruzada

$$\rho_{n_1m_1}^{n_2m_2} = \langle h_{n_1m_1}, h_{n_2m_2} \rangle = s_1 \quad \rho_{n_1m_2}^{n_2m_1} = \langle h_{n_1m_2}, h_{n_2m_1} \rangle = s_2 \quad (4.10)$$

Una vez modelada la correlación se pueden obtener realizaciones del canal MIMO [9] a partir de la siguiente expresión.

$$\text{vec}(\mathbf{H}) = \mathbf{R}^{1/2} \cdot \text{vec}(\mathbf{H}_w) \quad (4.11)$$

Donde \mathbf{H}_w es la matriz respuesta al impulso del canal MIMO espacialmente incorrelado (Rayleigh iid) y $\mathbf{R} = \mathbf{R}^{1/2} \cdot \mathbf{R}^{H/2}$.

4.3.1 Simplificación del cálculo de la matriz de correlación

El modelo de Kronecker [11, 18, 20] es una simplificación de la matriz de correlación \mathbf{R} modelándola mediante el producto de Kronecker de dos matrices \mathbf{R}_{Tx} y \mathbf{R}_{Rx} . Esta simplificación asume que la correlación entre los elementos de un array es independiente del elemento seleccionado del otro array y que la correlación cruzada se obtiene del producto de la correlación en transmisión y recepción [9, 11, 20].

Se determinan así la matriz de correlación en recepción \mathbf{R}_{Rx} ($N \times N$) y en transmisión \mathbf{R}_{Tx} ($M \times M$) [20]. En un sistema MIMO $M \times N$ la columna i -ésima, \mathbf{h}_c^i es la respuesta del canal al transmisor i -ésimo, mientras que la fila j -ésima, \mathbf{h}_f^j , es la respuesta al receptor j -ésimo. La correlación entre las columnas (Figura 4.4a) representa la correlación en transmisión mientras que la correlación entre filas es la correlación en recepción (Figura 4.4b).

$$\begin{array}{ccc} \left(\begin{array}{cc} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{array} \right) = \left(\mathbf{h}_c^1 & \mathbf{h}_c^2 \right) & \left(\begin{array}{cc} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{array} \right) = \left(\mathbf{h}_f^1 & \mathbf{h}_f^2 \right) & \rho_{12}^{Rx} = \rho_{21}^{Rx*} = \langle \mathbf{h}_f^1 \mathbf{h}_f^2 \rangle \\ \rho_{12}^{Tx} = \rho_{21}^{Tx*} = \langle \mathbf{h}_c^1 \mathbf{h}_c^2 \rangle & & \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{(a)} \\ \text{(b)} \end{array}$$

Figura 4.4. (a) Correlación en transmisión (columnas) y (b) correlación en recepción (filas)

Así, en el sistema $M \times N$, las matrices de correlación en transmisión y recepción se definen según (4.12) y (4.13) respectivamente.

$$\mathbf{R}_{Tx} = \begin{pmatrix} \rho_{11}^{Tx} & \cdot & \cdot & \rho_{1M}^{Tx} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \rho_{M1}^{Tx} & \cdot & \cdot & \rho_{MM}^{Tx} \end{pmatrix} \quad (4.12) \quad \mathbf{R}_{Rx} = \begin{pmatrix} \rho_{11}^{Rx} & \cdot & \cdot & \rho_{1N}^{Rx} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \rho_{N1}^{Rx} & \cdot & \cdot & \rho_{NN}^{Rx} \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

La matriz de correlación se obtiene mediante el producto de Kronecker de \mathbf{R}_{Tx} y \mathbf{R}_{Rx} :

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_{Tx} \otimes \mathbf{R}_{Rx} \quad (4.14)$$

y, los coeficientes de correlación cruzada a través de (4.15) y (4.16).

$$s_1 = \rho_{n_1 m_1}^{n_2 m_2} = \langle h_{n_1 m_1}, h_{n_2 m_2} \rangle \cong \rho_{n_1 n_2}^{Rx} \rho_{m_1 m_2}^{Tx} = r \cdot t \quad (4.15)$$

$$s_2 = \rho_{n_1 m_2}^{n_2 m_1} = \langle h_{n_1 m_2}, h_{n_2 m_1} \rangle \cong \rho_{n_1 n_2}^{Rx} * \rho_{m_1 m_2}^{Tx} = r^* \cdot t \quad (4.16)$$

La matriz de correlación resultante es una aproximación de la matriz real. Este modelo de correlación se utiliza en proyectos como Metra e I-Metra (Proyectos financiados por la IST) y el *3rd Generation Partnership Project* (3GPP).

La obtención de realizaciones de canal que contemplen esta correlación en transmisión y recepción [5, 10, 21, 22] se consigue mediante la expresión:

$$\mathbf{H} = (\mathbf{R}_{Rx})^{1/2} \cdot \mathbf{H}_w \cdot ((\mathbf{R}_{Tx})^{1/2})^H \quad (4.17)$$

Donde la operación $(\cdot)^{1/2}$ se obtiene a partir de la descomposición de Cholesky y es tal que $\mathbf{R} = \mathbf{R}^{1/2} \cdot (\mathbf{R}^{1/2})^H$. Así por una parte, a los elementos de cada columna de \mathbf{H}_w se le aplica la correlación en transmisión y a los elementos de cada fila se le aplica la correlación en recepción.

En resumen, el modelo de Kronecker en un sistema MIMO 2x2 se basa en las siguientes dos hipótesis:

- a.- La correlación en transmisión es independiente del receptor, $t_1 = t_2 = t$, y la correlación en recepción es independiente del transmisor, $r_1 = r_2 = r$.
- b.- La correlación cruzada se obtiene como la combinación de correlación en transmisión y correlación en recepción, $s_1 = r \cdot t$ y $s_2 = r^* \cdot t$.

A medida que la matriz de correlación medida se separe de estas dos hipótesis, la validez del modelo de Kronecker estará más cuestionada. En la primera hipótesis, por definición de las medidas, $t_1 = t_2 = t$, mientras que r_1 será similar a r_2 para separaciones pequeñas entre receptores.

La segunda hipótesis es más restrictiva porque debe cumplir que $|s_1| = |s_2| = |s|$ y $|s| = |r \cdot t|$, dos condiciones que, a diferencia de la anterior, no tiene un sentido físico en el canal. Los coeficientes de correlación de la diagonal (correlación cruzado) tienen un efecto positivo en la capacidad y compensan parcialmente la correlación en transmisión y recepción [10]. Un mal modelado de los mismos conllevará una mala estimación de la capacidad.

Finalmente, el error entre la matriz de correlación del modelo de Kronecker obtenida

según (4.14) y la matriz de correlación obtenida a partir de las medidas según (4.1) viene dada por:

$$\Psi(\mathbf{R}, \mathbf{R}_{Tx} \otimes \mathbf{R}_{Rx}) = \frac{\|\mathbf{R} - \mathbf{R}_{Tx} \otimes \mathbf{R}_{Rx}\|_F}{\|\mathbf{R}\|_F} \quad (4.18)$$

4.4 Correlación compleja vs. correlación de envolvente y de potencia

El coeficiente de correlación complejo descrito en este capítulo utiliza la información de módulo y fase de ambos canales para proporcionar una estimación completa de la correlación espacial. Sin embargo también se puede hablar de correlación de potencia y de envolvente.

Tradicionalmente, las limitaciones en los equipos de medida para mantener una referencia de fase obligan a calcular la correlación utilizando solamente el módulo de la señal medida, la envolvente. Así la correlación de envolvente entre dos canales viene dado por:

$$\rho_{env} = \langle |h_1|, |h_2| \rangle \quad (4.19)$$

mientras que la correlación en potencia, donde se utiliza el cuadrado de los módulos de los canales para el cálculo de la correlación, se define como:

$$\rho_{pow} = \langle |h_1|^2, |h_2|^2 \rangle \quad (4.20)$$

De acuerdo con [23], la correlación en potencia y la de envolvente pueden considerarse prácticamente iguales.

Tanto la correlación de envolvente como en potencia han sido muy estudiadas en la literatura, aunque son sólo aproximaciones de la correlación real, dado que parte de la información no se está teniendo en cuenta. Algunos modelos de correlación, como por ejemplo el modelo de Kronecker, contemplan el uso de coeficientes de correlación compleja o de envolvente. En [24] se muestra como efectivamente la correlación compleja permite un mejor modelado de las características del canal.

En entornos Rayleigh, la correlación en potencia se puede relacionar con la compleja

[25] según la siguiente expresión:

$$\rho_{pow} = |\rho_{cplx}|^2 \quad (4.21)$$

Como ρ_{pow} en (4.20) está restringido al intervalo $[-1,1]$ y en (4.21) al intervalo $[0,1]$ se suele utilizar el valor absoluto de ρ_{cplx} , ya que los valores negativos indican correlación pero con un desfase entre los canales.

Valores típicos de correlación en potencia son 0.7 [26] y 0.5 [9], que según (4.21) se traducen, en canales Rayleigh, a valores de correlación compleja de 0.84 y 0.7 respectivamente.

4.5 Influencia de diversos parámetros en la correlación

La correlación espacial está influenciada por diversos factores. Por una parte, por las características físicas de los arrays transmisor y receptor como por ejemplo:

- Topología de los arrays transmisor y receptor.
- Separación entre los elementos de los array.
- Angulo de salida (AoD) y de llegada (AoA)
- Orientación relativa entre los array

Por otra parte, la correlación también está también determinada por las características del entorno de propagación, el cual condiciona la riqueza de *scattering* (*Power azimuth spectrum* PAS y *Angular Spread* AS)

4.5.1 Dependencia de las características físicas

Tradicionalmente, el mecanismo para reducir la correlación en sistemas de diversidad espacial es el aumento de la separación entre elementos. Sin embargo se presentan muchas situaciones en las que por limitaciones físicas en el receptor o transmisor no se puede aumentar la separación indefinidamente hasta reducir la correlación.

Foschini [9] muestra como el aumento de la separación de los elementos transmisores o receptores conlleva una reducción de la correlación y una mejora en la capacidad. Sin embargo, la relación entre la función de correlación y la separación ente elementos depende de las características del array, su orientación y el propio escenario. Por ejemplo

la relación entre la función de correlación y la separación entre elementos presenta un comportamiento oscilante.

En [9] se estudia dos tipos de arrays, lineales y hexagonales, ambos del mismo número de elementos. El array hexagonal, es independiente del ángulo de llegada que lo hace inmune a problemas de orientación entre transmisor y receptor. En un sistema MIMO con arrays lineales en ambos extremos del canal, se observa que la orientación relativa entre el array transmisor y receptor condiciona el rendimiento del enlace. Se definen en [26] dos situaciones extremas, situación *broadside*, donde el ángulo de llegada (Φ) forma 0° con la mediatriz del array y la situación *inline*, donde el ángulo de llegada forma 90° . Como se mostró en el apartado 3.3.4, en esta memoria también se aplica la notación paralelo abarcando el caso extremo de orientación *broadside* y perpendicular para abarcando la orientación a *inline*.

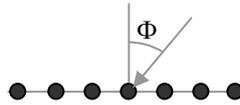


Figura 4.5. Ángulo de llegada en un array lineal

La situación paralela tendiendo a *broadside* es, desde el punto de vista de la correlación, mejor que la orientación perpendicular tendiendo a *inline*. Así [26] en exteriores propone separaciones de 70λ para una situación *inline* y 30λ para una situación tendiendo a *broadside*. Foschini en [9], muestra dos expresiones diferentes para el cálculo de la covarianza dependiendo si el array transmisor es paralelo a la dirección de propagación ($\phi=90^\circ$) o perpendicular ($\phi=0^\circ$).

Para el caso de separación perpendicular a la dirección de propagación, situación *broadside* (Figura 4.6a) el coeficiente de correlación se obtiene según la expresión (4.22) mientras que si es paralela a la dirección de propagación, orientación *inline* (Figura 4.6b) el coeficiente de correlación se obtiene según (4.23):

$$E[h_{11}, h_{12}] \approx J_0 \left(\Delta \frac{2\pi}{\lambda} d \right) \quad (4.22)$$

$$E[h_{11}, h_{12}] \approx e^{(-j(2\pi d / \lambda)(1-0.25\Delta^2))} J_0 \left(\Delta \frac{2\pi}{\lambda} d \right) \quad (4.23)$$

Ambas expresiones no solo contemplan parámetros físicos de las antenas como la orientación relativa entre arrays o la separación entre elementos, sino que añaden la dependencia con el entorno, asumiendo que los ángulos de salida de las ondas se confinan en el intervalo $[-\Delta, \Delta]$ entorno a la dirección del rayo directo.

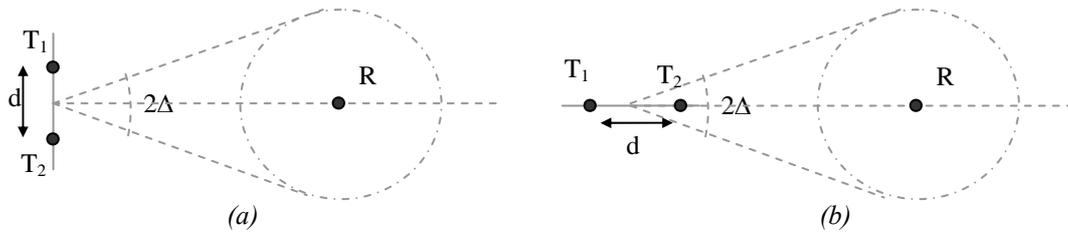


Figura 4.6. Esquema de la dispersión angular para ambas orientaciones

4.5.2 Dependencia con el entorno

Tradicionalmente, en canales Rayleigh, la correlación espacial entre dos antenas receptoras separadas una distancia d se ha modelado a través del modelo de Clarke (4.24) el cual sigue la función de Bessel de orden cero y depende de la longitud de onda λ y de la separación espacial entre antenas Δr :

$$J_0\left(\frac{2\pi\Delta r}{\lambda}\right) \quad (4.24)$$

Este modelo 2D supone que la señal multicamino $p(\theta)$ llega de manera uniforme y omnidireccional en el plano azimutal (θ). Según este modelo, para separaciones entre elementos entorno a 0.4λ , la correlación de potencia es nula [6].

Sin embargo, en muchos entornos micro y pico celulares el *scattering* deja de ser uniforme e isotrópico, perdiendo validez el coeficiente de correlación estimado por el modelo de Clarke [27]. Las expresiones (4.22) y (4.23) presentadas en [9] muestran expresiones derivadas de (4.24) que incorporan la dependencia angular.

Se definen dos conceptos que modelan la propagación multicamino de la señal recibida o transmitida: dispersión angular y espectro potencia en azimut.

a) **El espectro de potencia en azimut**, (*Power Azimut Spectrum PAS*) describe la distribución de la potencia de la señal en función del ángulo de llegada al receptor. En la literatura se presentan diferentes modelos del espectro de potencia en azimut, Gaussiano, coseno elevado a la n -ésima potencia, Laplaciano [7, 28, 29, 30]. En [31] se distingue según el escenario varios tipos de PAS, ver Tabla 4.1. Para exteriores el PAS presenta distribución uniforme en el receptor y diferentes posibles distribuciones en el transmisor, mientras que en interiores consideran un PAS uniforme en ambos extremos. Sin embargo [32] indica que el PAS en interiores puede adquirir otras distribuciones diferentes a la uniforme.

		PAS en BS	PAS en MS
Outdoor	Macrocell	Laplaciana	Uniforme
	Microcell	Coseno elevado a n-ésima potencia	
		Gausiana Truncada	
Picocell	Uniforme		
Indoor		Casi Uniforme	
		Uniforme	

Tabla 4.1. Clasificación del tipo de PAS en BS y MS para distintos tipos de entorno

b) **La dispersión angular**, (*Angular Spread AS, Λ*) mide la dispersión de las direcciones de llegada en el plano azimutal. La dispersión angular se calcula como [33]:

$$\Lambda = \sqrt{1 - \frac{|F_1|^2}{|F_0|^2}} \quad (4.25)$$

donde F_0 representa el total de la potencia recibida y F_n el n -ésimo coeficiente de Fourier del PAS $p(\theta)$:

$$F_n = \int_0^{2\pi} p(\theta) e^{jn\theta} d\theta \quad (4.26)$$

El valor de la dispersión angular está acotado entre 0 y 1. El valor cero representa el caso extremo en el que los rayos llegan desde una única dirección y $\Lambda=1$ si el *scattering* es isotrópico. En la Figura 4.7 se representa el caso ideal del modelo de Clarke con una distribución uniforme del ángulo de llegada (AoA): modelo de *scattering* isotrópico y uniforme. En este caso el PAS es uniforme de valor $P_T/2\pi$ y $\Lambda=1$ dado que

$$|F_1| = \left| \int_0^{2\pi} \frac{P_T}{2\pi} e^{j\theta} d\theta \right| = \frac{P_T}{2\pi} * \text{sen}(\theta) \Big|_0^{2\pi} = 0.$$

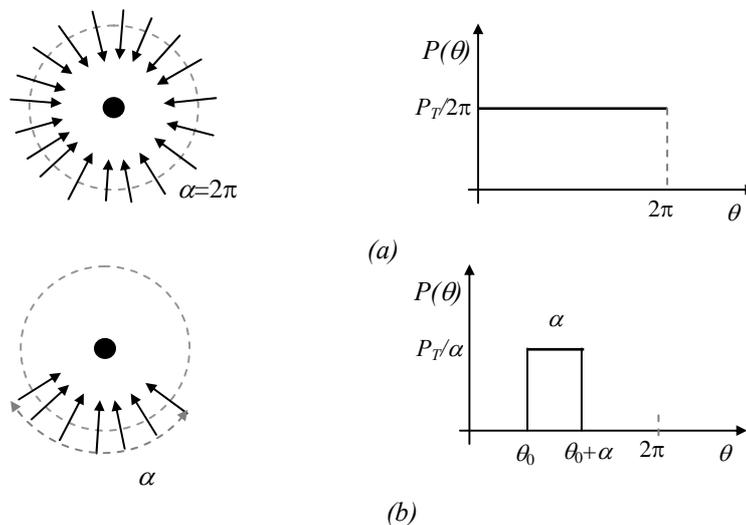


Figura 4.7. Scattering uniforme e isotrópico (a) y no isotrópico (b) en azimut

Analíticamente el PAS uniforme se modela según la siguiente expresión:

$$p(\theta) = \begin{cases} P_T / \alpha & \theta_0 \leq \theta \leq \theta_0 + \alpha \\ 0 & \text{resto } \theta \end{cases} \quad (4.27)$$

La dispersión angular para este espectro de potencia en el plano azimutal es:

$$\Lambda = \sqrt{1 - \frac{4}{\alpha^2} \text{sen}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (4.28)$$

4.5.2.1 Relación entre correlación, PAS y dispersión angular

La dependencia de la correlación con el entorno (PAS y Λ) condiciona el rendimiento del canal MIMO. El empobrecimiento del *scattering* produce una reducción de las componentes multicamino y en consecuencia de la diversidad de direcciones de llegada (la dispersión angular), con lo que se produce un aumento de la correlación.

Varios autores han modelado analíticamente la relación entre el coeficiente de correlación y la dispersión angular o el PAS [26, 27, 34]. Durgin y Rappaport [33, 34] proponen una relación entre el coeficiente de correlación de envolvente y la dispersión angular (Λ) que viene dada por:

$$\rho(\Delta s) \approx e^{(-23\Lambda^2(\Delta s/\lambda)^2)} \quad (4.29)$$

Esta relación muestra como a medida que disminuye la dispersión angular (*Scattering* más direccional) o la separación entre elementos del array (Δs) aumenta la correlación.

La Figura 4.8 presenta el coeficiente de correlación en función de la separación eléctrica entre antenas según las expresiones (4.24), (4.22), (4.23) y (4.29) presentadas anteriormente. El modelo de Jakes, (4.24), presenta la correlación de manera ideal, asumiendo *scattering* isotrópico y uniforme en azimut. Si el *scattering* es uniforme pero concentrado en un sector de ángulo $\alpha=72^\circ$ el modelo de Durgin, (4.29), muestra como la distancia entre elementos requerida para obtener el mismo grado de correlación que en el modelo de Jakes es superior.

Las expresiones (4.22) y (4.23) propuestas por Foschini muestran por su parte como, además de la separación entre elementos, también influye el ángulo del sector en el que se

concentran los ángulos de llegada o salida 2Δ , y la orientación relativa entre arrays. La orientación *broadside* con $2\Delta=72^\circ$, presenta un comportamiento próximo al modelo de Jakes mientras que, para la orientación *inline*, la correlación presenta valores elevados incluso para grandes separaciones entre elementos del array.

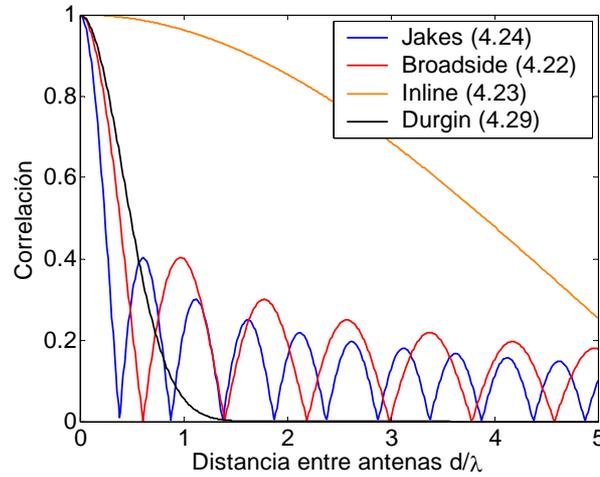


Figura 4.8. Correlación según el modelo de Jakes (4.24), para orientación *broadside* (4.22) e *inline* (4.23) con $2\Delta=72^\circ$ y según Durgin para PAS uniforme según (4.29)(4.27) con $\alpha=72^\circ$.

En [31] se propone estimar los elementos de las matrices de correlación en transmisión y en recepción propias del modelo de Kronecker, \mathbf{R}_{Tx} y \mathbf{R}_{Rx} , partiendo de un modelo de PAS determinado (ya sea uniforme, Gaussiana truncada, Laplaciana, etc). La correlación entre dos canales vendrá dada por [30]:

$$R(\Delta x) = R_{xx}(\Delta x) + jR_{xy}(\Delta x) \quad (4.30)$$

donde el primer termino representa la correlación entre las partes reales y el segundo entre la componente real y la imaginaria. Cada una de estas componentes se obtiene como:

$$R_{xx}(\Delta x) = \int_{-\pi}^{\pi} \text{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \cdot \text{sen}(\phi)\right) \cdot \text{PAS}(\phi) d\phi \quad (4.31)$$

$$R_{xy}(\Delta x) = \int_{-\pi}^{\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \cdot \text{sen}(\phi)\right) \cdot \text{PAS}(\phi) d\phi \quad (4.32)$$

Para un PAS uniforme e isotrópico en azimut, a partir de estas expresiones se obtiene la expresión (4.24) de Jakes.

Matemáticamente, la función de correlación espacial se relaciona con el *Power Azimuth Spectrum* a través de la transformada de Fourier [25]. Tal como indica Fleury [35], existe una dualidad entre dispersión y selectividad relacionada a través de la transformada de Fourier (Figura 4.9).

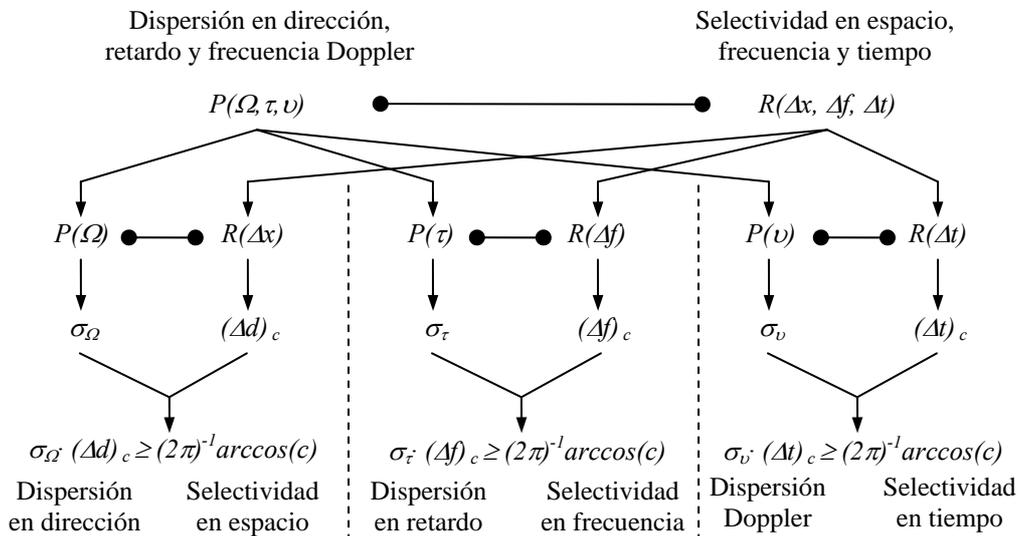


Figura 4.9. Relaciones entre la dispersión y la selectividad

Una vez conocido el PAS (Dispersión en la dirección) se puede obtener la correlación espacial (Selectividad en el espacio) a través de la transformada inversa de Fourier.

4.5.3 Parámetros físicos vs parámetros del entorno

Tanto los parámetros físicos de los array como las características del entorno de propagación influyen en la correlación entre los canales. Cuando la dispersión angular es alta, entorno rico en *scattering*, la separación entre antenas tiene un impacto limitado, dado que para separaciones de $\lambda/2$ la correlación es pequeña [36]. Sin embargo si el *scattering* es pobre y la dispersión angular pequeña, la separación entre los elementos del array es fundamental para decorrelar los canales.

4.6 Estudio experimental de la correlación espacial

Una vez presentada la correlación espacial en sistemas MIMO y su dependencia con diferentes parámetros, se analiza la correlación espacial presente en los diferentes escenarios bajo test, evaluando la influencia de los parámetros descritos previamente. En este estudio, dadas las limitaciones del sistema de medida, no es posible medir el espectro de potencia azimutal (PAS).

4.6.1 Procesado de las medidas para obtener la correlación

A partir de las medidas realizadas en banda estrecha, para cada orientación y en cada área local se obtienen señales $s_i(x)$, con $i=1, \dots, N_{Tx}$ representando el canal entre una de las antenas transmisoras T_i y la antena receptora en cada una de las posiciones x dentro del array virtual. Se considera a cada $s_i(x)$ como un proceso estacionario en sentido amplio (*wide sense stationary* – WSS) en cada área local, de forma que la correlación depende únicamente de la separación entre antenas del array virtual y no de la posición absoluta (x) de las antenas. El procesado de estas señales permite obtener los distintos coeficientes de la matriz de correlación (correlación en transmisión, en recepción y cruzada) descritos en el apartado 4.3.

La correlación entre antenas receptoras se obtiene a partir de la autocorrelación de la trayectoria $s_i(x)$, lo que equivale a la correlación entre distintos receptores transmitiendo con un mismo transmisor:

$$\rho_{1m}^{2m}(0, \Delta r) = \langle s_m(x) s_m(x + \Delta r) \rangle = \frac{E[s_m(x + \Delta r)^* \cdot s_m(x)] - \mu_{s_m} \cdot \mu_{s_m}}{\sigma_{s_m} \cdot \sigma_{s_m}} \quad (4.33)$$

$E[\cdot]$ representa el valor esperado, $(\cdot)^*$ el complejo conjugado y σ_{xi} y μ_{xi} son la desviación típica y la media respectivamente de la señal $s_i(x)$. Los coeficientes r_1 y r_2 de la matriz de correlación se obtienen a partir de (4.33) para $m=1$ y $m=2$ respectivamente.

$$\begin{aligned} r_1 &= \rho_{11}^{21}(0, \Delta r) \\ r_2 &= \rho_{12}^{22}(0, \Delta r) \end{aligned} \quad (4.34)$$

Como se ha visto, la correlación en transmisión considera el mismo receptor pero diferentes transmisores, luego se representará por la correlación entre $s_i(x)$ y $s_j(x)$, con $i \neq j$. En los escenarios de interiores $j, i=1, 2, 3$, con $\Delta t=0.5\lambda$ o 1λ mientras que para escenarios exterior-interior $j, i=1, 2$ con $\Delta t=10\lambda$.

$$\rho_{n1}^{n2}(\Delta t, 0) = \langle s_1(x) s_2(x) \rangle = \frac{E[s_2(x)^* \cdot s_1(x)] - \mu_{s_1} \cdot \mu_{s_2}}{\sigma_{s_1} \cdot \sigma_{s_2}} \quad (4.35)$$

Los coeficientes de correlación t_1 y t_2 se obtienen de (4.35) para $n=1, 2$ respectivamente.

$$\begin{aligned} t_1 &= \rho_{11}^{12}(\Delta t, 0) = \langle s_i(x) s_j(x) \rangle \\ t_2 &= \rho_{21}^{22}(\Delta t, 0) = \langle s_i(x + \Delta r) s_j(x + \Delta r) \rangle \end{aligned} \quad (4.36)$$

Como $s_i(x)$ y $s_j(x)$ son procesos estacionarios en sentido amplio (WSS), la correlación no depende de la posición luego $t_1 = t_2 = t$.

El coeficiente de correlación cruzada no comparte ni transmisores ni receptores luego se calcula mediante dos señales $s_i(x)$ y $s_j(x)$, con $i \neq j$. Para el cálculo de s_1 se obtiene $\rho_{11}^{22}(\Delta t, \Delta r)$ según (4.37) mientras que para el cálculo de s_2 se obtiene $\rho_{12}^{21}(\Delta t, \Delta r)$ según (4.38).

$$\rho_{11}^{22}(\Delta t, \Delta r) = \langle s_1(x) s_2(x + \Delta r) \rangle = \frac{E[s_2(x + \Delta r) \cdot s_1(x)] - \mu_{s_1} \cdot \mu_{s_2}}{\sigma_{s_1} \cdot \sigma_{s_2}} \quad (4.37)$$

$$\rho_{21}^{12}(\Delta t, \Delta r) = \langle s_1(x + \Delta r) s_2(x) \rangle = \frac{E[s_2(x) \cdot s_1(x + \Delta r)] - \mu_{s_1} \cdot \mu_{s_2}}{\sigma_{s_1} \cdot \sigma_{s_2}} \quad (4.38)$$

Por las propiedades de la correlación cruzada, $s_1(\Delta r) = \rho_{11}^{22}(\Delta t, \Delta r) = \langle s_1(x), s_2(x + \Delta r) \rangle = \langle s_1(x - \Delta r), s_2(x) \rangle^* = \rho_{21}^{12}(\Delta t, -\Delta r)^* = s_2(-\Delta r)^*$; por tanto a partir del cálculo de s_1 se obtiene directamente s_2 mediante (4.39). La Figura 4.10 muestra la relación entre ambos coeficientes de correlación.

$$s_2(\Delta r) = s_1(-\Delta r) \quad (4.39)$$

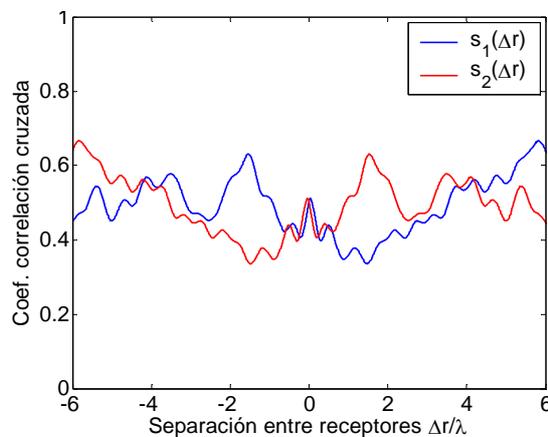


Figura 4.10. Ejemplo de la relación entre los coeficientes de correlación cruzada s_1 y s_2 .

4.6.2 Escenarios interiores

Los estudios preliminares realizados en ambos escenarios de interiores han mostrado que la correlación espacial presenta un carácter muy oscilante a medida que varía la separación entre elementos del array receptor; así, pequeñas variaciones en la separación entre antenas, puede llevar a una considerable variación en el valor de la correlación.

Esta variabilidad depende de la orientación relativa de las antenas así como de la presencia o no de línea de vista. La Figura 4.11 muestra un ejemplo de la variabilidad del módulo del coeficiente de correlación complejo medido para dos situaciones diferentes. Los resultados presentados se comparan con la correlación según el modelo de Clarke [9,22] definido según (4.24).

El modelo de Clarke define la correlación espacial entre antenas separadas una distancia Δr cuando el multicamino llega al receptor de manera isotrópica y uniforme en azimut. Este modelo es utilizado habitualmente para determinar la correlación espacial [9, 10]. Los resultados obtenidos presentan una oscilación mucho mayor que la función de Bessel de del modelo de Clarke. La diferencia entre el modelo teórico y el resultado medido muestra que efectivamente la dispersión azimutal de la potencia no cumple las condiciones de isotrópica ni uniforme.

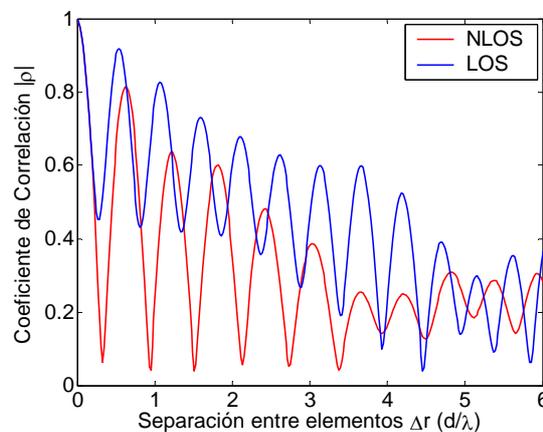


Figura 4.11. Ejemplos de la variabilidad del coeficiente de correlación al aumentar Δr para situaciones LOS y NLOS

Dado el carácter variable de la correlación, se realiza una caracterización estadística de la magnitud del coeficiente de correlación complejo. Se presentan los resultados de correlación en transmisión, en recepción y cruzada por medio de grupos de histogramas. Cada histograma evalúa la correlación existente para una separación entre antenas receptoras Δr en el rango $(x, x+0.5\lambda]$ para una separación entre antenas transmisoras. La separación mínima considerada entre antenas receptoras es 0.25λ , así el primer intervalo discurre entre 0.25λ y 0.75λ .

Para el cálculo de los histogramas de la correlación en recepción, para una orientación y un tipo de área dados, se agrupan los coeficientes de correlación obtenidos en todas las áreas locales del mismo tipo. Así en cada área del escenario Hall se combinan 36 coeficientes de correlación y en el escenario CDTUC, 18 coeficientes. Además cada intervalo dispone de 25 valores de coeficientes de correlación. Así, para el cálculo del histograma de cada intervalo se utilizan 900 valores en el escenario hall y 450 en el escenario CDTUC.

Para la correlación cruzada se combinan 12 coeficientes de correlación cruzada en el escenario Hall y 6 en el escenario CDTUC, con un total de 300 y 150 valores respectivamente considerados en cada intervalo.

Tal como se ha presentado en el capítulo 3, en los escenarios interiores el array transmisor dispone de tres elementos separados $\lambda/2$ para la frecuencia de trabajo de 2.4GHz. Esto permitirá estudiar separaciones entre los transmisores (Δt) de $\lambda/2$ y de λ .

4.6.2.1 Escenario Hall

El escenario hall es un escenario de interiores abierto, Figura 3.1, se ha seleccionado este escenario porque presenta pocos obstáculos próximos al transmisor y al receptor, es decir, poca riqueza de *scattering*.

a) Correlación en recepción

En las situaciones LOS, la correlación en recepción presenta una notable influencia de la orientación relativa entre arrays, Tabla 4.2 y Figura 4.12. La orientación perpendicular, la cual tiende a *inline*, presenta valores de correlación elevados, con un valor medio de 0.74 en el primer intervalo, que descienden lentamente al aumentar la separación entre receptores, Δr . Así para $\Delta r=3\lambda$ el valor medio de la correlación es superior a 0.5.

Por su parte, la orientación paralela, donde la incidencia del rayo directo es prácticamente de tipo *broadside* también presenta un valor medio elevado pero que cae rápidamente al aumentar Δr .

La alta correlación observada para separaciones pequeñas es debida a la presencia del rayo directo que predomina sobre el resto de componentes. Esta componente principal condiciona las características del PAS reduciendo la dispersión angular. Así será necesario separar significativamente las antenas receptoras para compensar la influencia de la línea de vista en la correlación.

En las situaciones NLOS, Figura 4.13 y Tabla 4.2, las componentes multicamino son más uniformes en potencia y alcanzan al receptor desde un mayor rango de direcciones. Esta mayor dispersión en la dirección permite que la correlación, incluso para separaciones pequeñas entre receptores, sea baja, menor o igual a 0.5. La ausencia del rayo directo, reduce la dependencia de la correlación con la orientación, presentando para ambas orientaciones un comportamiento similar.

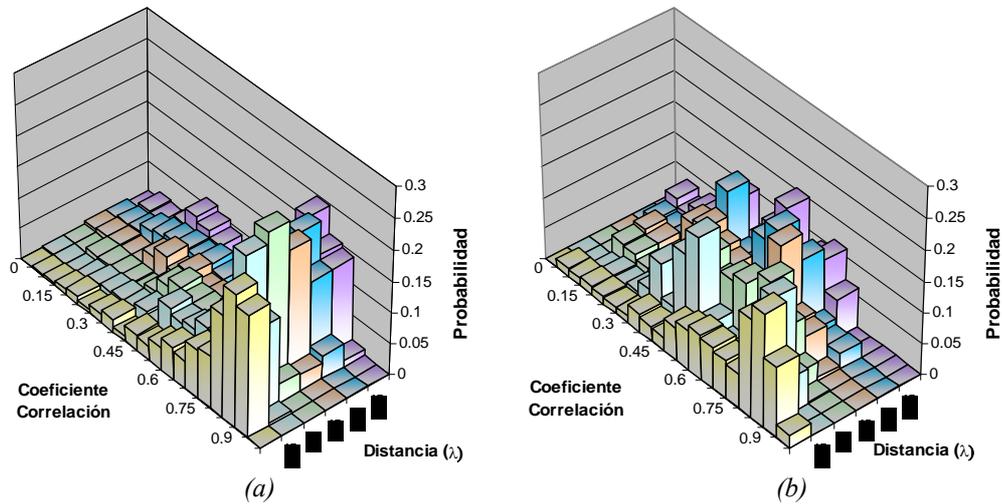


Figura 4.12. Correlación en recepción en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área LOS del escenario Hall

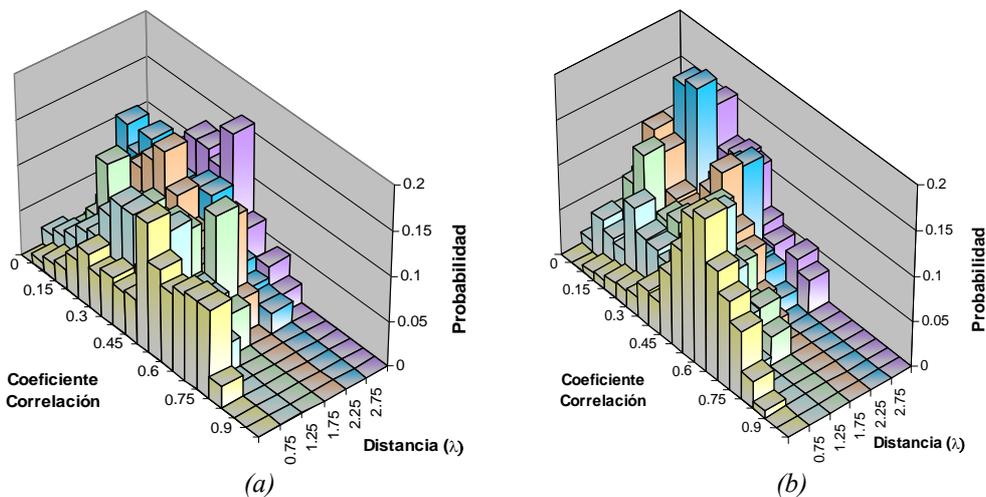


Figura 4.13. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área NLOS del escenario Hall

Intervalos	0.25λ, 0.75λ	0.75λ, 1.25λ	1.25λ, 1.75λ	1.75λ, 2.25λ	2.25λ, 2.75λ	2.75λ, 3.25λ		
Media	0.74	0.67	0.64	0.61	0.58	0.57	Perpendicular	LOS
Desv. Tip.	0.18	0.17	0.18	0.20	0.22	0.21		
Media	0.68	0.57	0.54	0.48	0.48	0.44	Paralelo	
Desv. Tip.	0.21	0.19	0.17	0.18	0.16	0.18		
Media	0.51	0.39	0.37	0.31	0.28	0.29	Perpendicular	NLOS
Desv. Tip.	0.19	0.18	0.17	0.15	0.16	0.14		
Media	0.56	0.40	0.35	0.28	0.26	0.27	Paralelo	
Desv. Tip.	0.15	0.18	0.19	0.15	0.13	0.15		

Tabla 4.2. Estadística de los coeficientes de correlación en recepción en el escenario Hall

La distancia de correlación, cuya estadística se presenta en la Figura 4.14, representa la separación necesaria para que la correlación alcance un cierto valor umbral, 0.5, 0.7 ó 0.9 son umbrales típicos. La estadística presentada indica la probabilidad de que la correlación sea menor o igual que el umbral fijado al separar las antenas receptoras una distancia Δr .

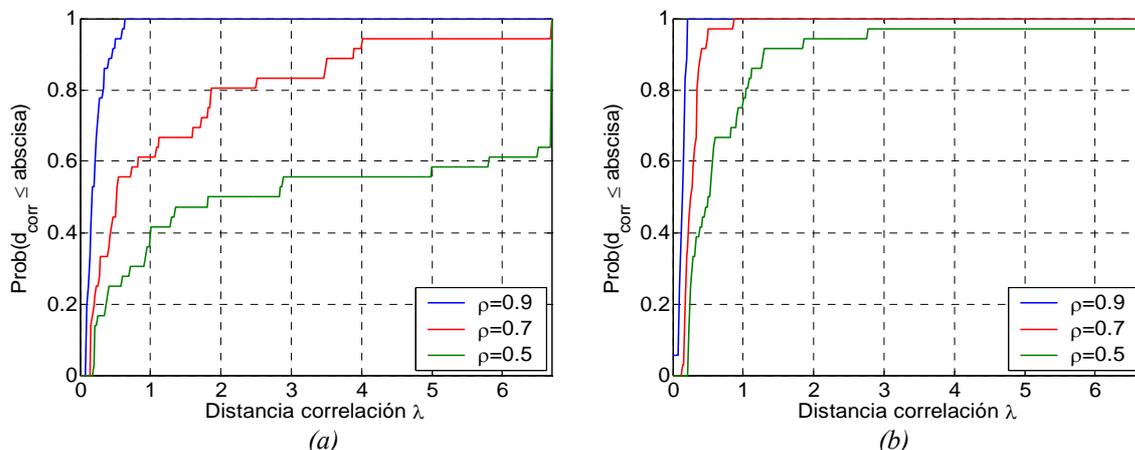


Figura 4.14. Función de distribución de probabilidad acumulada de la distancia de correlación en recepción en los áreas LOS (a) y NLOS (b) para distintos umbrales en el escenario Hall

Así se observa que, para las áreas LOS, la distancia de correlación para un umbral 0.9 es inferior a 0.65λ en el 100% de los casos, mientras que si el umbral es más restrictivo, la distancia de correlación aumenta. Así en el 90% de los casos $d_{\text{corr},0.7}$ es ligeramente inferior a 4λ mientras que $d_{\text{corr},0.5}$ es superior a 6.5λ . Dado que en muchos equipos receptores la distancia máxima entre antenas receptoras es reducida, se tiene que asumir un cierto grado de correlación. Así si las antenas receptoras se separan únicamente 0.5λ la correlación será inferior a 0.7 únicamente en el 45% de los casos, es decir, la correlación será alta, superior a 0.7, en el 55% de las ocasiones.

Las áreas NLOS presentan mejores valores de distancia de correlación para los tres umbrales. Así en el 90% de los casos $d_{\text{corr},0.9}=0.2\lambda$, $d_{\text{corr},0.7}=0.4\lambda$ y $d_{\text{corr},0.5}=1.3\lambda$. Para la separación típica de 0.5λ entre antenas receptoras la correlación será inferior a 0.7 en el 95% de los casos.

b) Correlación en transmisión y correlación cruzada

La correlación cruzada y en transmisión también presenta la dependencia con la orientación y la presencia de línea de vista observada para la correlación en recepción. Así para situaciones LOS con orientación perpendicular, se observa que la correlación cruzada no varía al aumentar la separación entre receptores, presentando un comportamiento similar, con un valor medio entorno a 0.63, Tabla 4.3 y Figura 4.15a. Al

pasar a orientación paralela, Figura 4.15b, la correlación cruzada sí presenta una ligera disminución al aumentar Δr , permitiendo caídas de 0.2 para separaciones entre receptores altas.

Por su parte, la estadística de la correlación en transmisión, obtenida para separaciones entre receptores próximas a cero, muestra valores medios de 0.63 para ambas orientaciones.

Al aumentar la separación entre transmisores, Δt , la orientación perpendicular muestra un comportamiento de la correlación cruzada y en transmisión similar a la situación anterior, mientras que con la orientación paralela, el incremento en Δt se refleja en una ligera mejoría de la correlación, principalmente para separaciones pequeñas entre receptores.

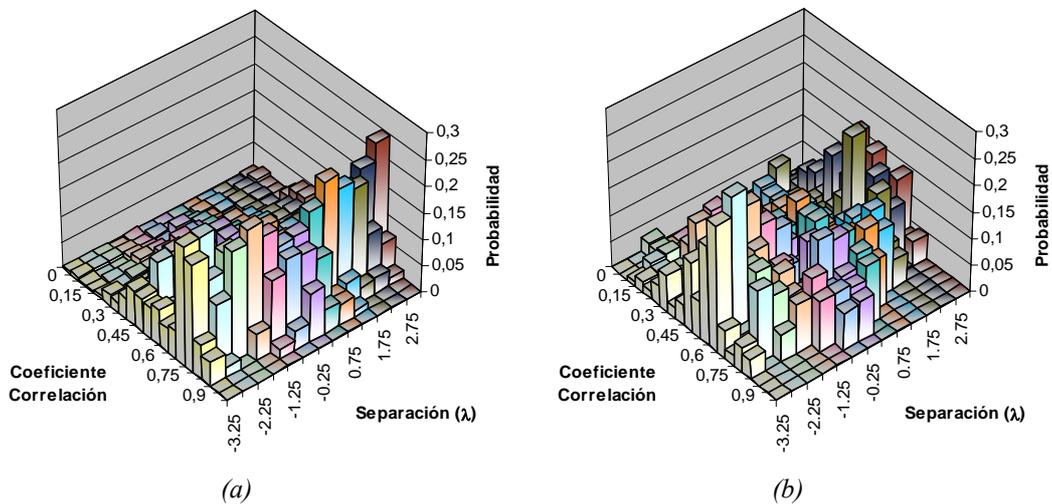


Figura 4.15. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área LOS del escenario Hall

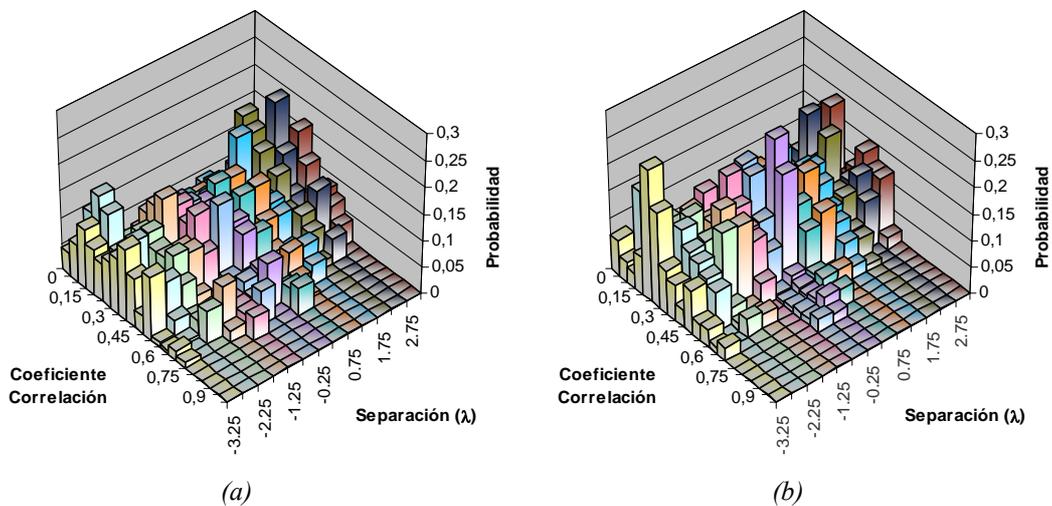


Figura 4.16. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área NLOS del escenario Hall

Intervalos	-2.75 λ , -2.25 λ	-2.25 λ , -1.75 λ	-1.75 λ , -1.25 λ	-1.25 λ , -0.75 λ	-0.75 λ , -0.25 λ	-0.25 λ , 0.25 λ	0.25 λ , 0.75 λ	0.75 λ , 1.25 λ	1.25 λ , 1.75 λ	1.75 λ , 2.25 λ	2.25 λ , 2.75 λ
media	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.63	0.62	0.62	0.63	0.63	0.61
desv. Tip.	0.17	0.18	0.20	0.22	0.23	0.24	0.22	0.20	0.18	0.17	0.17
media	0.53	0.51	0.53	0.56	0.61	0.63	0.59	0.54	0.51	0.47	0.41
desv. Tip.	0.16	0.20	0.20	0.21	0.22	0.20	0.20	0.20	0.21	0.19	0.17
media	0.63	0.65	0.64	0.64	0.63	0.61	0.57	0.56	0.57	0.59	0.61
desv. Tip.	0.17	0.17	0.18	0.19	0.21	0.22	0.24	0.25	0.23	0.20	0.17
media	0.61	0.63	0.62	0.63	0.54	0.50	0.51	0.45	0.42	0.43	0.43
desv. Tip.	0.20	0.13	0.19	0.18	0.23	0.28	0.26	0.21	0.17	0.13	0.12

Tabla 4.3. Estadística de los coeficientes de correlación cruzada $s_1(\Delta r)$ (o $s_2(-\Delta r)$) en áreas LOS del escenario Hall

En las áreas NLOS la correlación cruzada presenta una tendencia similar a la correlación en recepción. Así los valores medios del coeficiente de correlación son significativamente más pequeños que en las áreas LOS, con comportamientos similares para ambas orientaciones. Para separaciones pequeñas la correlación adquiere valores entorno a 0.36 cayendo ligeramente al aumentar Δr . Al aumentar la separación entre transmisores a 1λ , la correlación cruzada y en transmisión prácticamente no presenta prácticamente variaciones.

Intervalos	-2.75 λ , -2.25 λ	-2.25 λ , -1.75 λ	-1.75 λ , -1.25 λ	-1.25 λ , -0.75 λ	-0.75 λ , -0.25 λ	-0.25 λ , 0.25 λ	0.25 λ , 0.75 λ	0.75 λ , 1.25 λ	1.25 λ , 1.75 λ	1.75 λ , 2.25 λ	2.25 λ , 2.75 λ
media	0.23	0.34	0.36	0.36	0.36	0.36	0.34	0.33	0.31	0.29	0.28
desv. Tip.	0.16	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18	0.19	0.16	0.18	0.14	0.15
media	0.27	0.29	0.30	0.29	0.32	0.37	0.34	0.30	0.33	0.31	0.28
desv. Tip.	0.15	0.14	0.13	0.12	0.14	0.17	0.17	0.15	0.14	0.14	0.14
media	0.22	0.23	0.30	0.26	0.31	0.35	0.30	0.27	0.35	0.32	0.28
desv. Tip.	0.15	0.17	0.18	0.14	0.16	0.13	0.12	0.10	0.15	0.15	0.12
media	0.30	0.34	0.33	0.36	0.34	0.29	0.32	0.35	0.28	0.25	0.28
desv. Tip.	0.13	0.08	0.16	0.14	0.12	0.11	0.15	0.17	0.13	0.12	0.12

Tabla 4.4. Estadística de los coeficientes de correlación cruzada $s_1(\Delta r)$ (o $s_2(-\Delta r)$) en áreas NLOS del escenario Hall

4.6.2.2 Escenario CDTUC

El entorno CDTUC es un escenario de oficinas típico, Figura 3.3. En la situación LOS, transmisor y receptor se encuentran en el pasillo que comunica las oficinas mientras que en la situación NLOS el receptor se encuentra en el interior de las oficinas.

a) Correlación en recepción

Las áreas con línea de vista presentan un comportamiento de la correlación muy particular. Cuando ambos arrays se encuentran con orientación perpendicular, donde el rayo directo incide de manera *inline*, se obtienen unos valores de correlación muy

elevados dado que la propagación está dominada por el efecto determinístico de propagación en guía de onda [33]. Los valores de correlación se concentran para el primer intervalo entre 0.8 y 1. A medida que aumenta la separación entre antenas receptoras, dicha correlación cae muy lentamente, bajando el valor medio de 0.84 en el primer intervalo hasta 0.68 para una separación alta, 3λ .

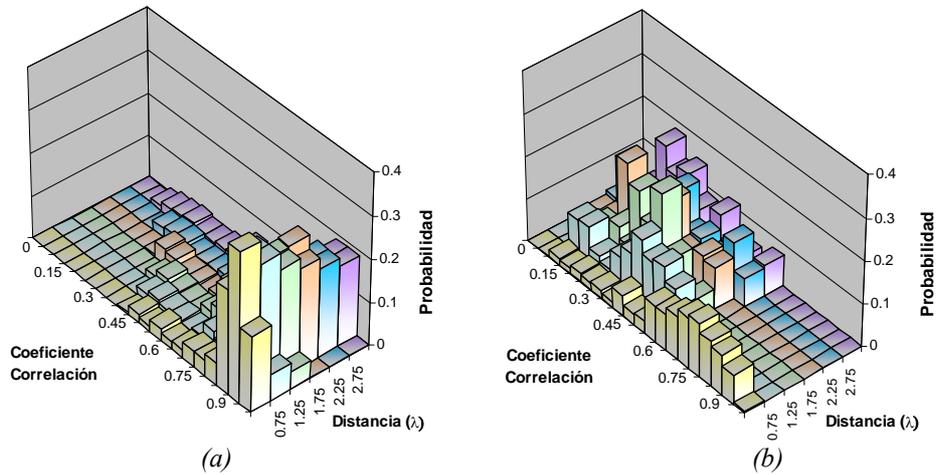


Figura 4.17. Función de auto-correlación en recepción en función de la separación entre antenas receptoras para orientación broadside (a) e inline (b) en el área LOS del escenario CDTUC

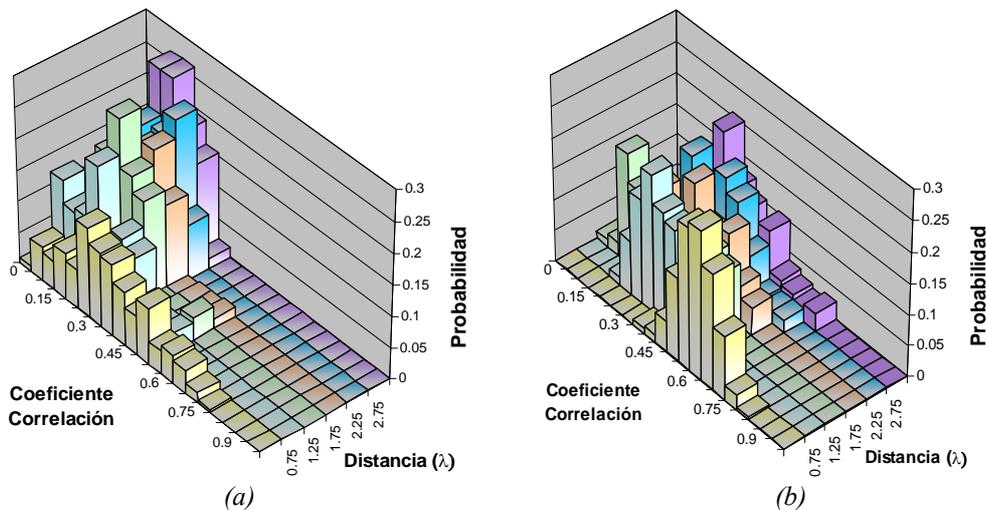


Figura 4.18. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralelo (b) en el área NLOS del escenario CDTUC

Intervalos	0.25 λ , 0.75 λ	0.75 λ , 1.25 λ	1.25 λ , 1.75 λ	1.75 λ , 2.25 λ	2.25 λ , 2.75 λ	2.75 λ , 3.25 λ		
Media	0.84	0.81	0.78	0.75	0.72	0.68	Perpendicular	LOS
Desv. Tip.	0.12	0.13	0.14	0.17	0.19	0.22		
Media	0.65	0.38	0.34	0.32	0.31	0.29	Paralelo	LOS
Desv. Tip.	0.19	0.15	0.11	0.14	0.18	0.16		
Media	0.34	0.22	0.22	0.20	0.18	0.15	Perpendicular	NLOS
Desv. Tip.	0.17	0.12	0.09	0.09	0.08	0.07		
Media	0.59	0.34	0.27	0.30	0.31	0.31	Paralelo	NLOS
Desv. Tip.	0.08	0.09	0.14	0.14	0.12	0.14		

Tabla 4.5. Estadística de los coeficientes de correlación en recepción en el escenario CDTUC.

Al situar el array receptor paralelo al array transmisor, situación *broadside*, la correlación presenta un comportamiento muy diferente. Para separaciones pequeñas entre antenas receptoras, la correlación se concentra entorno a 0.65 con una desviación típica considerable. Sin embargo, al aumentar Δr dicho valor medio cae más de un 40% proporcionando valores de correlación pequeños.

Para las áreas NLOS, la correlación en recepción presenta en general un comportamiento similar. Así, con orientación perpendicular la correlación adquiere valores pequeños, 0.34 para el primer intervalo que rápidamente cae entorno a 0.2 para el resto de separaciones. Para la orientación paralela, la correlación se centra en 0.6 en el primer intervalo que cae rápidamente para los siguientes intervalos.

Se presenta en la Figura 4.19 la función de probabilidad acumulada de la distancia de correlación tanto para el área LOS como NLOS. Se observa como en el área LOS, la correlación se sitúa por debajo de 0.9 es sobrepasado en la totalidad de las ocasiones para separaciones entre elementos receptores entorno a 0.4λ . Sin embargo, para umbrales menores y más restrictivos, en el 60% de los casos la separación entre receptores para que la correlación sea menor o igual de 0.7 es aproximadamente de 0.8λ , pero para conseguir un porcentaje más alto requiere separaciones entre elementos mucho mayores. En este caso, las orientaciones paralelas contribuyen a aumentar el porcentaje de distancias de correlación pequeñas mientras que las orientaciones perpendiculares hacen el efecto contrario.

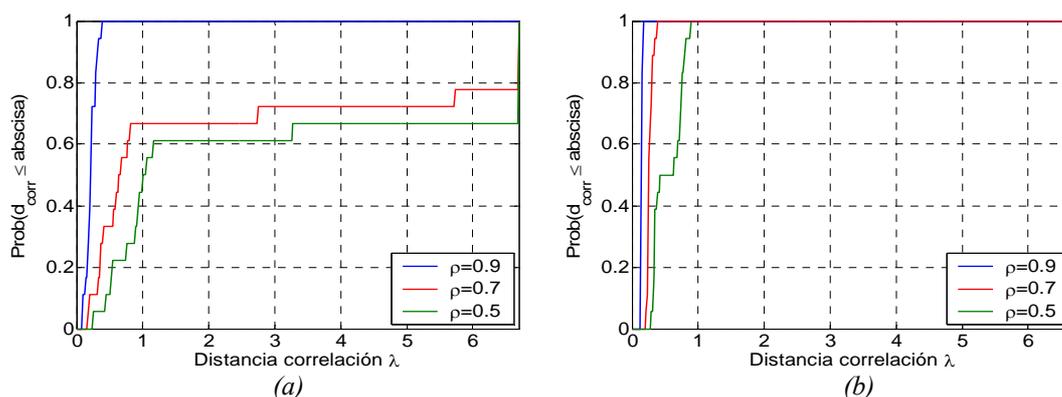


Figura 4.19. Función de distribución de probabilidad acumulada de la distancia de correlación en recepción en los áreas LOS (a) y NLOS (b) para distintos umbrales en el escenario CDTUC

Para las áreas tipo NLOS, se consigue un comportamiento muy descorrelado que se refleja en las distancias de correlación tan bajas para los tres umbrales de correlación. Así en el 90% de los casos la distancia de correlación es de 0.17λ para el umbral de 0.9, 0.34λ para el umbral de 0.7 y 0.8λ para el umbral de 0.5.

b) Correlación en transmisión y correlación cruzada

El efecto que presenta la correlación en recepción se refleja también en la correlación cruzada. En las áreas LOS, con orientación perpendicular, se observa que la probabilidad en los histogramas se concentra en los valores altos de correlación. Para pequeños Δr se obtienen unos valores medios de correlación entre 0.7 y 0.75. Dada la asimetría de la correlación cruzada, valores de Δr positivos conllevan un ligero aumento de la correlación mientras que valores negativos permiten el efecto contrario.

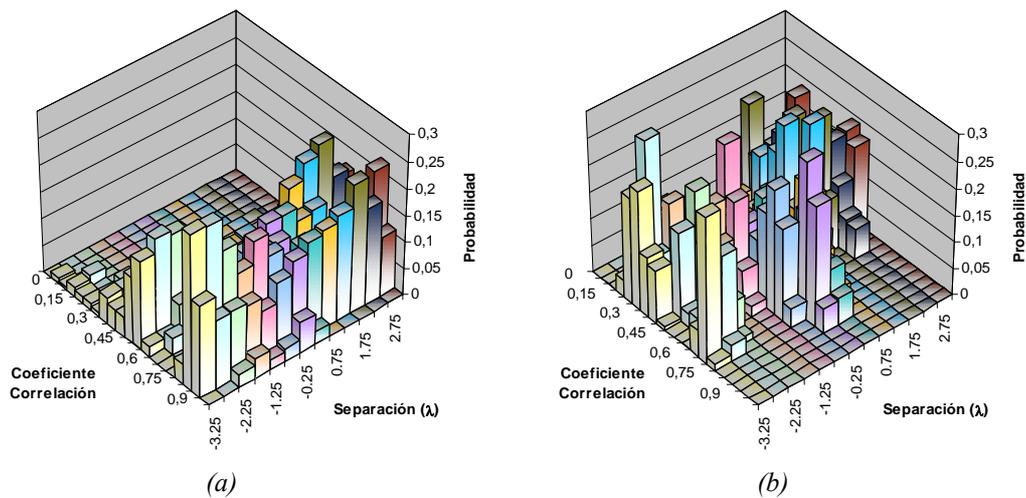


Figura 4.20. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralelo (b) en el área LOS del escenario CDTUC

Para la orientación paralela, los canales presentan un comportamiento mucho menos correlado, con un valor medio de correlación en transmisión de 0.49. Para valores de Δr negativos el coeficiente de correlación disminuye y se mantiene en el rango de 0.3, mientras que para valores positivos cae gradualmente de 0.61 hasta 0.24.

Intervalos	-2.75λ	-2.25λ	-1.75λ	-1.25λ	-0.75λ	-0.25λ	0.25λ	0.75λ	1.25λ	1.75λ	2.25λ	2.75λ
media	0.66	0.66	0.68	0.69	0.70	0.74	0.76	0.74	0.73	0.73	0.72	
desv. Tip.	0.23	0.21	0.20	0.18	0.16	0.14	0.13	0.14	0.14	0.15	0.15	
media	0.38	0.38	0.33	0.29	0.34	0.49	0.61	0.52	0.41	0.32	0.24	
desv. Tip.	0.19	0.19	0.18	0.12	0.14	0.19	0.17	0.18	0.17	0.11	0.16	
media	0.63	0.62	0.61	0.61	0.61	0.62	0.63	0.62	0.63	0.64	0.65	
desv. Tip.	0.21	0.21	0.21	0.21	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18	0.18	
media	0.16	0.19	0.35	0.35	0.28	0.31	0.35	0.37	0.42	0.31	0.38	
desv. Tip.	0.03	0.05	0.14	0.08	0.15	0.09	0.07	0.08	0.03	0.12	0.09	

Tabla 4.6. Estadística de los coeficientes de correlación cruzada, en intervalos de 0.5λ en áreas LOS

El aumento de la separación entre antenas transmisoras permite una reducción de la correlación, más significativa en el intervalo central, el cual representa la correlación en transmisión, y para valores de Δr positivos.

En las áreas NLOS, el comportamiento para ambas orientaciones es muy similar, presentando en ambos caso valores medios pequeños con una desviación típica inferior a 0.1. Al aumentar la separación entre antenas transmisoras, la correlación en el intervalo central disminuye para ambas orientaciones, aunque presentando una ligera oscilación a medida que aumenta la separación entre antenas receptoras.

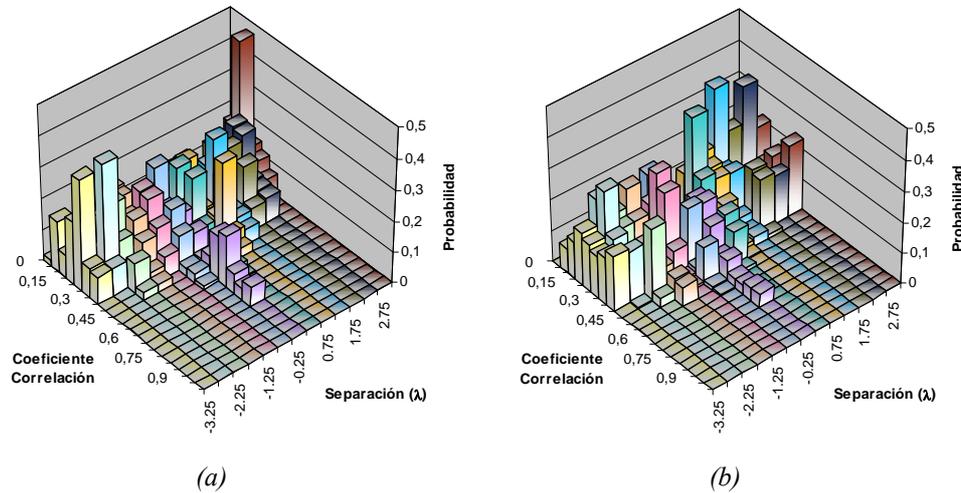


Figura 4.21. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación broadside (a) e inline (b) en el área NLOS del escenario CDTUC

Intervalos	-2.75 λ , -2.25 λ	-2.25 λ , -1.75 λ	-1.75 λ , -1.25 λ	-1.25 λ , -0.75 λ	-0.75 λ , -0.25 λ	-0.25 λ , 0.25 λ	0.25 λ , 0.75 λ	0.75 λ , 1.25 λ	1.25 λ , 1.75 λ	1.75 λ , 2.25 λ	2.25 λ , 2.75 λ	
media	0.17	0.20	0.19	0.19	0.20	0.23	0.42	0.20	0.22	0.19	0.20	+ - - - - - - - - - - - $\Delta t=0.5\lambda$
desv. Tip.	0.08	0.07	0.10	0.09	0.08	0.11	0.17	0.12	0.13	0.10	0.09	
media	0.22	0.23	0.22	0.23	0.25	0.25	0.38	0.28	0.19	0.19	0.21	+ - - - - $\Delta t=1\lambda$
desv. Tip.	0.10	0.07	0.14	0.12	0.07	0.12	0.14	0.10	0.09	0.07	0.10	
media	0.14	0.07	0.15	0.24	0.27	0.21	0.22	0.18	0.13	0.17	0.17	+ - - $\Delta t=1\lambda$
desv. Tip.	0.10	0.05	0.07	0.09	0.07	0.06	0.14	0.08	0.09	0.12	0.05	
media	0.19	0.19	0.30	0.36	0.28	0.18	0.11	0.19	0.31	0.36	0.29	+ - - $\Delta t=1\lambda$
desv. Tip.	0.11	0.14	0.09	0.17	0.15	0.10	0.07	0.14	0.17	0.15	0.10	

Tabla 4.7. Estadística de los coeficientes de correlación cruzada, en intervalos de 0.5λ en áreas NLOS

4.6.2.3 Conclusiones escenarios interiores

Una vez analizada la correlación en canales MIMO, considerando diferentes entornos interiores (área abierta con pocos obstáculos y zona de oficinas), diferentes orientaciones relativas de los arrays y situaciones con y sin línea de vista se pueden destacar las características presentadas a continuación.

La función de correlación es muy variable con respecto de la distancia, así una pequeña variación en el espaciado entre elementos puede producir una variación considerable en el valor de correlación. Este efecto se aprecia principalmente en situaciones LOS donde el array receptor está perpendicular al array transmisor. El carácter oscilante de la correlación viene definido por el propio modelo de Clarke..

Por otra parte, la posición de estos máximos y mínimos en la función de correlación está muy ligada a la posición relativa de los array y al entorno en sí. Por este motivo el estudio de la distancia de correlación debe realizarse de manera estadística. La distancia de correlación óptima para un cierto caso se obtendría partiendo de la distancia de correlación estimada por la estadística y modificando ligeramente la separación de las antenas, buscando así mínimos locales de la función de correlación [34, 35].

Se ha observado que la influencia del escenario en el PAS lleva a obtener valores de correlación mayores de los esperados según el modelo de Clarke. En este modelo con PAS uniforme y omnidireccional, la correlación deja de ser significativa para separaciones entre antenas receptoras de 0.4λ . Sin embargo las tablas presentadas muestran valores de correlación elevados 0.8-0.7 para separaciones de 1.25λ o incluso mayores.

Otra característica obtenida de los resultados mostrados es la gran dependencia de la correlación con la orientación relativa entre los arrays lineales. Se observa que en la situación in-line, cuando ambos arrays son perpendiculares, la correlación decrece mas lentamente y con un comportamiento más oscilante. Este efecto, coincide con los observados por Lee [32] en exteriores y por [9] a través de simulaciones en escenarios interiores. Esta dependencia con la orientación hace aconsejable la utilización de arrays con otras topologías como puede ser la circular [23] o la hexagonal [9] que sean independientes del ángulo de llegada de la señal.

Se puede observar como las trayectorias con línea de vista están más correladas que las NLOS. Esto es debido a que en LOS el rayo directo destaca sobre las componentes multicamino, por lo que los canales se descorrelan más despacio que en NLOS que presenta componentes multicamino más uniformes, agilizando la descorrelación al aumentar la separación entre los elementos del array.

En el escenario CDTUC, la propagación se caracteriza por un efecto de guía de onda que dificulta la independencia entre subcanales a pesar de distanciar más de 2λ las antenas receptoras. En el escenario Hall, la correlación presenta un comportamiento menos crítico, con valores elevados para pequeñas separaciones entre elementos receptores, pero que cae lentamente al aumentar esa separación.

En interiores se ha observado como la separación entre transmisores es muy influyente para la correlación cruzada. Así para separaciones entre transmisores de 0.5λ la correlación cruzada presenta un comportamiento similar aunque la separación entre receptores aumente hasta 3λ . Sin embargo al aumentar la separación entre receptores a 1λ , la correlación sufre una caída más significativa.

4.6.3 Escenarios exteriores-interiores

En este tipo de escenarios, el array transmisor se encuentra prácticamente aislado de elementos dispersores, situación que incrementa la correlación en transmisión. Para reducir dicha correlación se aumenta la separación entre antenas transmisoras [7]. A diferencia del equipo de usuario, la estación base permite una mayor separación entre antenas transmisoras que reduzca lo más posible la correlación en transmisión. Como se presentó en el capítulo anterior en la realización de las medidas se utilizó un array transmisor de dos elementos separados una distancia considerable, 10λ .

Así la correlación dependerá principalmente del entorno que rodea al array receptor y de la configuración del mismo. En este apartado se analiza la influencia de la correlación en tres escenarios de diferentes características: un escenario diáfano, un escenario de oficinas y un escenario de laboratorios más cerrado y con múltiples elementos rodeando al receptor.

El sistema de medida en banda estrecha utilizado en estos escenarios presenta una deriva aleatoria de fase a lo largo de la trayectoria que impide obtener medidas coherentes del canal y por tanto no permite calcular la correlación compleja en función de la separación de los elementos receptores. Por este motivo en estos escenarios exteriores-interiores se estudia la correlación de envolvente.

Estudios preliminares sobre la correlación en estos escenarios indican que la correlación presenta al incrementar la separación entre antenas receptoras (Δr) un comportamiento menos variable que en los escenarios de interiores. Así en estos escenarios se analiza directamente los coeficientes de correlación en transmisión, en recepción y cruzada en función de Δr en vez de realizar un análisis estadístico como en los escenarios interiores.

4.6.3.1 Escenario oficinas

El escenario de oficinas, Figura 3.8, es un entorno con gran número de obstáculos rodeando al receptor que aportan gran riqueza de *scattering*.

a) *Correlación en recepción*

En el área LOS, la orientación relativa influye ligeramente en el comportamiento de la correlación al aumentar la separación entre antenas receptoras. Así para la orientación perpendicular, Figura 4.22a, la correlación cae lentamente a medida que aumenta la

separación entre antenas receptoras, mientras que para la orientación paralela, Figura 4.22b, la correlación cae de manera más rápida.

Al pasar a situaciones sin línea de vista, el comportamiento de la correlación es muy similar, tanto para los escenarios NLOS como para los escenarios HNLOS. El coeficiente de correlación sufre una rápida caída al aumentar la separación entre receptores. A partir de una separación mayor de 0.5λ presenta un comportamiento variable pero en un rango de valores de correlación muy por bajo, inferior a 0.5, y por tanto poco significativo. Es importante subrayar que para ambas áreas NLOS y HNLOS la orientación relativa entre los arrays no es relevante, dado que aunque para la orientación perpendicular la oscilación para $\Delta r > 0.5\lambda$ es ligeramente más rápida que para la orientación paralela, los valores entre los que oscila la correlación son del mismo rango.

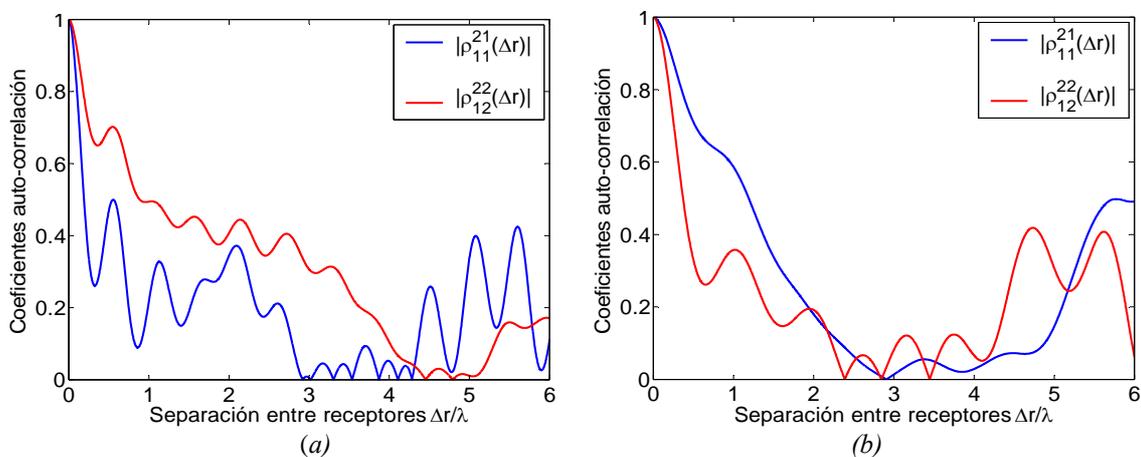


Figura 4.22. Correlación en recepción en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área OLOS del escenario oficinas

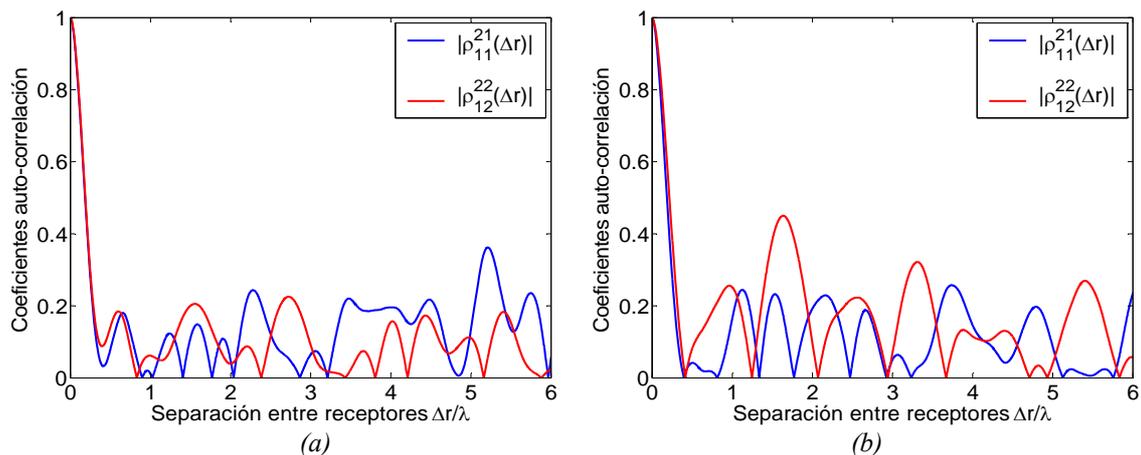


Figura 4.23. Correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área NLOS del escenario oficinas

b) Correlación en transmisión y correlación cruzada

En las áreas LOS, la correlación en transmisión para ambas orientaciones presenta valores altos, ligeramente por encima de 0.6. La correlación cruzada por su parte presenta

un comportamiento diferente para cada una de las orientaciones. En la orientación perpendicular, la correlación es más oscilante y cae lentamente al aumentar Δr en el sentido negativo, mientras que presenta una caída más rápida al aumentar en sentido positivo. Con la orientación paralela, la correlación cruzada es menos oscilante y presenta una caída de mayor pendiente para ambos sentidos de incremento de separación de antenas una caída de mayor pendiente.

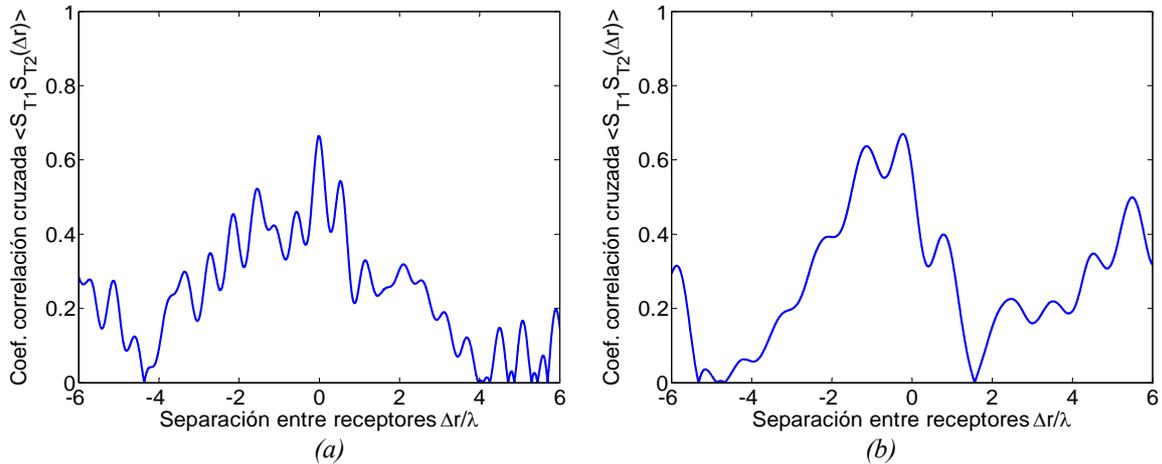


Figura 4.24. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área OLOS del escenario oficinas

Es importante destacar la asimetría marcada que presenta la correlación cruzada para separaciones menores de 2λ . Esta asimetría lleva a valores de s_1 y s_2 dispares.

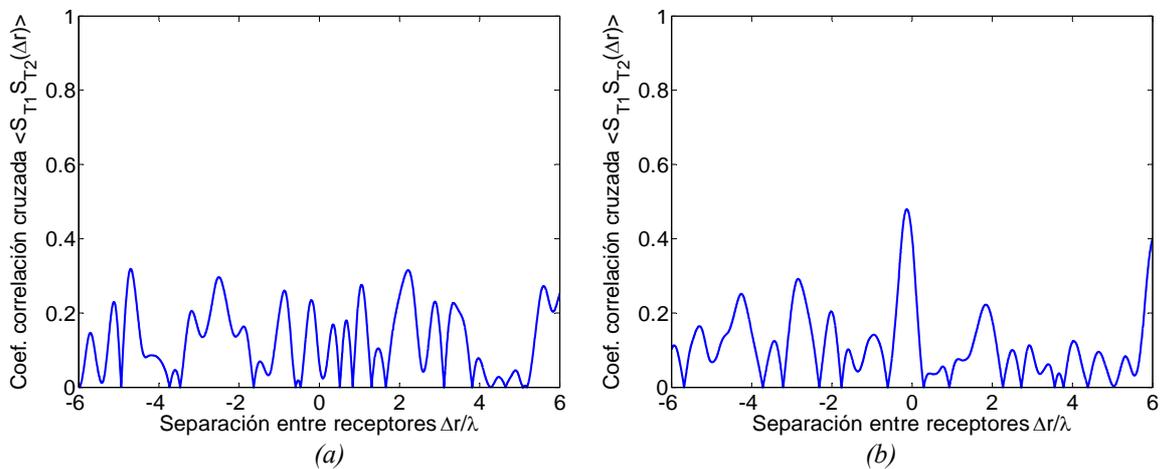


Figura 4.25. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área NLOS del escenario oficinas

En los escenarios NLOS y HNLOS la simetría es mayor que en el caso anterior. Los coeficientes de correlación cruzada presentan un comportamiento variable aunque en un rango de valores bajo, por debajo de 0.3, para todo el conjunto de separaciones entre receptores. La única diferencia entre las orientaciones se observa en la correlación en transmisión donde la orientación paralela presenta un valor próximo a 0.5 mientras que en la orientación perpendicular es prácticamente nula.

4.6.3.2 Escenario laboratorios

El área de laboratorios es un escenario que, al igual que el escenario de oficinas, presenta gran número de obstáculos, en este caso más próximos al receptor y de características diferentes, ver Figura 3.6. A diferencia del escenario anterior, presenta unas ventanas de pequeñas dimensiones y una fachada exterior recubierta por láminas de aluminio que reduce la diversidad de componentes que entran del exterior.

a) Correlación en recepción

La correlación en recepción presenta en el escenario de laboratorios un comportamiento poco variable para ambas orientaciones en situaciones con línea de vista. Para la orientación perpendicular, la correlación cae lentamente encontrándose por debajo de 0.5 para distancias superiores a 1.5λ . Para la orientación paralela, la correlación presenta una caída aun más suave al aumentar la separación entre receptores. Esta caída tan lenta provoca que el coeficiente de correlación no se encuentre por debajo de 0.5 hasta alcanzar separaciones de casi 4λ .

En este escenario las áreas NLOS y HNLOS presentan un comportamiento similar solo para la orientación paralela. Para esta orientación paralela, el coeficiente de correlación presenta una rápida caída y luego oscila en un rango de valores inferiores a 0.2 y por tanto poco significativos. Sin embargo, para la orientación perpendicular, en el área NLOS la correlación presenta unos valores bajos para separaciones entorno a 1λ pero luego se mantiene e incluso crece manteniéndose en valores entre 0.5 y 0.2 hasta separaciones Δr altas. En el área HNLOS, la correlación presenta un comportamiento similar a la orientación paralela.

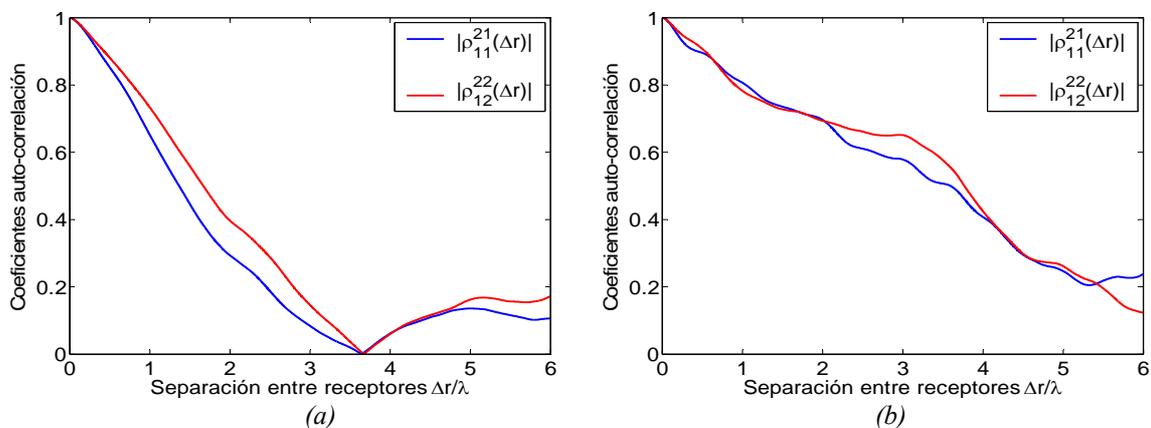


Figura 4.26. Función de auto-correlación en recepción en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área OLOS del escenario laboratorios

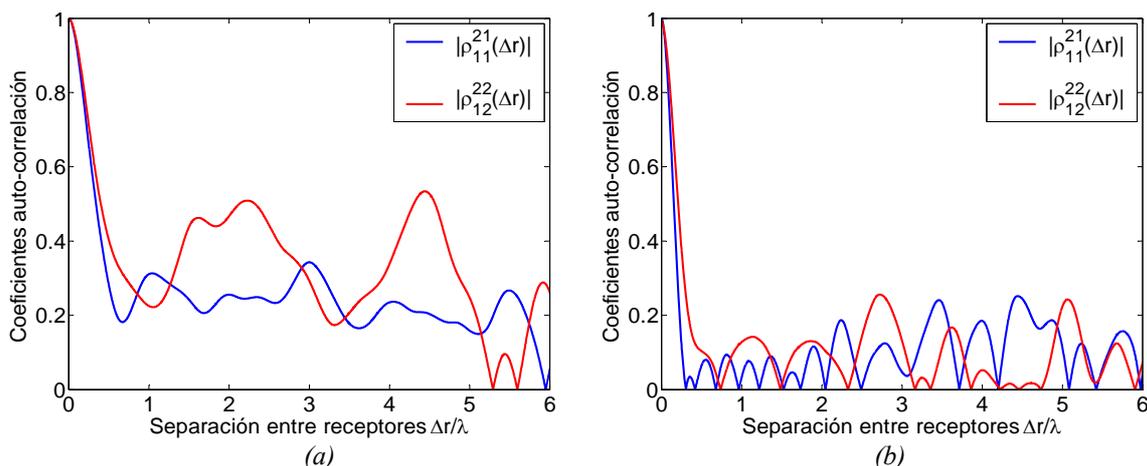


Figura 4.27. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área NLOS del escenario laboratorios

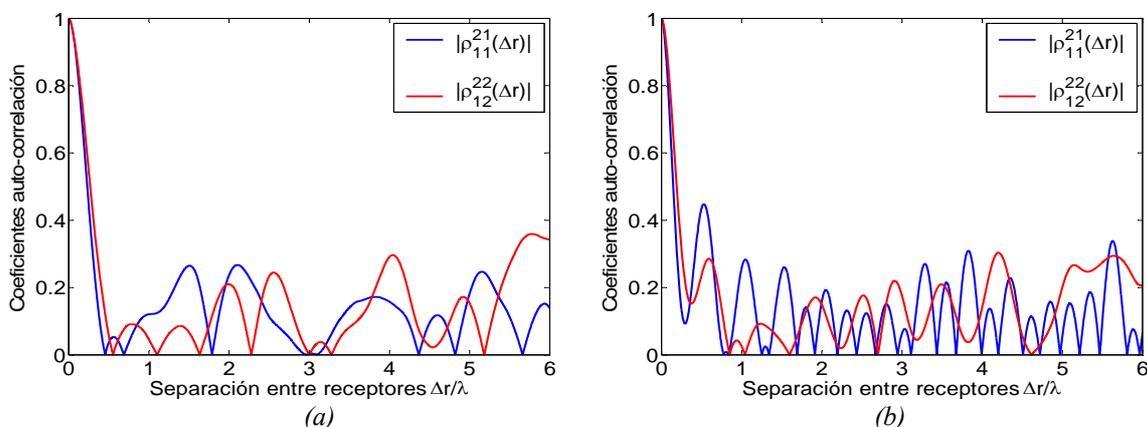


Figura 4.28. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área HNLOS del escenario laboratorios

b) Correlación en transmisión y correlación cruzada

En áreas LOS, en ambas orientaciones, la correlación en transmisión presenta valores muy altos, cercanos a 0.95. Esta correlación tan elevada es debida a que la ventana del laboratorio es pequeña 1m^2 y la fachada de la planta del edificio donde se encuentra el laboratorio está recubierta por una plancha metálica que limita las componentes que pasan al interior del escenario. La correlación cruzada en el área OLOS para la orientación perpendicular, presenta una caída simétrica para separación entre receptores en ambos sentidos, bajando por debajo 0.5 para separaciones entre antenas receptoras $\Delta r=2\lambda$. Para la orientación paralela, la caída es más suave, presentando altas distancias de correlación, prácticamente 4λ .

La correlación en transmisión para las áreas NLOS y HNLOS presenta comportamientos diferentes. Así, en el área NLOS con orientación perpendicular, se observa un valor de correlación en transmisión alto, 0.65. Sin embargo al pasar a la orientación paralela este coeficiente desciende hasta 0.4. Para el área HNLOS, la correlación en transmisión adquiere valores bajos, por debajo de 0.4.

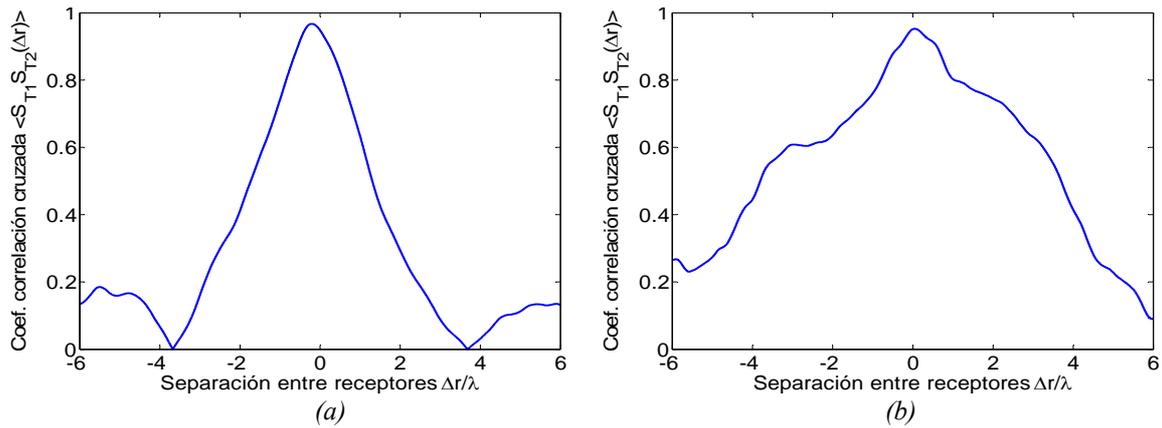


Figura 4.29. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área OLOS del escenario laboratorios

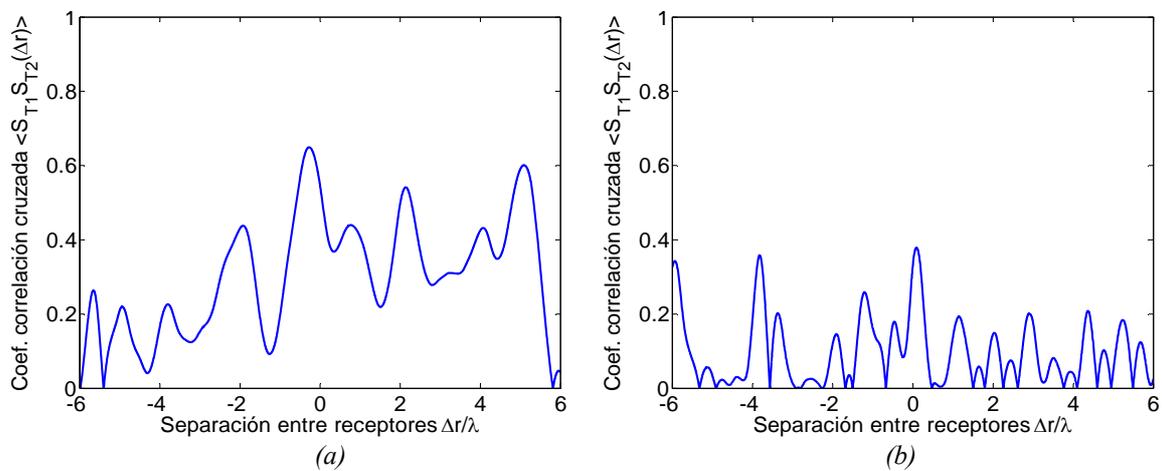


Figura 4.30. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área NLOS del escenario laboratorios

Por otra parte, la correlación cruzada en el área NLOS para la orientación perpendicular presenta valores que oscilan entre 0.3 y 0.6 para separaciones positivas y entre 0.2 y 0.4 para orientaciones negativas. Para la orientación paralela y para el área HNLOS en ambas orientaciones, la correlación cruzada oscila entre valores bajos, por debajo de 0.3.

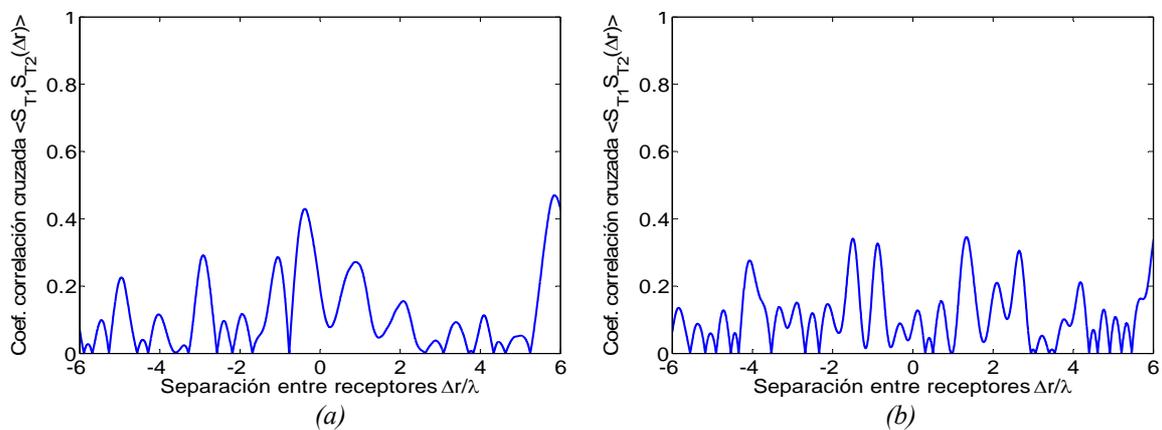


Figura 4.31. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área HNLOS del escenario laboratorios

4.6.3.3 Escenario salón de actos

El salón de actos es un escenario diáfano con pocos obstáculos en su interior pero que presenta gran número de elementos dispersores en el entorno exterior, Figura 3.5.

a) Correlación en recepción

La correlación en recepción para el área LOS del escenario salón de actos presenta una rápida caída al aumentar Δr . Se observa que para una separación de $\Delta r=0.5\lambda$ la orientación perpendicular presenta una correlación entorno a 0.2 mientras que para la orientación paralela la correlación es inferior a 0.4. Para distancias superiores, el coeficiente de correlación oscila, alcanzando valores máximos de 0.4.

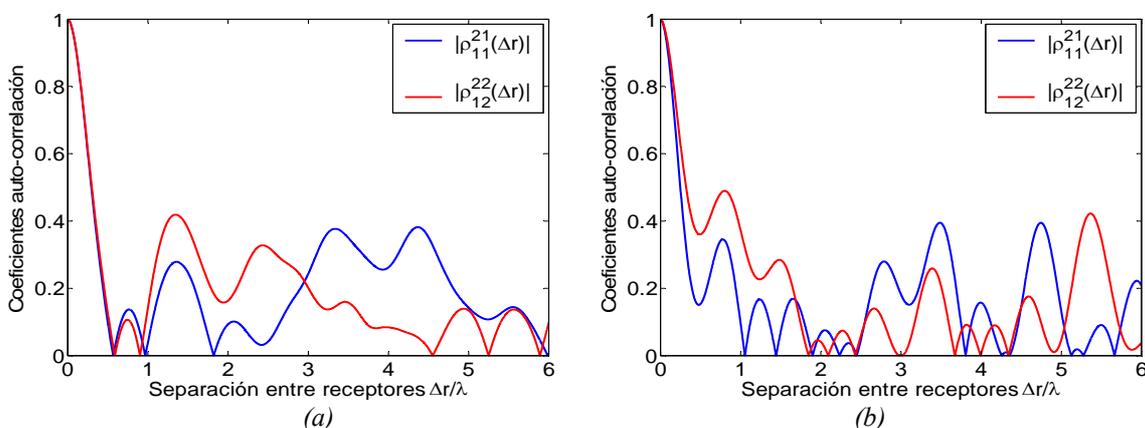


Figura 4.32. Función de auto-correlación en recepción en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área OLOS del escenario salón de actos

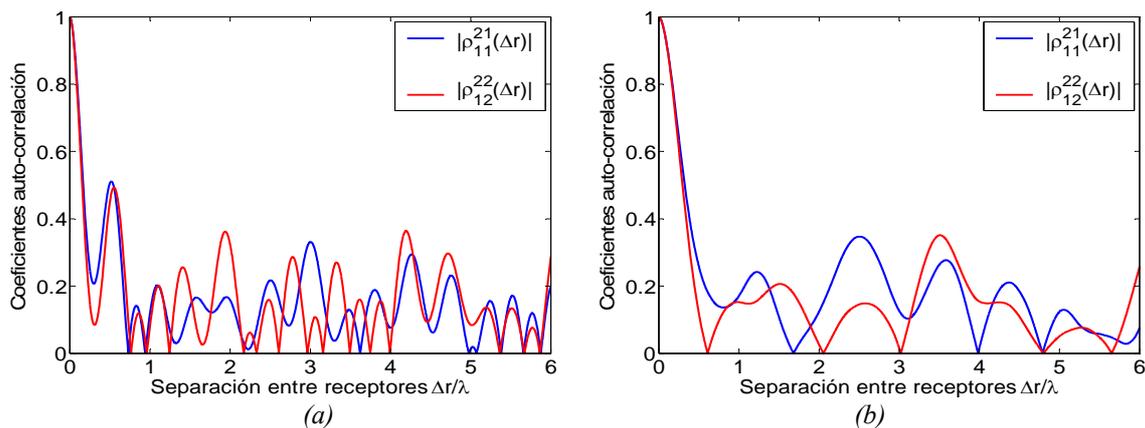


Figura 4.33. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área NLOS del escenario salón de actos

Para las situaciones NLOS, Figura 4.33, el comportamiento de la correlación es similar al caso LOS. Un rápido descenso para separaciones pequeñas entre receptores y luego oscila entre valores bajos. Para la orientación perpendicular, la correlación presenta un comportamiento oscilante que, para $\Delta r=0.5\lambda$, muestra un valor de 0.5, mientras que para

separaciones mayores el coeficiente de correlación se encuentra, en general, por debajo de 0.3. Para la orientación paralela, el comportamiento es mucho menos oscilante y presenta valores de correlación inferiores a 0.4 para separaciones superiores a 0.5λ .

b) Correlación en transmisión y correlación cruzada

En el salón de actos, la correlación cruzada en el área LOS para la orientación perpendicular presenta un comportamiento oscilante en un rango de valores bajos, en general por debajo de 0.3. Por su parte, la orientación paralela presenta un comportamiento similar excepto para el rango de separación entre antenas de -1λ y 1λ donde la correlación adquiere valores entre 0.4 y 0.6.

La correlación en transmisión para esta área LOS es reducida, 0.2 para la orientación perpendicular y 0.4 para la orientación paralela.

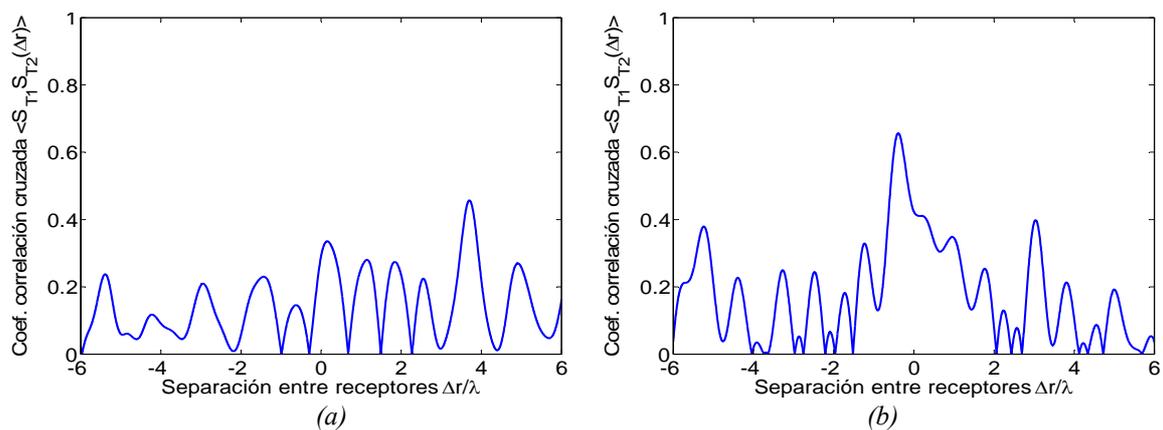


Figura 4.34. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área OLOS del escenario salón de actos

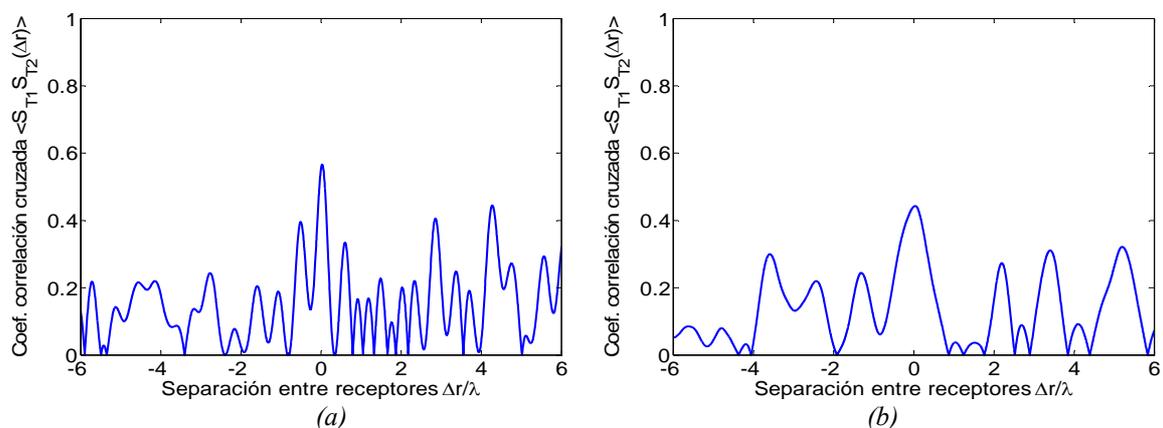


Figura 4.35. Función de correlación cruzada en función de la separación entre antenas receptoras para orientación perpendicular (a) y paralela (b) en el área NLOS del escenario salón de actos

En las áreas NLOS y HNLOS, la correlación cruzada presenta para ambas áreas un comportamiento similar. Para la orientación perpendicular el coeficiente de correlación

oscila en general por debajo de 0.3, presentando algún pico hasta 0.4, mientras que la orientación paralela oscila más lentamente pero en general también por debajo de 0.3.

En estas áreas la correlación en transmisión no disminuye respecto al caso de línea de vista, presentando de 0.6 para la orientación perpendicular y 0.4 para la orientación paralela.

4.6.3.4 Conclusiones escenarios exteriores-interiores

La correlación espacial en los escenarios exteriores–interiores presenta un comportamiento diferente al analizado en los escenarios de interiores, principalmente motivado por la menor riqueza de componentes que llegan al entorno que rodea al receptor.

En las áreas LOS se observa una enorme dependencia de la correlación con las componentes multicamino procedentes del exterior. Así para los escenarios de oficinas y el de laboratorios, la componente rayo directo predomina sobre el resto de reflexiones y difracciones generadas en el entorno del receptor, produciendo alta correlación. Al aumentar la separación entre antenas la correlación disminuye rápidamente en el escenario de oficinas. Sin embargo el escenario de laboratorios presenta valores elevados de correlación incluso para separaciones altas entre elementos, debidos principalmente a que a las ventanas de pequeñas dimensiones y a la fachada metálica reducen la diversidad de componentes multicamino que acceden al interior del escenario.

Por su parte, el escenario salón de actos en esta situación LOS presenta una correlación que se reduce rápidamente al aumentar la separación entre receptores. Este comportamiento diferente se debe a que en el exterior del salón de actos hay mayor presencia de *scatteres* que aumentan el número de componentes multicamino que acceden al interior del edificio. Esta mayor riqueza de *scattering* procedente del exterior permite decorrelar los diferentes subcanales.

Es importante subrayar como aunque las antenas transmisoras se separaron 10λ con el objeto de minimizar la correlación en transmisión, se han obtenido valores de correlación en transmisión de 0.6 en el escenario de oficinas, 0.95 en el de laboratorios y 0.35 en el escenario salón de actos para orientación perpendicular y 0.6 para la orientación paralela.

Al pasar a situaciones NLOS y HNLOS la correlación presenta en general para los tres escenarios valores bajos a partir de separaciones entre elementos de 0.5λ . En estas

situaciones, la riqueza del entorno y la ausencia de una componente predominante permiten obtener canales menos correlados. El escenario abierto, a gracias al bajo número de obstáculos que presenta permite que las componentes procedentes del exterior penetren con poca atenuación a las áreas NLOS y HNLOS contribuyendo a compensar la pobreza de *scattering* presente en dicho escenario.

Se ha observado como la orientación relativa entre los arrays influye en la correlación principalmente en las áreas con presencia del rayo directo. Sin embargo, a diferencia de los escenarios interiores la orientación paralela no es siempre superior desde el punto de vista de correlación, proporcionando en algunos casos peor comportamiento de la correlación en función de Δr . En las áreas NLOS y HNLOS, al igual que en los escenarios interiores, la correlación sí muestra un comportamiento similar para ambas orientaciones.

4.6.4 Correlación del canal de banda ancha

El canal MIMO-OFDM se caracteriza por N matrices de canal, correspondientes a cada uno de los N tonos OFDM. El estudio de la correlación espacial en este tipo de canales se realiza obteniendo los coeficientes de correlación complejos de cada una de las N matrices correspondientes a cada tono del canal MIMO-OFDM. Para obtener una medida de la correlación en cada área local estudiada, se calcula la estadística de cada coeficiente de correlación obtenido en el conjunto de tonos del ancho de banda.

Según el apartado 4.3.1, la matriz de correlación de un sistema MIMO 2×2 , se puede definir a través de 6 coeficientes de correlación. Las funciones de transferencia medidas tienen un ancho de banda de 250 MHz con 400 tonos frecuenciales y se han medido 16 puntos en el área local con dos orientaciones diferentes. Así, la estadística de cada coeficiente de correlación se realiza sobre 400 realizaciones del coeficiente de correlación.

4.6.4.1 Escenarios interiores

La Figura 4.36 presenta la estadística de los coeficientes de correlación para las dos áreas consideradas del escenario más diáfano, el hall. En el área LOS se observa valores de correlación bajos, oscilando los coeficientes de correlación, en el rango interdecilico, entre 0.2 y 0.5 en recepción y entre 0.1 y 0.4 los coeficientes de correlación en transmisión y cruzada. En el área NLOS los coeficientes de correlación son también bajos, situándose por debajo de 0.3 en el 90% de las ocasiones.

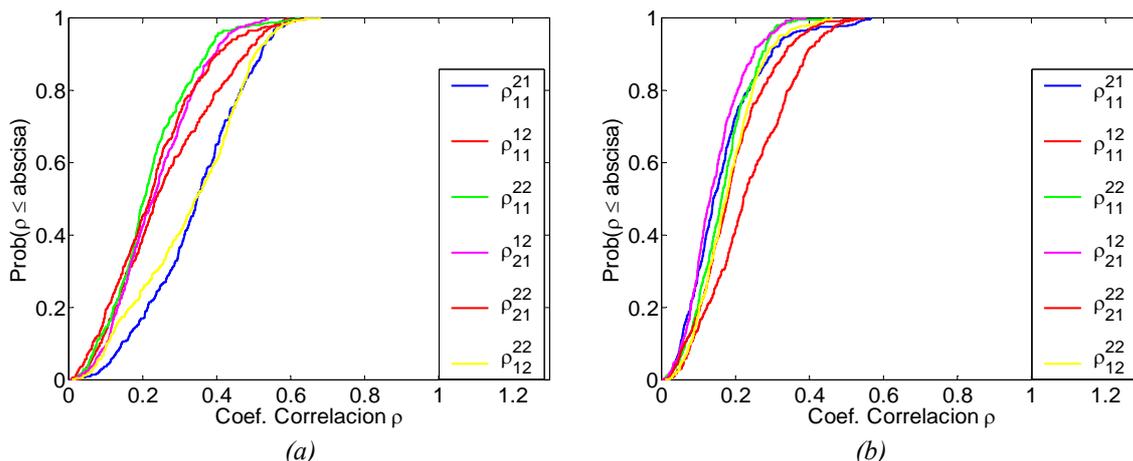


Figura 4.36. Coeficientes de correlación en el área LOS (a) y NLOS (b) del escenario hall

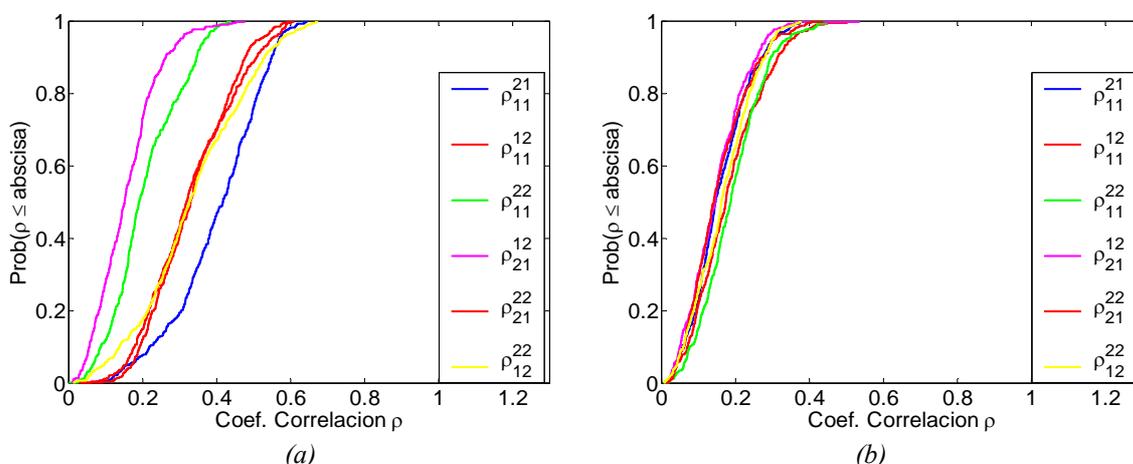


Figura 4.37. Coeficientes de correlación en el área LOS (a) y NLOS (b) del escenario oficinas

En el escenario de oficinas, Figura 4.37, se observa como en el área LOS, en el pasillo, la correlación en transmisión y en recepción destaca sobre la correlación cruzada, aunque los valores de dichos coeficientes pueden considerarse bajos, entre 0.2 y 0.5. En la situación NLOS, al igual que en el escenario abierto, los coeficientes de correlación son bajos, con valores por debajo de 0.3 en el 90% de las realizaciones.

Para estos escenarios de interiores se comprueba como la separación entre antenas de 1.5λ en transmisión y en recepción resulta suficiente para decorrelar considerablemente los subcanales. Estos resultados difieren de los observados en banda estrecha, donde separaciones entre receptores de 1λ presentaban correlaciones entre 0.6 y 0.8. Esta diferencia está motivada por el sistema de medida. En banda estrecha se utiliza un array virtual mientras que en banda ancha el array es real y presenta cierto grado de acoplo mutuo entre elementos. El acoplo degrada el diagrama de radiación de cada uno de ellos, permitiendo que cada elemento “pese” las direcciones de llegada de manera diferente lo que contribuye a decorrelar los canales vistos desde cada antena [37, 38].

Aunque la separación entre receptores es de 1.5λ , alta para presentar acoplo mutuo, las antenas utilizadas tienen un radio de 5 cm que reduce la separación efectiva entre elementos a 0.7λ para 2.4 GHz y 0.5λ para 3.5 GHz.

4.6.4.2 Escenarios exteriores-interiores

A continuación se presenta la caracterización de la correlación en los distintos escenarios mixtos. La Figura 4.38, presenta la estadística de los seis coeficientes de correlación en cada una de las áreas locales del escenario laboratorios. En la Figura 4.38(a) se observa como a pesar de separar las antenas transmisoras 10λ los coeficientes de correlación en transmisión presentan valores elevados entre 0.6 y 0.85. Los coeficientes de correlación en recepción también presentan valores similares, entre 0.5-0.8. Los coeficientes de correlación cruzada presentan valores menores, variando s_1 entre 0.2 y 0.6 y s_2 entre 0.4 y 0.7.

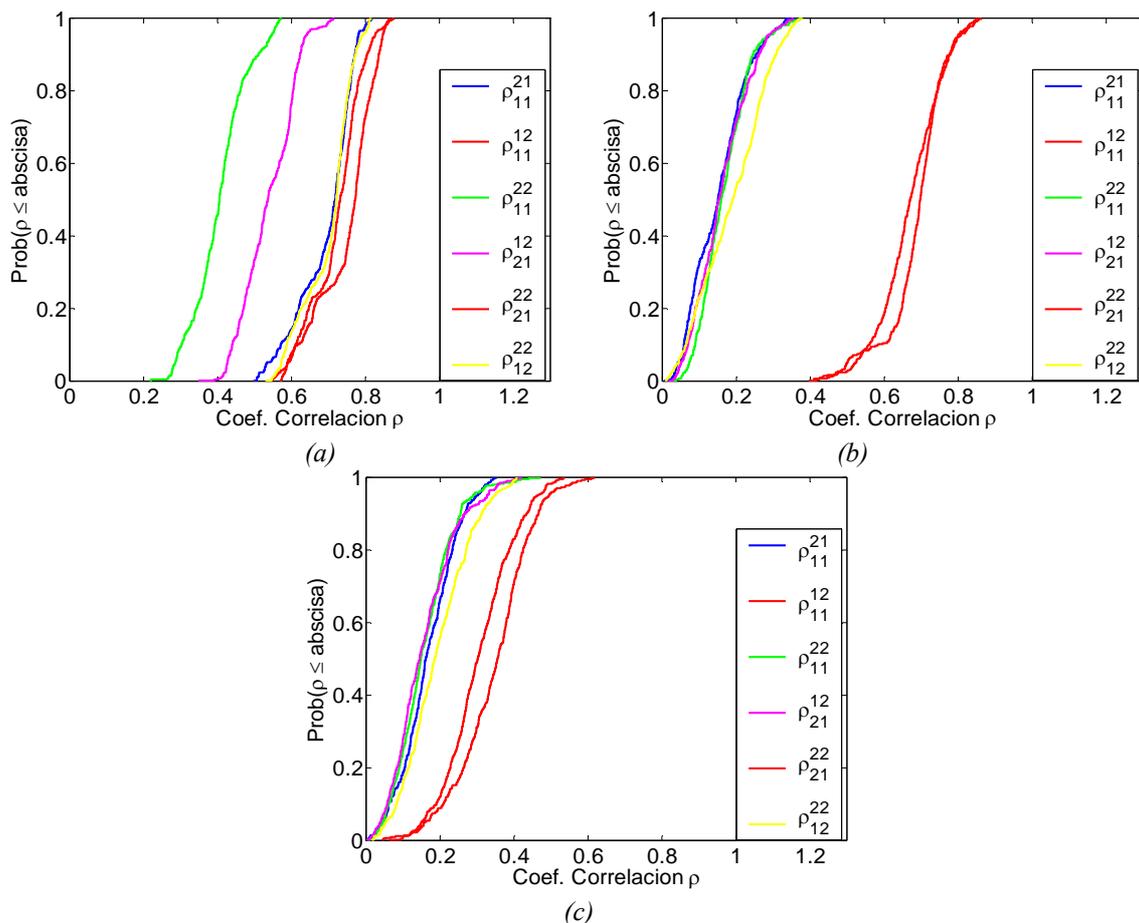


Figura 4.38. Coeficientes de correlación en el área LOS (a) y NLOS (b) y HNLOS (c) del escenario laboratorios

Por su parte la situación NLOS presenta coeficientes de correlación en recepción y cruzada bajos, inferiores a 0.4, mientras que la correlación en transmisión continua siendo

elevada manteniéndose en el mismo rango de variación. En las áreas HNLOS se consigue además una reducción de la correlación en transmisión, permitiendo que ésta se sitúe por debajo de 0.5 en el 95% de las ocasiones.

Para el escenario oficinas, Figura 4.39, se observa como la correlación en transmisión presenta un comportamiento similar para las tres áreas locales, variando en el rango de 0.4-0.8. La correlación cruzada también tiene un comportamiento similar, pero variando en rangos menores, entre 0 y 0.4. Por tanto únicamente el coeficiente de correlación en recepción muestra la dependencia con el área local y la presencia de línea de vista. Para áreas LOS la correlación en recepción varía entre 0.2 y 0.6 mientras que al pasar a situaciones sin línea de vista, los coeficientes de correlación se encuentran en el 90% de las ocasiones por debajo de 0.4 en NLOS y por debajo de 0.2 en HNLOS.

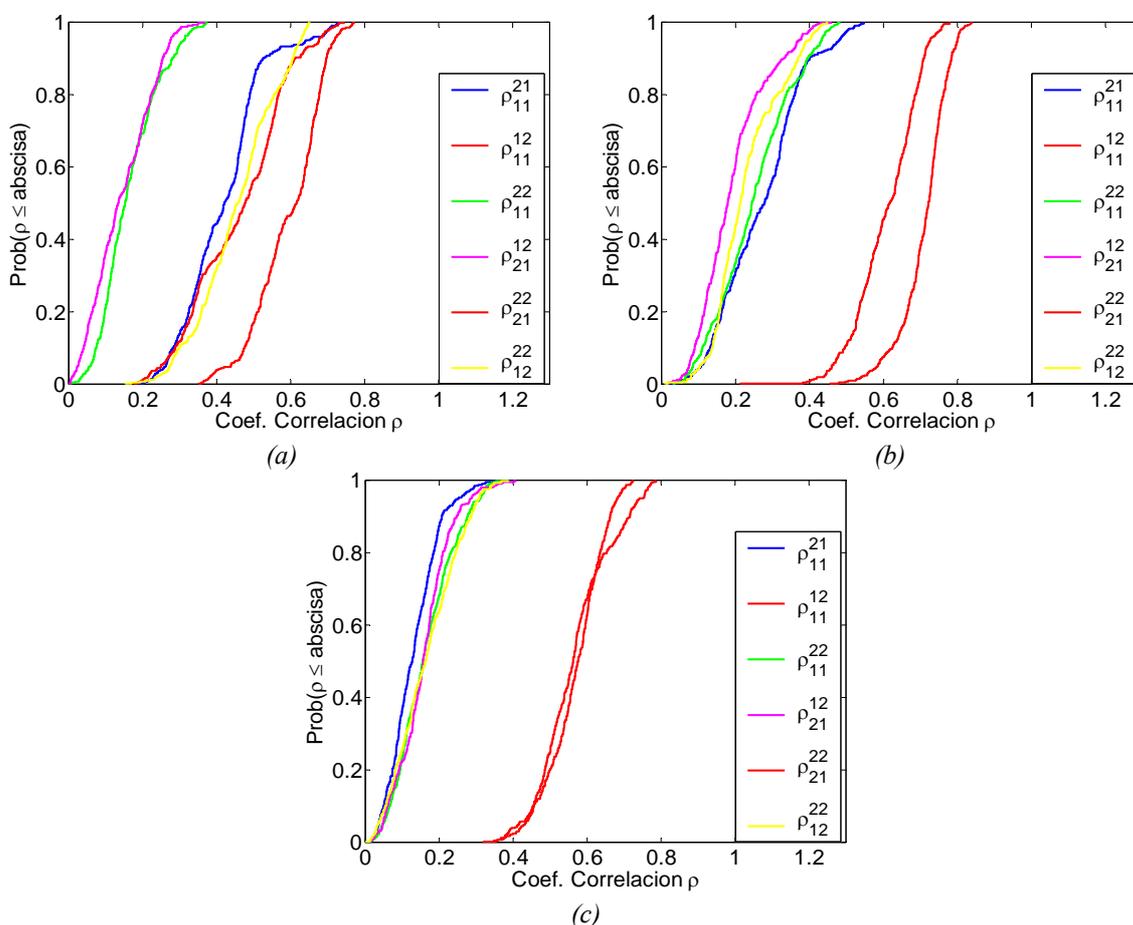


Figura 4.39. Coeficientes de correlación en el área LOS (a) y NLOS (b) y HNLOS (c) del escenario oficinas

En el escenario salón de actos, tanto correlación en recepción como correlación cruzada presentan rangos de variación bajos, entre 0 y 0.4. Es el coeficiente de correlación en transmisión el que presenta mayor dependencia con la presencia de línea de vista. Así en el área LOS, el coeficiente de correlación varía entre 0.6 y 0.8, pasa al rango de variación entre 0.4 y 0.6 en el área NLOS y por último se sitúa entre 0.2 y 0.6 en

el área HNLOS.

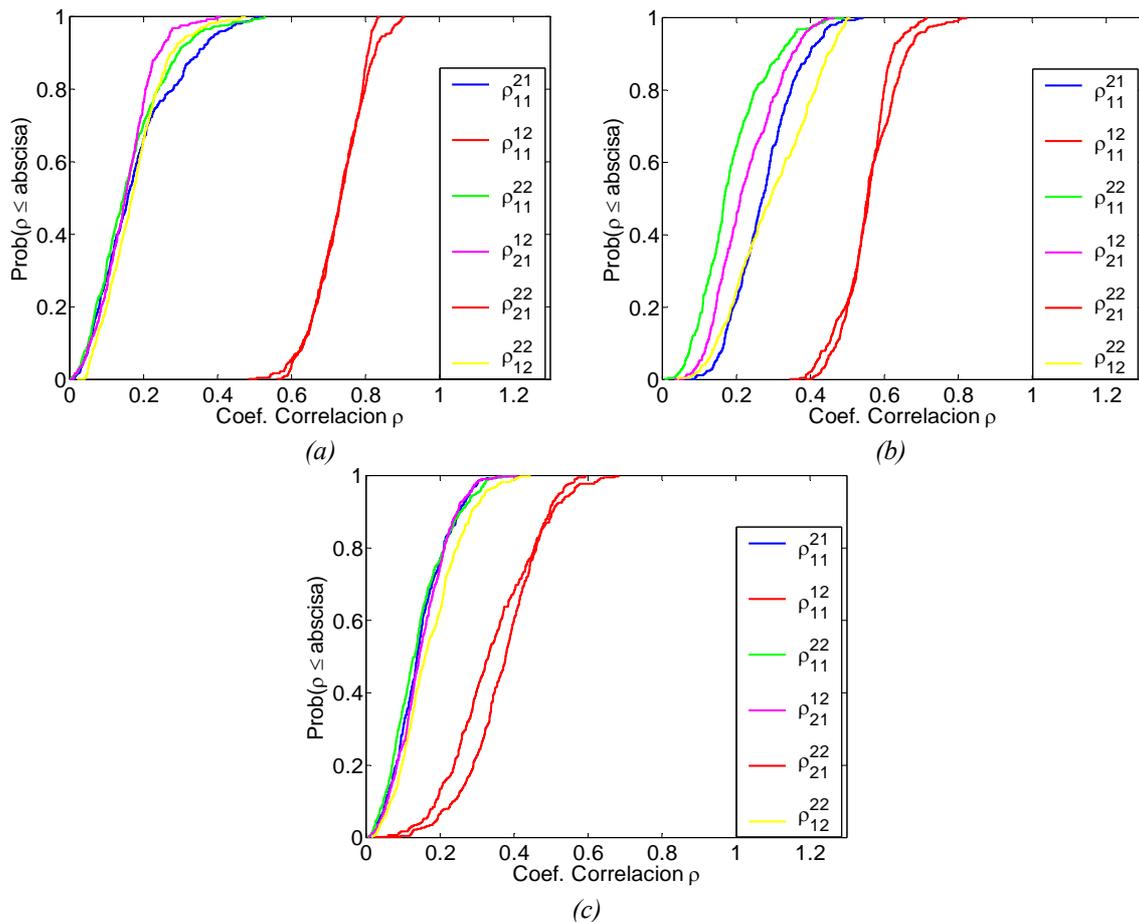


Figura 4.40. Coeficientes de correlación en el área LOS (a) y NLOS (b) y HNLOS (c) del escenario salón de actos

4.6.4.3 Escenarios exteriores

En el escenario azotea, se observa como los valores de correlación en transmisión se encuentran entre 0.4 y 0.6 mientras que la correlación en recepción varía entre 0.3 y 0.6. La correlación cruzada es la que presenta un rango de variación entre valores menores, 0.1-0.5. Por otra parte, al usar antenas direccionales, separadas 6λ (2.45λ entre sus extremos), en vez de antenas omnidireccionales separadas 1.5λ , se observa como la correlación en transmisión y la correlación cruzada descienden a valores entre 0.1 y 0.4 mientras que la correlación en recepción se mantiene en el mismo rango, 0.3 y 0.6, para el caso del coeficiente más alto. Hay que subrayar como, a pesar de que las antenas direccionales presentan mayor separación, la pobreza de *scattering* introducida por la antena direccional impide que esa separación sea suficiente para decorrelar los canales.

En el escenario terraza, al usar antenas omnidireccionales en recepción, se observa como la separación de 1.5λ entre antenas receptoras no es suficiente para reducir la correlación en recepción, la cual oscila entre 0.6 y 0.8. La correlación en transmisión

también adquiere valores altos, entre 0.3 y 0.7.

Al usar antenas direccionales en recepción se observa como la correlación en recepción baja a valores entre 0.1 y 0.5 mientras que la correlación en transmisión se mantiene constante. Aunque la antena direccional reduce la riqueza de *scattering*, este sigue siendo más rico que en el escenario anterior. Ésto, unido a la mayor separación entre elementos receptores, es la causa de la menor correlación en recepción.

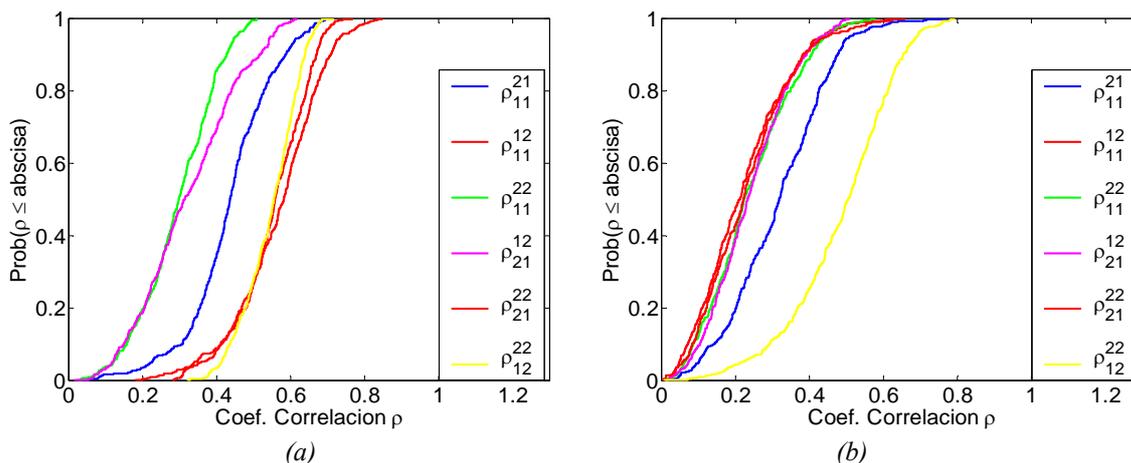


Figura 4.41. Coeficientes de correlación utilizando en recepción antenas omnidireccionales (a) y direccionales (b) en el área LOS del escenario azotea

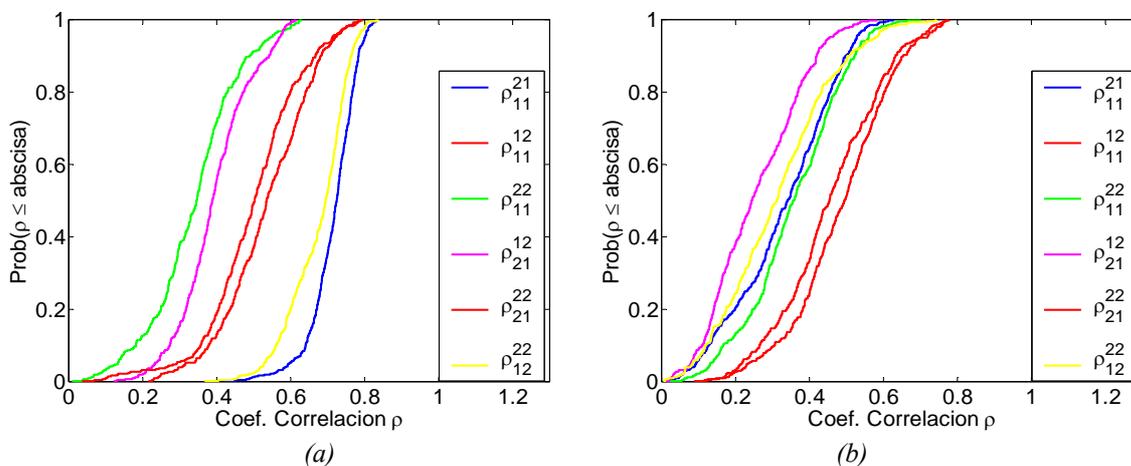


Figura 4.42. Coeficientes de correlación utilizando en recepción antenas omnidireccionales (a) y direccionales (b) en el área LOS del escenario terraza

4.7 Conclusiones

Siguiendo el modelo equivalente del canal MIMO, los sistemas que utilizan múltiples antenas en transmisión y recepción pueden descomponerse en subcanales SISO equivalentes; el número de subcanales lo determina el rango de la matriz de canal \mathbf{H} y su ganancia en potencia queda fijada por los valores propios de la matriz $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$. La

correlación espacial es un parámetro que limita el rendimiento de los sistemas de diversidad espacial reduciendo el rango de la matriz \mathbf{H} así como la magnitud de la ganancia de dichos canales.

El modelado de la correlación de un canal MIMO $M \times N$ se realiza de manera matricial mediante la matriz de correlación \mathbf{R} de orden $MN \times NM$. De los $(MN)^2$ elementos de la matriz de correlación solo $\frac{1}{2}MN(MN-1)$ coeficientes serán diferentes, los elementos se pueden agrupar en coeficientes de correlación en transmisión, en recepción y cruzada.

Tradicionalmente se ha caracterizado la correlación en función de la separación entre elementos a partir del modelo de Jakes, basándose en la suposición de que el *scattering* llega al receptor de manera uniforme e isotrópica en azimut. Sin embargo se ha demostrado como en diversos escenarios el *scattering* se modela mejor como direccional y no uniforme. En general la riqueza de *scattering* entorno al transmisor y al receptor condiciona las características de la correlación. A este factor hay que sumarle las características físicas de los arrays transmisor y receptor, tales como la separación entre elementos del array o la orientación relativa entre arrays.

En este capítulo se ha estudiado la correlación espacial en canales MIMO tanto para canales en banda estrecha como para canales en banda ancha. En el primer caso, banda estrecha, la correlación se ha analizado en función de la separación entre antenas receptoras, la orientación entre arrays, la presencia o no de línea de vista y las características del entorno. En banda ancha la correlación se analiza en las mismas condiciones pero para una separación fija entre elementos.

Banda estrecha

Para canales en banda estrecha se ha observado que en los escenarios de interiores, los coeficientes de correlación presentan un comportamiento muy variable con respecto a la separación entre antenas receptoras. Por este motivo el estudio de la correlación se ha realizado de manera estadística. Los resultados obtenidos muestran como la influencia del escenario en el espectro de potencia azimutal lleva a obtener valores de correlación mayores de los esperados según el modelo de Clarke, presentando valores de correlación elevados, entorno a 0.7 ó 0.8, para separaciones entre elementos receptores del orden de 1.25λ o incluso mayores.

En estos escenarios y para las áreas LOS se ha observado gran dependencia de la correlación con la orientación relativa entre los arrays lineales. Así, para orientación perpendicular, la correlación decrece lentamente y con un comportamiento más oscilante a medida que aumenta la separación entre receptores. Por su parte, la orientación paralela

presenta una caída más rápida. Esta dependencia con la orientación hace aconsejable la utilización de arrays con otras topologías que sean independientes del ángulo de llegada de la señal, como puede ser la circular [23] o la hexagonal [9].

Por otra parte, la presencia de línea de vista influye negativamente en la ortogonalidad de los canales. Así las áreas con línea de vista presentan mayor correlación que las situaciones NLOS. En las áreas LOS, el rayo directo actúa como componente dominante que condiciona la respuesta del canal, dado que la influencia del resto de componentes multicamino es poco notable. Sin embargo en áreas NLOS el multicamino es más uniforme permitiendo una menor correlación entre subcanales.

En el escenario de oficinas CDTUC la propagación en áreas LOS se caracteriza por un efecto de guía de onda que dificulta la independencia entre subcanales en la orientación *inline* a pesar de distanciar hasta más de 2λ las antenas receptoras. En el escenario Hall la correlación presenta un comportamiento menos crítico, con correlación elevada para separaciones pequeñas entre elementos receptores, pero que cae lentamente al incrementar dicha separación.

En los escenarios mixtos la correlación es menos oscilante y no requiere de un estudio estadístico. Los resultados obtenidos presentan en las áreas LOS del escenario oficinas y el escenario laboratorios alta correlación motivada por el bajo número de componentes que entran desde el exterior. Este fenómeno se agrava en el escenario laboratorios donde la cubierta metálica de la fachada y la pequeña ventana limitan los *scatteres* iluminados por el transmisor. El escenario salón de actos por su parte presenta en este área una correlación que cae rápidamente al aumentar la separación entre receptores gracias a que en el exterior del escenario hay mayor presencia de *scatteres* que aumentan el número de componentes multicamino que acceden al interior del edificio y que permiten decorrelar los diferentes subcanales.

A pesar de que las antenas transmisoras se separan 10λ con el objeto de minimizar la correlación en transmisión, se han obtenido valores de correlación en transmisión en algunos escenarios elevados, 0.6 en el escenario de oficinas, 0.95 en el de laboratorios y entre 0.35 y 0.6 en el escenario salón de actos dependiendo de si la orientación es perpendicular o paralela.

Al pasar a situaciones NLOS y HNLOS la correlación presenta en general para los tres escenarios valores bajos a partir de separaciones entre elementos de 0.5λ . En estas áreas, en el escenario laboratorios y de oficinas la ausencia de una componente predominante junto con la riqueza del entorno permite decorrelar rápidamente los canales. El escenario

abierto, gracias al bajo número de obstáculos que presenta, permite que las componentes procedentes del exterior penetren con poca atenuación a las áreas NLOS y HNLOS contribuyendo a compensar la pobreza de *scattering* presente en dicho escenario.

En estos escenarios mixtos, la orientación relativa entre los arrays también influye en las áreas con presencia del rayo directo. A diferencia de los escenarios interiores, los resultados muestran como en algunos casos la orientación paralela induce un comportamiento de la correlación peor que para la orientación perpendicular. Por su parte, en las áreas NLOS y HNLOS se observa que la correlación se comporta de manera similar con valores bajos para ambas orientaciones gracias a que en estos escenarios no hay componentes predominantes y las componentes multicamino llegan al receptor más uniformes en potencia.

Así por tanto se puede concluir que, desde el punto de vista de correlación, las áreas con línea de vista presentan el peor comportamiento desde el punto de vista de la correlación. Dentro de estas áreas, en interiores es la orientación perpendicular la que presenta valores altos que descienden lentamente al aumentar la separación entre elementos, mientras que en los escenarios mixtos, la diferencia entre una y otra orientación no es tan marcado.

Banda ancha

En banda ancha se ha estudiado la correlación del canal para separaciones entre elementos fija. Dado que en el canal medido se puede descomponer en 400 canales de banda estrecha correspondientes a cada uno de los tonos medidos, se estudia la correlación mediante la función de distribución acumulada de cada uno de los coeficientes de correlación obtenido para cada tono.

En banda ancha se ha observado como los coeficientes de correlación presentan en general valores menores que para banda estrecha. Este comportamiento viene motivado principalmente por el acoplo mutuo generado entre elementos de array receptor. Así mientras las medidas en banda estrecha se realizaban mediante un array virtual con un única antena receptora, en banda ancha las medidas se realizan con un array real. En este array, aunque las antenas receptoras tienen sus centros distanciados 1.5λ , dadas las dimensiones de las antenas bicónicas utilizadas, sus extremos únicamente están separados 0.7λ , permitiendo el acoplo entre ellas y por tanto la degradación del diagrama de radiación, lo que fomenta que cada antena pese cada componente espacial de manera diferente, lo que ayuda a decorrelar los subcanales.

En los escenarios interiores se observa como, para situaciones LOS, la correlación en

recepción oscila entre 0.3 y 0.5, mientras que los coeficientes de correlación en transmisión y cruzada se mantienen por debajo de estos valores. En las situaciones NLOS la correlación obtenida presenta valores bajos, inferiores a 0.3 en el 90% de los casos para ambos escenarios.

En los escenarios mixtos se ha observado como, al igual que en banda estrecha, aunque las antenas transmisoras se han separado 10λ para intentar reducir la correlación en transmisión, esta es aún elevada en las áreas LOS y NLOS, y solo consigue reducirse en áreas HNLOS. Las funciones de distribución acumulada de la correlación cruzada y en recepción presentan en general rangos de variación con valores bajos. El escenario laboratorios presenta en el área LOS valores más altos de correlación que en los otros escenarios, con variaciones de la misma en transmisión y en recepción entre 0.6 y 0.8. Este comportamiento, como se observó en banda estrecha, es debido a las características metálicas de la fachada del edificio que limitan las componentes que penetran al interior del mismo.

En exteriores se ha observado como el escenario azotea, prácticamente aislado de elementos dispersores, presenta valores de correlación entre 0.4 y 0.6. Al utilizar un array receptor con antenas direccionales la correlación en recepción no varía. Así, aunque la separación entre elementos es mayor, la pobreza de *scattering* impide su reducción. Por su parte, el escenario terraza también presenta valores de correlación en recepción altos que descienden al usar antenas direccionales con mayor separación entre las mismas. Así, aunque la mayor directividad de las antenas filtra muchas componentes espaciales, como se ha podido comprobar en los perfiles retardo potencia del capítulo anterior, la mayor separación entre antenas en un entorno rico en *scattering* (pese al filtrado de la antena directiva) permite reducir la correlación.

4.8 Bibliografía

- [1] 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, Marzo 1998, pp. 311-335.
- [2] I. E. Telatar, “Capacity of multiple antenna Gaussian channels,” *European Transactions on Communications*, Vol. 10, No. 6, Nov./Dec. 1999, pp 585-595.
- [3] 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, Junio 1987, pp. 871-878.

- [4] C. Chuah, J.M. Kahn, D. Tse “Capacity of multi-antenna array systems in indoor wireless environment” *Proceedings IEEE GLOBECOM*, Vol. 4, pp.1894-1899, Nov. 1998.
- [5] D.P. McNamara, M.A.Beach y P.N. Fletcher, “Spatial Correlation In Indoor MIMO Channels,” *PIMRC 2002*
- [6] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, IEEE reissue 1994.
- [7] W. C. Lee, “Effects on Correlation between Two Mobile Radio Base-Station Antennas,” *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-21, No. 11, Nov. 1973.
- [8] P. C. F. Eggers, “Diversity evaluation based on Correlation properties of Rician/Rayleigh fading signals subject to additive Gaussian noise,” *IEEE international symposium on personal indoor and mobile radio communications*, Helsinki, Finlandia, Sept. 1997, pp-1064-1069.
- [9] D. Shiu, G. Foschini, M. Gans, J. Khan, “Fading Correlation And Its Effect On The Capacity Of Multielement Antenna Systems,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, Marzo. 2000, pp. 502-513.
- [10] C. Oestges, B. Clerckx, D. Vanhoenacker-Janvier, A.J. Paulraj “Impact of diagonal Correlation on MIMO Capacity: Application to Geometrical Scattering Models,” 58 th *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2003. VTC 2003-Fall, vol. 1, 6-9 Octubre. 2003, pp. 394-398.
- [11] D.P. McNamara, M. A. Beach y P. N. Fletcher “Spatial Correlation in Indoor MIMO Channels, The 13th *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol.1, 15-18 Sept. 2002, pp. 290- 294.
- [12] T. Svantesson, J. Wallace, “Statistical Characterization of the indoor MIMO Channel Based on LOS/NLOS Measurements,” *Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, vol. 2, pp.1354-1358, 3-6 Noviembre. 2002.
- [13] O. Fernández, M. Domingo, R.P. Torres, “Empirical Analysis of the Correlation of MIMO Channels in Indoor Scenarios at 2GHz,” *IEE Proceedings Communications*, Vol. 152, No. 1, February 2005, pp. 82 -88
- [14] J. Kermoal, L. Schumacher, K. Pedersen, P. Mogensen, F. Frederiksen “A Stochastic MIMO Radio Channel Model With Experimental Validation” *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*, Vol. 20, No. 6 (2002) pp. 1211-1226.
- [15] S.-H. Oh y N.-H. Myung, “MIMO channel estimation method using ray-tracing

- propagation model,” *IEE Electronic Letters*, Vol. 40, No. 21, Octubre 2004, pp 1350-1352.
- [16] H. Yang y M. H. A. J. Herben, “Spatial dispersion and performance evaluation of indoor MIMO channels at 2.25 GHz,” *Proceedings of the 11th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux*, Noviembre 2004.
- [17] Oestges, C., “A stochastic geometrical vector model of macro- and megacellular communication channels,” *IEEE Transactions on Vehicular Technologies*, vol. 51, No. 6, Noviembre 2002, pp. 1352-1360.
- [18] K. Yu, M. Bengtsson, B. Ottersten, D. McNamara, P. Karlsson, M. Beach, “Second Order Statistics of NLOS Indoor MIMO Channels Based on 5.2 GHz Measurements,” *IEEE Globecom*, San Antonio, Noviembre 2001 pp. 156-160.
- [19] C. Oestges, “MIMO Correlations and Capacity Metrics for Various Antenna Configurations,” COST 273 TD(04) 002
- [20] J. Kermoal, L. Schumacher, K. Pedersen, P. Mogensen, F. Frederiksen, “A Stochastic MIMO Radio Channel Model With Experimental Validation,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 20, No. 6 (2002), pp. 1211-1226.
- [21] C-N. Chuah, D. N. C. Tse, J. M. Kahn y A. Valenzuela, “Capacity scaling in MIMO wireless systems under correlated fading,” *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol 48, No. 3, March 2002.
- [22] A. Hottinen, O. Tirkkonen, R. Wichman, *Multi-antenna transceiver techniques for 3G and beyond*, John Wiley & Sons, cop. 2003
- [23] J.N. Pierce, S. Stein, “Multiple Diversity with Nonindependent Fading,” *Proceedings of the IRE*, Vol 47, No. 6, 1960, pp. 89–104.
- [24] J. Wallace, H. Özcelik, M. Herdin, E. Bonek, M. Jensen, “Power and Complex Envelope Correlation for Modeling Measured Indoor MIMO Channels: A Beamforming Evaluation,” *IEEE 58th Vehicular Technology Conference, 2003, VTC 2003-Fall* Vol.1, Octubre 2003, pp. 363-367.
- [25] J. Kermoal, “Measurement, Modeling and Performance Evaluation of the MIMO Radio Channel,” PhD Thesis, Aalborg University, Denmark Agosto 2002
- [26] W. C. Lee, “Effects on Correlation Between Two Mobile Radio Base-Station Antennas,” *IEEE Transactions on Communications*, Vol. COM-21, No. 11, Nov. 1973
- [27] K. Anim-Appiah, “Complex envelope correlations for non isotropic scattering,” *Electronics Letters*, Vol. 34, No. 9, Apr. 1998, pp. 918-919.

- [28] K. I. Pedersen, P. E. Mogensen y B. H. Fleury, "Power azimuth spectrum in outdoor environments," *IEE Electronics Letters*, Vol. 33, No. 18, Agosto 1997, pp.1583-1584
- [29] A. Tang, K. Gong, "Study on power Azimuth spectrum of wireless channel in microcell environments" *Proceedings del IEEE 2003 International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2003, pp.685-687
- [30] L. Schumacher, K. Pedersen, P. E. Mogensen, "From Antenna Spacings to Theoretical Capacities – Guidelines for simulating MIMO systems," *PIMRC 2002* pp. 587 – 592.
- [31] L. Schumacher, J.P. Kermaol, F. Frederiksen, K.I. Pedersen, A. Algans y P.E. Mogensen, "MIMO Channel Characterisation," IST Project IST-1999-11729 METRA Deliverable 2, Febrero 1999.
- [32] Ericsson, Lucent, Nokia, Siemens. A standardized set of MIMO radio propagation channels. TSG_R WG1 document TSGR1(01)23 R1-01-1179; 19th-23rd November, Jeju, Korea
- [33] G. Durgin, T.S. Rappaport. "Basic relationship between multipath angular spread and narrowband fading in wireless channels". *Electronics Letters*, Vol. 34, No. 25, pp. 2431-2432. Dec. 1998.
- [34] G. D. Durgin, T.S. Rappaport. "Effects of multipath angular spread on the spatial cross-correlation of received voltage envelopes," *49th IEEE Vehicular Technology Conference*, 1999, Vol. 2, pp. 996-1000. 1999
- [35] B.H. Fleury, "First and Second-Order Characterization of Direction Dispersion and Space Selectivity in the Radio Channel," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 46, No. 6, Septiembre 2000.
- [36] D. Gesbert, H. Bolcskei, D. Gore, and A. Paulraj, "MIMO Wireless Channels: Capacity and Performance Prediction," *IEEE Globecom 2000*, Nov. 2000, pp. 1083-1088.
- [37] S. Ow, "Impact of Mutual Coupling on Compact MIMO Systems," Master of Science Thesis, Lund University, Marzo 2005.
- [38] N. Chiurtu, B. Rimoldi, E. Telatar, V. Pauli, "Impact of correlation and coupling on the capacity of MIMO systems," *Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, ISSPIT 2003, 14-17 Dec. 2003, pp. 154- 157.

