

Sincronización y Estimación de canal eficiente y robusta en sistemas CoMP OFDM

Alejandro Lancho Serrano, Víctor P. Gil Jiménez

alancho@tsc.uc3m.es, vgil@tsc.uc3m.es

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones.

Universidad de Carlos III de Madrid. Avda. de la Universidad, 30, 28911, Leganés, Madrid.

Resumen—In this paper, an efficient and robust simultaneous timing synchronization and channel estimation method for Cooperative MultiPoint Transmission and Reception (CoMP) is proposed. Efficiency is obtained by using the same two Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) symbols for simultaneously transmitting preambles by all the base stations. Robustness is achieved by specially designed orthogonal sequences both in time and frequency domain. The proposed method is able to estimate the channels from several base stations without losing anything in performance with respect to the single transmission scenario. Furthermore, our proposed synchronization outperforms single transmitter methods and so, it could also be adapted for single base station OFDM systems.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la demanda de servicios que requieren grandes tasas de transmisión y recepción sigue empujando a la comunidad científica a crear nuevos procedimientos para cumplir con las expectativas de los usuarios. Uno de los procedimientos que más importancia está cobrando en este momento es el conocido como CoMP (*Coordinated MultiPoint Transmission and Reception*) [1]. La principal idea bajo este concepto es la coordinación entre distintas unidades transmisoras y/o receptoras con el fin de realizar comunicaciones cooperativas, consiguiendo así alcanzar tasas binarias mucho mayores que los sistemas tradicionales gracias al aumento de la diversidad y la posibilidad de cancelación de interferencias.

Por otro lado, hoy en día los sistemas multiportadora como OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) son los más utilizados en entornos inalámbricos con multitrayecto, por sus buenas prestaciones en estos escenarios [2].

La combinación de OFDM y CoMP es una de las actuales tendencias que ya empieza a utilizarse en estándares como LTE (*Long Term Evolution*)-Advanced. En la actualidad, se han demostrado las grandes ventajas que conlleva la utilización de las técnicas de coordinación entre estaciones base para ofrecer servicios a los usuarios móviles. En la mayoría de ellas, se asume conocimiento del canal y sincronización perfecta. Para obtenerlas en escenarios realistas, es necesario abordarlas desde el punto de vista de la eficiencia para no perder los beneficios obtenidos por estas técnicas, y la robustez dado que las técnicas CoMP obtienen mejores prestaciones en escenarios hostiles.

Sin embargo, los problemas de sincronización y estimación de canal que ya existían en sistemas tradicionales OFDM, se han heredado y acrecentado. En [3] se hace un estudio del impacto que puede tener la estimación de la sincronización y del canal, así como la compensación de los posibles desplazamientos en tiempo y frecuencia cuando se considera un escenario CoMP LTE. Esto es debido a que ahora un

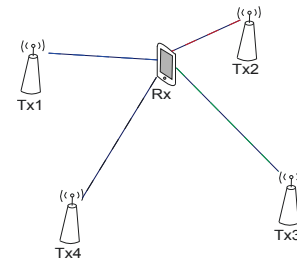


Fig. 1. Escenario CoMP con cuatro estaciones base transmisoras y un usuario receptor (enlace de bajada). La sincronización y la estimación de canal con respecto a las cuatro estaciones base deben realizarse simultáneamente

usuario determinado debe realizar la sincronización y la estimación de canal sobre diversas estaciones base que estarán transmitiéndole información al mismo tiempo, y para que el sistema siga siendo eficiente, dichos procedimientos deben consumir el menor número de recursos posible (ver figura 1).

En [4] se propone un esquema para realizar la sincronización y la estimación de canal en el enlace ascendente cuando se considera un escenario CoMP, pero en este escenario hay solo un transmisor por lo que no existe interferencia entre diversas transmisiones. Por otro lado, en [5] se presenta una solución para realizar la sincronización en tiempo y frecuencia en un escenario 2x2 MIMO (Multiple Input Multiple Output) OFDM en el que se utilizan secuencias ortogonales dado que solo existe un único transmisor.

En este artículo se presenta un procedimiento novedoso para la sincronización y la estimación de canal en el enlace descendente de forma eficiente y robusta mediante el diseño ortogonal de preámbulos tanto en tiempo como en frecuencia cuando existen varias estaciones base transmisoras y el receptor debe, por tanto, estimar los diferentes canales y desfases temporales entre cada una de ellas.

Notación: Las letras en mayúscula y minúscula se refieren a la señal en el dominio de la frecuencia y del tiempo, respectivamente, en negrita a vectores, el operador \leq denota la convolución y el conjugado se denota como $(\otimes)^*$.

II. MODELO DEL SISTEMA

En un sistema OFDM, la señal se obtiene aplicando la función inversa de la Transformada de Fourier (IDFT) a los símbolos complejos X_k :

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k e^{j2\pi kn/N} \quad (1)$$

donde N es el número de subportadoras y X_k es el dato a ser enviado por la subportadora k -ésima, siendo k ,

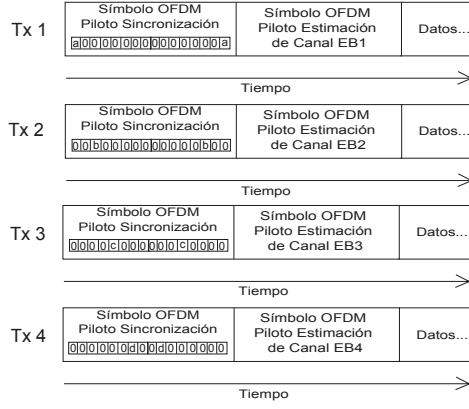


Fig. 2. Estructura de transmisión de dos símbolos OFDM para sincronización y estimación de canal, respectivamente, con respecto a cada una de las estaciones base en el dominio temporal

$n = \{0, 1, \dots, N - 1\}$ los índices en frecuencia y tiempo, respectivamente.

Después, para evitar la interferencia entre símbolos (ISI) en los canales *wireless* se introduce un prefijo cíclico (CP) de longitud L_{cp} .

Sin embargo, entre la transmisión y la recepción, se produce un retardo τ que debe ser estimado para que lo que se transmite y se reciba esté sincronizado. Posteriormente, para evitar la degradación que introducen los canales *wireless* se debe hacer una estimación de canal.

Para ello, se propone la utilización de dos símbolos OFDM, a modo de preámbulo, uno primero para sincronización y el otro para la estimación de canal. Es importante destacar que, para que el sistema sea eficiente, todas las estaciones base deben transmitir esos dos símbolos al mismo tiempo para evitar, como se hacía hasta ahora, la pérdida de ancho de banda y tiempo al transmitir cada preámbulo de forma independiente. Como esta transmisión será simultánea desde todas las N_{bs} estaciones base, será necesario diseñar estos símbolos de tal forma que, por una parte no se interfieran entre sí, y por otra, se obtengan los resultados deseados. Así, el terminal, para cada estación base u recibirá la señal:

$$\tilde{x}(u, n) = x(u, n - \tau_u), \quad (2)$$

y deberá estimar τ_u de la señal recibida de cada estación base:

$$\mathbf{r}_u = \tilde{\mathbf{x}}_u \leq \mathbf{h}_u + \mathbf{w}, \quad (3)$$

donde $u \in \{0, \dots, N_{bs} - 1\}$, hace referencia a cada una de las estaciones base transmisoras, $\mathbf{r}_u \in \mathbb{C}^{1 \times (N + L_{cp})}$, $\mathbf{h}_u \in \mathbb{C}^{1 \times L_{ch}}$ es la respuesta al impulso del canal con longitud en número de *taps* L_{ch} , y $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{1 \times (N + L_{cp})}$ se refiere al vector AWGN (Additive White Gaussian Noise).

Sin pérdida de generalidad, y por motivos de claridad en la presentación, se ha utilizado un número de estaciones base igual a 4 ($N_{bs} = 4$). Su adaptación a un número diferente de estaciones base es trivial.

Después, mediante otro símbolo OFDM de pilotos, se realizará la estimación de canal simultánea con las estaciones base. La figura 2 muestra lo que transmitiría cada una de las estaciones base para nuestro caso concreto de $N_{bs} = 4$.

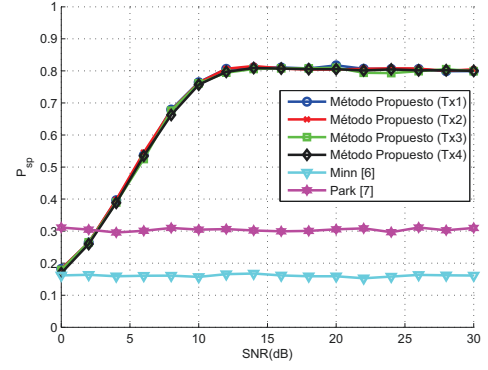


Fig. 3. Probabilidad de Sincronización Perfecta del nuevo método de sincronización simultánea frente al método tradicional de Minn [6].

III. SINCRONIZACIÓN EN EL DOMINIO TEMPORAL

Una vez visto el modelo, se propone realizar las tareas de sincronización y estimación de canal en dos fases, primero la sincronización temporal y luego la estimación de canal.

Para realizar la sincronización temporal se utilizará un sistema basado en la metodología propuesta en [6] para la sincronización de un único usuario, adaptada y optimizada a $N_{bs} = 4$ estaciones base simultáneamente. Nuestro sistema utiliza una señal compuesta por una serie de pilotos generados estratégicamente que permitirá al usuario receptor estimar los N_{bs} retardos diferentes τ_u que se producirán con respecto a cada una de las N_{bs} estaciones base transmisoras $u \in \{0, \dots, N_{bs} - 1\}$.

Para ello se evaluará una métrica definida por la expresión:

$$M(u, d) = P(u, d)^2, \quad (4)$$

donde $P(u, d)$ viene dado por:

$$P(u, d) = \sum_{m=0}^{L-1} r^*(d + m + 2uL) r(d + m + (4N_{bs} - 1)L - 2uL), \quad (5)$$

siendo L es la longitud del tamaño de la ventana en la que la métrica es evaluada, y d es el índice de la muestra donde la métrica se calcula. Para un mayor entendimiento de por qué se recorren así las ventanas, ver ec. (7). Por último, la estimación del retardo τ_u correspondiente a cada una de las estaciones base se hace del siguiente modo:

$$\tau_u = \max_d M(u, d). \quad (6)$$

Es importante resaltar aquí que la métrica propuesta no requiere de normalización en potencia como otras técnicas en la literatura [6], [7].

Lo que se pretende mediante este método es detectar los picos de correlación en la señal recibida que indicarán con qué retardo comienza el símbolo OFDM en el dominio temporal para cada uno de las estaciones base desde el punto de vista del receptor.

El símbolo piloto generado en el dominio temporal (sin tener en cuenta el CP) y para $N_{bs} = 4$ se distribuiría de la siguiente forma:

$$\mathbf{s} = [\mathbf{a} \ \mathbf{0} \ \mathbf{b} \ \mathbf{0} \ \mathbf{c} \ \mathbf{0} \ \mathbf{d} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0} \ \mathbf{d} \ \mathbf{0} \ \mathbf{c} \ \mathbf{0} \ \mathbf{b} \ \mathbf{0} \ \mathbf{a}] \quad (7)$$

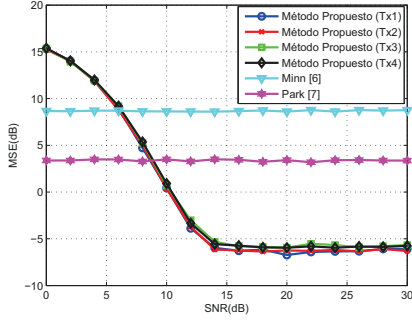


Fig. 4. MSE que representa el error cuadrático medio en términos de símbolos estimados con retraso o con adelanto $\hat{\tau}_u$ respecto al retardo real τ .

siendo $\mathbf{0}$ un vector de ceros de longitud $L = N/4N_{bs}$ y cada vector $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ y \mathbf{d} la señal piloto del símbolo de longitud $L = N/4N_{bs}$ cuyo contenido viene dado por una parte de pilotos generados ortogonalmente de longitud N_{bs} y el resto relleno de ceros. De esta forma se tendría la siguiente estructura para, por ejemplo, el vector \mathbf{a} en el caso analizado con 4 estaciones:

$$\mathbf{a} = [\mathbf{p}_a \ \mathbf{0}] \quad (8)$$

Finalmente, para evitar posibles correlaciones entre las partes de señal piloto procedente de las diferentes estaciones base, la parte \mathbf{p}_i de cada uno de los pilotos son generados de manera ortogonal parecida a como se hace en [8].

IV. ESTIMACIÓN DE CANAL

Para realizar una estimación de canal simultánea de cada una de las estaciones base que se encuentran transmitiendo a un determinado usuario, se ha seguido un procedimiento similar al seguido en [9]. Se generarán una serie de pilotos en el dominio frecuencial, que evitará solapes en el dominio temporal, pudiendo así inventanar la señal a la llegada del receptor procedente de cada estación base y realizar la estimación de canal para cada estación base de forma simultánea e independiente. Los pilotos son generados de la siguiente manera:

$$\{u[k] = \sum_{m=0}^{N_t-1} \delta[k-m] \exp\left(j \frac{2\pi}{N_{bs}} um\right)\} \quad (9)$$

$$N_{bs} \geq \frac{N\Delta t}{\varsigma_{u,max}} \quad (10)$$

siendo $\varsigma_{u,max}$ el mayor *delay spread* provocado por cada uno de los canales procedentes de la estación base u -ésima.

Una vez se separan los pilotos procedentes de las distintas estaciones base, para evaluar los resultados y la calidad de la estimación de canal, se ha utilizado el método *Least Squares-Discrete Fourier Transform* (LS-DFT).

V. RESULTADOS

En esta sección se muestran los principales resultados obtenidos para la sincronización y la estimación de canal. Para el caso de la sincronización, los resultados se comparan con el método de Minn [6] y con el método de Park [7] para realizar sincronización en el dominio temporal de una señal

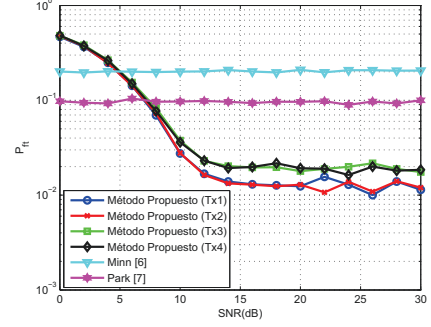


Fig. 5. Probabilidad de fallo de temporización. Considera como fallo en la sincronización todo aquello que no sea una sincronización perfecta o una diferencia del parámetro $\hat{\tau}_u$ con respecto al real τ de 5 muestras de adelanto (ver ec. (12)).

OFDM en la que sólo participa una estación base transmisora y un único usuario receptor, mientras que el propuesto utiliza $N_{bs} = 4$ estaciones base.

Se considera un sistema OFDM con $N = 512$ subportadoras. Para obtener los resultados, se han realizado 10000 simulaciones. El modelo de canal utilizado es el mismo que el empleado en [6], que consta de un canal AWGN con ISI modelado con 16 componentes multitrayecto con retardos por componente de $\delta_i = 0, 4, 8, \dots, 60$:

$$h_i = \frac{\exp(-\delta_i/60)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{16} \exp(-\delta_k/30)}}, i = 1, 2, \dots, 16. \quad (11)$$

En cuanto a la estimación de canal, se utilizará el método LS-DFT para realizar dicha estimación, y se comparará el error cuadrático medio (MSE) de la estimación de las cuatro estaciones base a la vez, con el MSE obtenido cuando sólo una estación base transmite su señal piloto para poder estimar el canal en recepción.

Tanto para la evaluación de la sincronización como para la estimación de canal, las simulaciones se han realizado para valores de relación señal a ruido (SNR) desde 0 dB hasta 30 dB, medida en el receptor.

A. Resultados: Sincronización en el dominio temporal

Para evaluar la calidad de la sincronización del sistema descrito se han examinado diferentes indicadores. El primero es la Probabilidad de Sincronización Perfecta $P_r(\hat{\tau} = \tau)$. Después se presenta el MSE tradicionalmente utilizado para evaluar algoritmos. Finalmente, como el MSE no es capaz de determinar cuándo una estimación del retardo $\hat{\tau}$ está dentro de la Región de Seguridad para la sincronización¹, se emplea otro indicador definido como Probabilidad de Fallo en la Temporización [10]:

$$P_{tf} = P_r^{(m)}(\hat{\tau} - E\{\hat{\tau}\} \in m). \quad (12)$$

siendo m el margen de muestras de adelanto para las que no existe ICI e ISI.

La figura 3 muestra la comparación de la Probabilidad de Sincronización Perfecta de los métodos tradicionales de

¹Region definida en valores de $\hat{\tau}$ donde los errores de estimación no causan ISI ni Interferencia entre Portadoras (ICI)

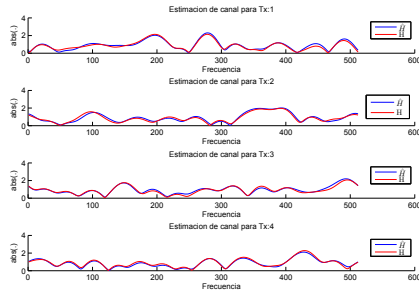


Fig. 6. Diferentes estimaciones de canal con respecto al canal original en el caso de estimación de canal simultánea a las 4 estaciones base para una SNR de 10 dB.

Minn [6] y Park [7] con un único usuario frente al método propuesto aquí de sincronización simultánea. Como se puede observar, además de hacer una sincronización simultánea para cuatro estaciones base transmisoras, la Probabilidad de Sincronización Perfecta es superior a partir de 0 dB de SNR con respecto al método de Minn [6], y a partir de unos 3 dB con respecto al método de Park [7].

Otra medida de calidad evaluada ha sido el MSE (figura 4), que representa el error cuadrático medio en términos de símbolos estimados con retraso o con adelanto $\hat{\tau}_u$ respecto al retardo real τ . Como se puede observar, el MSE del método propuesto es superior a partir de 5 dB de SNR respecto al método de Minn [6] y de 9 dB respecto al de Park [7].

La figura 5 muestra la probabilidad de fallo en la temporización. Este procedimiento considera como fallo todo aquello que no sea una sincronización perfecta o una diferencia del parámetro $\hat{\tau}_u$ con respecto al real τ de 5 muestras de adelanto del primero con respecto al segundo (ver ec. (12)). Como se puede observar, el método propuesto supera el rendimiento del método de Minn [6] a partir de $SNR = 4$ dB, y al de Park [7] a partir de $SNR = 7$ dB.

B. Resultados: Estimación de Canal

Para evaluar la calidad de la estimación de canal sobre cuatro estaciones base de forma simultánea, se ha calculado el MSE de cada una de las estimaciones simultáneas, con el MSE producido al transmitir con una única estación base transmisora. El método de estimación de canal utilizado ha sido LS-DFT, tal y como se describe en la sección (IV).

La figura 6 muestra un ejemplo de estimación de canal con respecto al canal original en el caso de estimación de canal simultánea a las 4 estaciones base para una SNR de 10 dB.

Y la figura 7 muestra la evolución del MSE. Como se puede observar, no existe diferencia entre realizar la estimación de canal simultánea para las diferentes estaciones base, y realizarla para una única estación base, gracias al diseño orthogonal de los símbolos preámbulo.

VI. CONCLUSIONES

En este artículo se ha propuesto un nuevo sistema para realizar la sincronización y la estimación de canal en un escenario CoMP OFDM de forma simultánea a diferentes estaciones base transmisoras. Como se ha podido observar en cuanto a la calidad de la sincronización, el método propuesto ofrece un rendimiento superior tanto al método de Minn

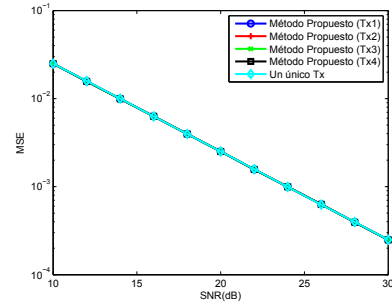


Fig. 7. Evolución del MSE desde una SNR de 0 dB hasta una SNR de 20 dB para el caso de estimación de canal simultánea y para el caso de estimación de canal sobre una única estación base.

[6] como al de Park [7] para un único usuario. Por otro lado, el método propuesto para realizar la estimación de canal de forma simultánea ofrece las mismas prestaciones en términos de MSE que el mismo método trabajando con una única estación base. Por lo tanto, se puede concluir que este trabajo ofrece una nueva alternativa para realizar la sincronización y la estimación de canal en escenarios CoMP OFDM con varias estaciones base transmisoras, que no pierde prestaciones frente a la realización de dichos procesos de forma individual, con la ventaja añadida de no requerir de anchos de banda adicionales por parte de las estaciones base, pues todas transmiten sus preámbulos simultáneamente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por los proyectos GRE3NSYST (TEC2011-29006-C03-03) y COMONSSENS (CSD2008-00010).

REFERENCIAS

- [1] R. Irmer, H. Droste, P. Marsch, M. Grieger, G. Fettweis, S. Brueck, H. P. Mayer, L. Thiele, and V. Jungnickel, "Coordinated multipoint: Concepts, performance, and field trial results," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 2, pp. 102–111, 2011.
- [2] R. v. Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, 1st ed. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., 2000.
- [3] T. Koivisto, T. Kuosmanen, and T. Roman, "Estimation of time and frequency offsets in LTE coordinated multi-point transmission," in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Sept 2013, pp. 1–5.
- [4] L. Chang, J. Zhang, X. Li, B. Liu, and K. Sun, "Joint synchronization and channel estimation for the uplink coordinated multi-point systems," in *7th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM)*, Aug 2012, pp. 384–389.
- [5] Z. Gao, J. Xu, and Z. Zhang, "A synchronization scheme for MIMO OFDM system," in *International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)*, July 2010, pp. 15–18.
- [6] H. Minn, M. Zeng, and V. Bhargava, "On timing offset estimation for OFDM systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 4, no. 7, pp. 242–244, July 2000.
- [7] B. Park, H. Cheon, C. Kang, and D. Hong, "A novel timing estimation method for ofdm systems," in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, vol. 1, Nov 2002, pp. 269–272 vol.1.
- [8] L. He and H. Ge, "QPSK orthogonal space-time coding scheme with full-rate and full-diversity for system with four transmit antennas," in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, vol. 4, April 2003, pp. IV-337–40 vol.4.
- [9] C. M. Ribeiro, M. J. F.-G. García, V. P. G. Jiménez, A. Gameiro, and A. G. Armada, "Uplink channel estimation for multi-user OFDM-based systems," *Wireless Personal Communications*, vol. 47, no. 1, pp. 125–136, 2008.
- [10] S. Muller-Weinfurter, "On the optimality of metrics for coarse frame synchronization in OFDM: a comparison," in *The Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, vol. 2, Sep 1998, pp. 533–537 vol.2.