

ANÁLISIS DE LAS PRESTACIONES DE LA DIVERSIDAD EN TRANSMISIÓN APLICADA AL SISTEMA UTRA FDD

María Canales, José Ramón Gállego, Antonio Valdovinos, Fernando Gutiérrez

Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Universidad de Zaragoza

{mcanales, jrgalleg, toni, ferguso}@posta.unizar.es,

ABSTRACT

This paper analyses the effect of the propagation environment (Doppler frequency, multipath and correlation between antennas) over the theoretical performance of the downlink transmit diversity techniques specified in the standard of the UTRA FDD mode. These techniques are classified as open loop and closed loop modes. Simulation results have been obtained via a simulator of the physical layer of UMTS implemented in the C language. They show the negative effect of mobility, demonstrating how the diversity gain got with the closed loop techniques, which are the best ones, drops drastically when the Doppler frequency rises. In than case, the open loop mode of diversity performs well. Nevertheless, it is highly dependent on the correlation of the antennas, which reduces the theoretical improvement.

1. INTRODUCCIÓN

Todo sistema de comunicaciones, como el sistema UMTS, requiere mecanismos para hacer frente a los problemas derivados del entorno radio. El canal de propagación, aleatorio (desvanecimientos Rayleigh) y variable en el tiempo, provoca cortes en las comunicaciones, reduciendo la tasa media de error en el bit (BER: *Bit Error Rate*), disminuyendo por tanto la calidad del servicio. La capacidad del enlace descendente puede mejorarse usando diversidad en recepción en el móvil, consistente en la recepción mediante dos antenas de dos señales afectadas de manera diferente por el canal. Combinándolas o eligiendo la mejor de las dos puede obtenerse una señal recibida de mejor calidad, es decir, una ganancia por diversidad. Sin embargo, las reducidas dimensiones del terminal han llevado a desarrollar métodos alternativos que emulen la duplicidad esperada en recepción, como son las técnicas de diversidad en transmisión, basadas en la utilización en la estación base de dos antenas transmisoras. El resultado en recepción permite la obtención de una ganancia por diversidad.

Varios estudios han sido llevados a cabo en este tema [1]-[3]. En este artículo presentamos los resultados de simulación de los esquemas de diversidad en transmisión propuestos en el estándar del 3GPP [5]-[8] y analizamos el efecto del entorno móvil (frecuencia Doppler, multicamino, correlación entre antenas transmisoras) sobre las prestaciones teóricas.

2. ESQUEMAS DE DIVERSIDAD EN TRANSMISIÓN

El estándar UTRA FDD [5] especifica varias técnicas de diversidad en transmisión. Este artículo estudia dos de ellas, clasificadas como métodos en lazo abierto y en lazo cerrado.

2.1. Diversidad en lazo abierto

El modo de diversidad en lazo abierto es también llamado en el 3GPP [5] STTD (*space-time block coding based transmit diversity*). Trabajar en “lazo abierto” implica hacerlo sin conocimiento del canal de propagación por parte del transmisor.

Este método se basa en transmitir la señal deseada por una de las antenas y una versión codificada de la misma por la otra. La manera de codificar se muestra en la figura 1. La codificación de canal, el entrelazado y el ajuste de velocidad se realizan en el modo de no diversidad, como se muestra en la figura 2.

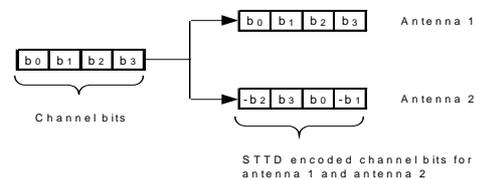


Figura 1. Codificación STTD

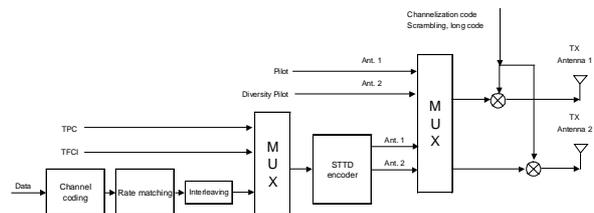


Figura 2. La codificación STTD en la cadena de transmisión.

La forma en que el abonado decodifica la señal, asumiendo el uso de un receptor Rake convencional, es la siguiente [1]:

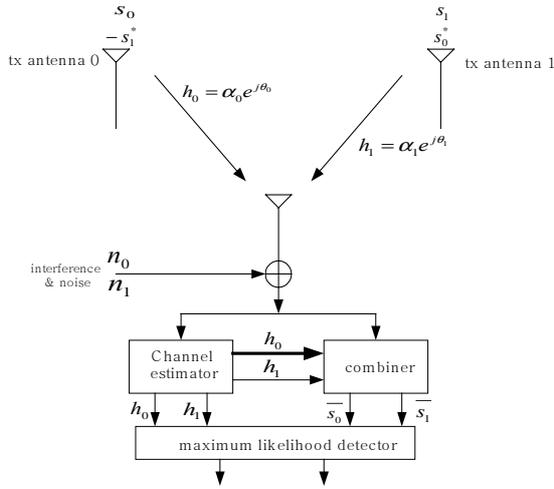


Figura 3. Esquema de recepción.

$$r(T) = r_0 = h_0 S_0 + h_1 S_1 + n_0$$

$$r(2T) = r_1 = -h_0 S_1^* + h_1 S_0^* + n_1 \quad (1)$$

$$\tilde{S}_0 = h_0^* r_0 + h_1 r_1^*$$

$$= h_0^* (h_0 S_0 + h_1 S_1 + n_0) + h_1 (-h_0^* S_1 + h_1^* S_0 + n_1^*)$$

$$= [(\alpha_0)^2 + (\alpha_1)^2] S_0 + h_0^* n_0 + h_1 n_1^* \quad (2)$$

$$\tilde{S}_1 = h_1^* r_0 - h_0 r_1^*$$

$$= h_1^* (h_0 S_0 + h_1 S_1 + n_0) - h_0 (-h_0^* S_1 + h_1^* S_0 + n_1^*)$$

$$= [(\alpha_0)^2 + (\alpha_1)^2] S_1 - h_0 n_1^* + h_1^* n_0 \quad (3)$$

2.2. Diversidad en lazo cerrado

La diversidad en transmisión en lazo cerrado se basa en un procedimiento de realimentación. El terminal (UE) estima los dos canales de propagación (basándose en el canal común CPICH – *Common Pilot Channel* –) y, gracias al conocimiento de los mismos, es capaz de decidir cómo debe transmitir la estación base (BS) para maximizar la potencia de la señal recibida (una vez recuperada). Así pues, el UE debe enviar la correspondiente información de realimentación a la BS de modo que ésta pueda ajustar los parámetros de transmisión. Esta información es enviada en un campo específico del canal dedicado de control del enlace ascendente DPCCCH (*Dedicated Physical Control Channel*), concretamente el bit D del campo FBI.

La estructura general del transmisor para soportar el modo de diversidad en transmisión en bucle cerrado para el DPCH se muestra en la figura 4.

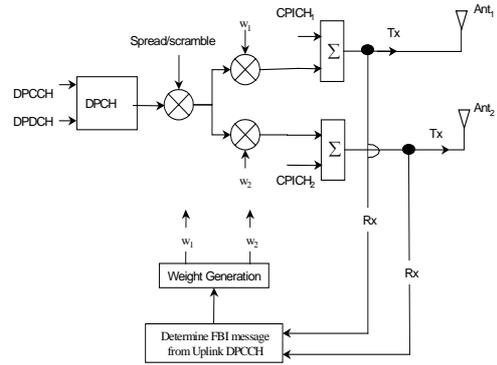


Figura 4. Estructura general del transmisor del enlace descendente(DPCH). Diversidad en transmisión en lazo cerrado.

Dentro de las técnicas en lazo cerrado se distinguen dos modos. En el modo 1, la estación base, de acuerdo a los comandos de realimentación, mantiene la fase de la antena 1 y ajusta la de la antena 2. Con este método, la fase se ajusta entre cuatro posibles valores. En el modo 2, además de la fase, se ajusta la amplitud (en este caso de las dos antenas). La velocidad de señalización es la misma, pero ahora los comandos se transmiten a lo largo de cuatro slots del DPCCCH ascendente, tomando un bit para la información de la amplitud y tres para la de la fase. De este modo, se tiene un total de 16 combinaciones posibles de parámetros de transmisión en la base (8 valores de fase entre -135° y 180° y dos de amplitud de 0,2 y 0,8). Para mantener la continuidad en las fronteras entre tramas, ambos modos varían ligeramente el proceso de actualización. La manera concreta de llevarlo a cabo, el proceso completo de inicialización, aplicación de los pesos de ajuste, etc. se encuentran detallados en las especificaciones del 3GPP [8]. Las características de cada modo se resumen en la tabla 1. El uso de cada modo es controlado mediante señalización de las capas superiores.

Tabla 1. Resumen de las características de los dos tipos de diversidad en lazo cerrado.

Modo en lazo cerrado	N _{FBD}	N _w	Tasa de actualización	Tasa de realimentación	N _{po}	N _{ph}	Rotación de la constelación
1	1	1	1500 Hz	1500 bps	0	1	$\pi/2$
2	1	4	1500 Hz	1500 bps	1	3	N/A

- N_{FBD} : número de bits de información por slot
- N_w : longitud de los comandos (FBI) en slots
- N_{ph} : numero de bits de fase por mensaje (FSW).
- N_{po} : numero de bits de amplitud por mensaje.

2.3. Multicamino

El efecto negativo del multicamino se resuelve, teóricamente, con un receptor Rake convencional, el cual aprovecha la ortogonalidad de las secuencias de código utilizadas en el proceso de ensanchado para separar cada camino retardado y obtener una señal recibida de mejor calidad sumando la contribución de energía de cada una de las ramas, asumiendo una suma coherente (basada en una correcta estimación del canal).

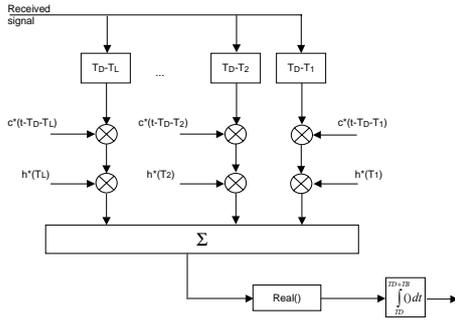


Figura 5. Receptor Rake

Las técnicas de diversidad intentan resolver el problema de los desvanecimientos debidos al canal Rayleigh variante en el tiempo.

Ambos problemas (multicamino y desvanecimientos) no son totalmente separables. El funcionamiento simultáneo del receptor Rake y de los modos de diversidad en transmisión no permite obtener siempre una mayor ganancia. En la sección 3, podemos observar la influencia real mutua que tienen ambos efectos.

2.4. Correlación

La idea básica de la diversidad es compensar el efecto negativo del canal de propagación gracias a otro camino de propagación independiente, el cual hace posible recuperar la señal original. Esta suposición, sin embargo, no es real en la práctica, puesto que existe una correlación efectiva entre las antenas transmisoras, la cual produce una dependencia real entre los caminos de propagación, la cual implica la existencia de desvanecimientos simultáneos debidos a ambos caminos no existiendo la esperada compensación, reduciéndose o incluso no obteniendo la ganancia por diversidad esperada.

La manera de modelar matemáticamente este efecto es el uso de un factor de correlación entre las dos ramas. Un canal dependiente de otro se representa como una combinación lineal del primero y un segundo. La ecuación típica es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 h_1(t) &= \alpha_1 + j\beta_1 \\
 h_2(t) &= \rho \times h_1(t) + \sqrt{(1-\rho^2)} \times h_2(t) = \\
 &= [\rho \times \alpha_1 + \sqrt{(1-\rho^2)} \times \alpha_2] + j[\rho \times \beta_1 + \sqrt{(1-\rho^2)} \times \beta_2] \quad (4)
 \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned}
 h_1 &= \alpha_1 + j\beta_1 \\
 h_2 &= \alpha_2 + j\beta_2 \\
 \rho &= \text{correlación} \quad (5)
 \end{aligned}$$

Así, si analizamos las ecuaciones del modo de diversidad STTD, puesto que la potencia transmitida por cada antena es la mitad de la transmitida en el caso de no usar diversidad, la relación señal a ruido obtenida (SNR: *signal to noise ratio*) es peor. La ganancia se obtiene únicamente suponiendo que sin diversidad la señal se desvanece, por efecto del canal, y que gracias al otro camino de propagación se recupera la señal.

Los símbolos recibidos con diversidad, como se muestra en las ecuaciones (2) y (3), son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 \tilde{S}_0 &= [(\alpha_0)^2 + (\alpha_1)^2] \frac{S_0}{\sqrt{2}} + h_0^* n_0 + h_1^* n_1 \\
 \tilde{S}_1 &= [(\alpha_0)^2 + (\alpha_1)^2] \frac{S_1}{\sqrt{2}} - h_0^* n_1 + h_1^* n_0 \quad (6)
 \end{aligned}$$

El símbolo recibido sin diversidad es:

$$\tilde{S}_0 = (\alpha_0)^2 S_0 + h_0^* n_0 \quad (7)$$

Y α_0 y α_1 son los coeficientes de potencia de los canales de propagación:

$$h_0 = \alpha_0 e^{j\theta_0} \quad (8)$$

$$h_1 = \alpha_1 e^{j\theta_1} \quad (9)$$

Si los dos valores no son suficientemente diferentes como para que uno compense al otro, no hay ganancia en la SNR. En ese caso, si α_0 provoca que la señal se desvanezca (S_0 se pierde) y α_1 puede recuperarlo, el resultado final es una ganancia por diversidad.

3. SIMULACIONES

3.1. Condiciones

Las condiciones de simulación, de acuerdo con el estándar de UTRA FDD se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de simulación

Método de acceso	DS-SS
Tasa de transmisión de bits	120 kbps
Tasa de transmisión de chips	3.84 Mcps
Tamaño de trama	10 ms
Modulación	QPSK
Filtro en transmisión	0,22 SRC
Filtro en recepción	0,22 SRC
Codificación de canal y entrelazado	No se incluyen
Estructura de trama	
Control	300 bits
Datos	900 bits
Asignación de ramas del Rake	5 ramas retardadas 1 chip
Modelos de canal (estimación ideal)	
Análisis teórico	Modelo real
Dos caminos de un solo rayo Rayleigh independientes (3 – 50 km/h) – 0 dBm	Dos caminos de dos rayos Rayleigh independientes (case 1, caso 4 [9])
Notación	
NDV	No diversidad
STTD	Modo en lazo abierto
CL1	Modo en lazo cerrado 1
CL2	Modo en lazo cerrado 2

Con el fin de simplificar el análisis teórico de las técnicas de diversidad, el modelo de canal implementado en el simulador de UMTS incluye un modelo especial de un único rayo con desvanecimientos Rayleigh. Dicho modelo no contempla el multicamino, pero permite modificar la velocidad del terminal móvil (en consecuencia la frecuencia Doppler) de manera que puede analizarse el efecto de la variabilidad temporal del canal. El control de potencia no se ha tenido en cuenta para analizar, directamente sobre la señal recibida, el efecto del canal Rayleigh, sin variaciones en la potencia transmitida.

3.2. Resultados

3.2.1. Frecuencia Doppler

Las figuras 6, 7 y 8 muestran los resultados de simulación de la probabilidad de error media (BER) para un rango de E_b/N_0 en recepción entre 4 y 19 dB. (La potencia de ruido incluye tanto el ruido blanco en el receptor como la interferencia de los demás usuarios, asumida también gaussiana). El modelo de canal empleado es el de un único rayo con velocidades del terminal de 3, 50 y 120 km/h. Estas figuras muestran que las técnicas en lazo cerrado son muy buenas en el caso de bajas frecuencias Doppler (baja velocidad) mientras que al aumentar la velocidad, las técnicas en lazo abierto son mejores.

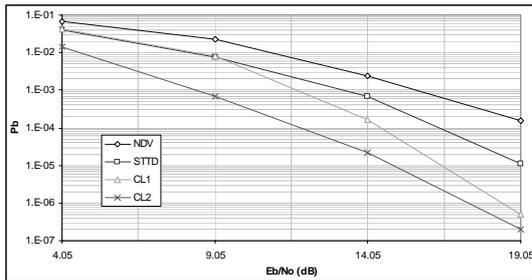


Figura 6. Curva de probabilidad para STTD, CL1 and CL2 vs. no diversidad –3 km/h–

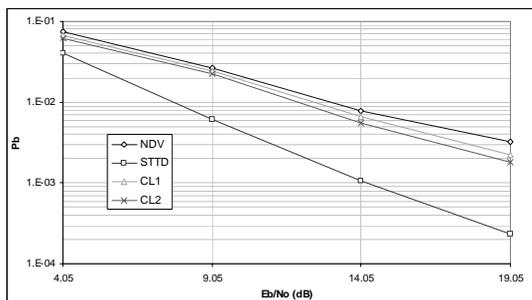


Figura 7. Curva de probabilidad para STTD, CL1 and CL2 vs. no diversidad –50 km/h–

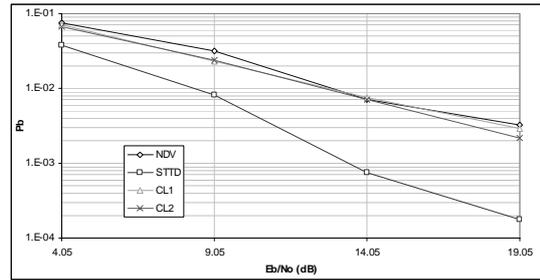


Figura 8. Curva de probabilidad para STTD, CL1 and CL2 vs. no diversidad –120 km/h–

La figura 9 muestra la evolución de la probabilidad de error frente a la velocidad de móvil, para una E_b/N_0 en recepción de 14 dB. En el caso de que apenas existan desvanecimientos que compensar (1 km/h), no es útil la aplicación de la diversidad. Sin embargo, al aumentar la velocidad de móvil (existen desvanecimientos), dichas técnicas son aplicables. Los modos de diversidad en lazo cerrado son los óptimos para bajas velocidades. El modo 1 es peor que el modo 2, puesto que las dos posibilidades de transmisión existentes no son suficientes para mejorar la calidad (el modo 2 utiliza 16 posibilidades). A altas velocidades el modo STTD es el que permite reducir el BER sin considerar el canal de propagación, no viéndose afectado, además, por los errores en el enlace ascendente.

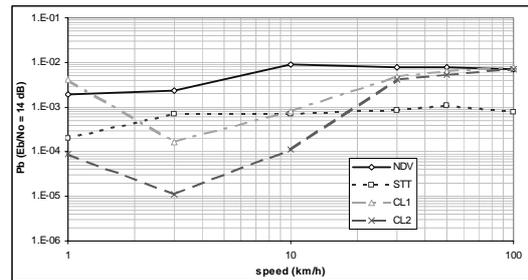


Figura 9. Curva de probabilidad para STTD, CL1 and CL2 vs. la velocidad del móvil.

3.2.2. Multicamino

Las figuras 10, 11, 12 y 13 muestran el resultado de la propagación multicamino sobre el funcionamiento normal de la diversidad, así como el modo sin diversidad. En estas figuras podemos observar cómo en caso de que exista más de un rayo retardado (multicamino), la probabilidad de error es mayor que en el caso de un único rayo Rayleigh, ambos casos con una frecuencia Doppler de 3 km/h. Aunque el receptor Rake puede aprovechar la energía de cada rayo, dificulta, sin embargo, la operación de las técnicas de diversidad. Las técnicas en lazo abierto sufren menos debido a la codificación especial del modo STTD, que facilita la separación de los efectos de desvanecimientos y multicamino (figura 11). Por otra parte, los resultados con los modos en lazo cerrado empeoran si existe multicamino, como puede verse en las figuras 12 y 13.

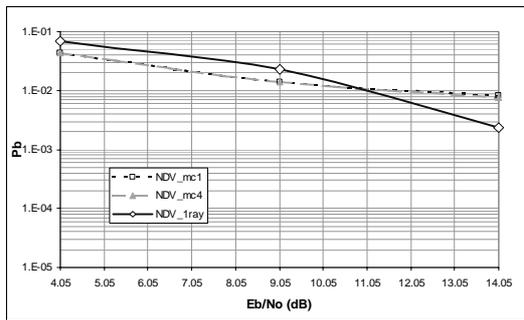


Figura 10. Curva de probabilidad para el modo sin diversidad. Modelos de propagación caso 1[9], 4[9] y Rayleigh de un solo rayo – 3 km/h –.

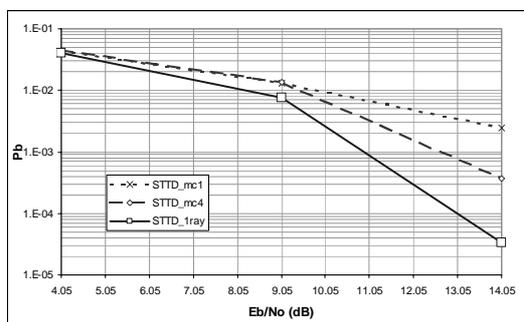


Figura 11. Curva de probabilidad para el modo STTD. Modelos de propagación caso 1[9], 4[9] y Rayleigh de un solo rayo – 3 km/h –.

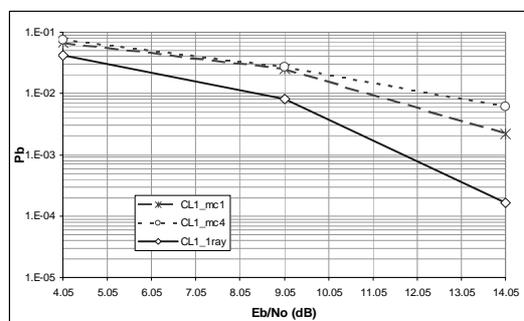


Figura 12. Curva de probabilidad para el modo CL1. Modelos de propagación caso 1[9], 4[9] y Rayleigh de un solo rayo – 3 km/h –.

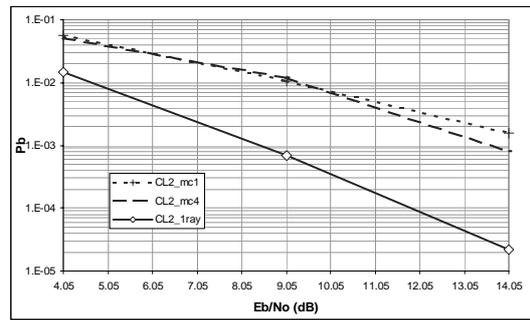


Figura 13. Curva de probabilidad para el modo CL2. Modelos de propagación caso 1[9], 4[9] y Rayleigh de un solo rayo – 3 km/h –.

La figura 14 muestra los resultados de simulación para el modelo de canal real 1 (dos rayos Rayleigh retardados casi 4 chips con potencias de 0 dBm y -10 dBm y una frecuencia Doppler de 3 km/h), comparando las técnicas de diversidad frente a la transmisión normal. La figura muestra que en un entorno de propagación adecuado (14 dB de E_b/N_o) los resultados son los esperados para esa frecuencia Doppler: el modo 2 en lazo cerrado es la mejor opción, seguida por el modo 1 en lazo cerrado y el modo en lazo abierto (STTD).

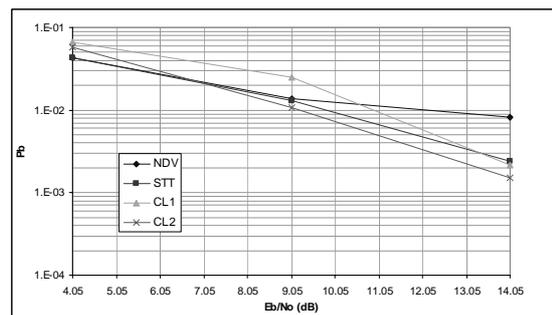


Figura 14. Curva de probabilidad para los modos de diversidad (STTD, CL1 y CL2) vs. el modo sin diversidad. Modelo de canal 1.

La figura 15 muestra los mismos resultados que en la figura 14 pero usando el modelo de canal 4, análogo al modelo 1 (misma frecuencia Doppler y mismos retardos) pero con potencias equiparables (0 dBm para ambos rayos). Las curvas muestran cómo las técnicas en lazo cerrado empeoran ante un efecto de multicamino mayor (rayos de más potencia), mientras que el modo en lazo abierto mejora, puesto que este modo permite al Rake aprovecharse mejor de las energías de cada camino (mayores) para recuperar la señal.

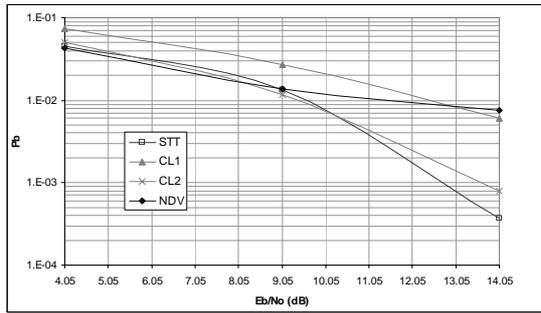


Figura 15. Curva de probabilidad para los modos de diversidad (STTD, CL1 y CL2) vs. el modo sin diversidad. Modelo de canal 4

3.2.3. Correlación

La figura 16 muestra el efecto de la correlación entre las ramas de transmisión, el camino normal y el de diversidad. Las líneas discontinuas corresponden a los modos STTD (lazo abierto) y CL2 (lazo cerrado, modo 2) ambos con un factor de correlación de 0,7 (datos experimentales han mostrado que el coeficiente de correlación real puede llegar a 0,7 [4]). Estos resultados son peores que los obtenidos en el caso de caminos independientes, representados con líneas continuas. El efecto es más relevante en mejores condiciones de propagación (19 dB).

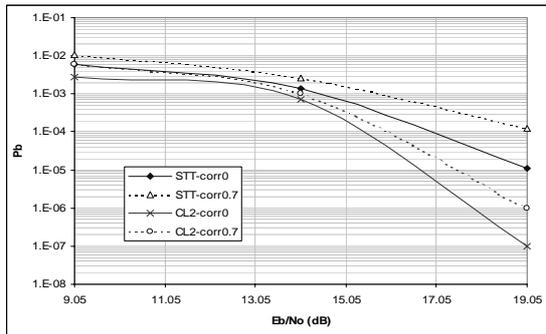


Figura 16. Curva de probabilidad para los modos de diversidad STTD y CL2 con un factor de correlación de 0,0 y 0,7.

4. CONCLUSIONES

En general, para bajas velocidades del terminal, lo que implica bajas frecuencias Doppler, el entorno es suficientemente estable como para obtener una buena estimación del canal de propagación, de manera que tanto las técnicas en lazo abierto como las de lazo cerrado son adecuadas para obtener la esperada ganancia, si bien las técnicas en lazo cerrado aprovechan dicha estimación para conseguir una ganancia mayor. El modo 2 permite obtener mejores prestaciones al variar los parámetros de transmisión entre 16 posibilidades, ajustándose así mejor al canal. Sin embargo, la mejora real se reduce drásticamente (incluso se llega a empeorar) al aumentar la velocidad del terminal (alta

frecuencia Doppler), puesto que la rápida variación del canal dificulta la estimación del mismo. En este caso, el modo de diversidad en lazo abierto es especialmente adecuado, puesto que se transmite sin el conocimiento de los canales de propagación.

La ganancia de diversidad realmente conseguida depende en gran medida del factor de correlación entre las antenas transmisoras, especialmente en el modo en lazo abierto, donde la estación base transmite sin conocimiento alguno de los canales de propagación, asumiendo que los desvanecimientos de un camino se compensarán con el otro, lo cual es cierto si no existe dependencia (correlación efectiva).

En presencia de multicamino, el uso de un receptor Rake convencional reduce la interferencia intersimbólica en recepción (ISI), pero a su vez complica el análisis de los métodos de diversidad. El resultado final es la reducción de la ganancia de diversidad esperada (incluso llega a no obtenerse) salvo en buenas condiciones de propagación (una mejor E_b/N_0).

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología del Gobierno Español y FEDER con el proyecto TIC2001-2481.

6. REFERENCIAS

- [1] S.M. Alamouti. "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications" IEEE JSAC, Vol 16(8), pp 1451-1458. October 1998.
- [2] Bertrand Hochwald, Thomas L. Marzetta and Constantinos B. Papadias. "A Transmitter Diversity Scheme for Wideband CDMA Systems Based on Space-Time Spreading" IEEE JSAC. Vol. 19, pp. 48-60. January 2001.
- [3] Eko N. Onggosanusi, Alan Gatherer, Anand G. Dabak, and Srinath Hosur. "Performance Analysis of Closed-Loop Transmit Diversity in the Presence of Feedback Delay" IEEE Trans. on Communications. Vol. 49(9), pp 1618-1630. September 2001.
- [4] Dinesh Rajan and Steven D. Gray. "Transmit Diversity Schemes for CDMA-2000"
- [5] 3GPP TS 25.211 v3.5.0. (2000-12): Technical Specification Group Radio Access Network. – Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD)–
- [6] 3GPP TS 25.212 v3.5.0. (2000-12): Technical Specification Group Radio Access Network – Multiplexing and channel coding (FDD) –
- [7] 3GPP TS 25.213 v3.5.0. (2000-12): Technical Specification Group Radio Access Network – Spreading and modulation (FDD) –
- [8] 3GPP TS 25.214 v3.5.0. (2000-12): Technical Specification Group Radio Access Network. – Physical layer procedures (FDD) –
- [9] 3GPP TS 25.101 v3.5.0. (2000-12). Technical Specification Group Radio Access Network. – UE Radio transmission and Reception (FDD); Annex B. Propagation conditions –