

Impacto de la velocidad de los terminales de usuario en un sistema OFDMA adaptativo

Juan J. Sánchez, D. Morales-Jiménez, G. Gómez, J.T. Entrambasaguas
Departamento de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Málaga
Campus de Teatinos. Málaga, España 29071
Email: (jjsanch,morales,ggomez,jtem)@ic.uma.es

Abstract—Next standards for cellular communications (B3G and 4G) are aimed to provide high speed data services with a certain Quality of Service (QoS). Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA) combines multiple access techniques with Adaptive Quadrature Amplitude Modulation (AQAM) to maximize system performance while keeping the requested QoS level. Channel State Information (CSI) is gathered by the base station from Channel Quality Indicators (CQI) feedback from the User Equipments (UEs). Due to fast variations in channel state due to UE speed, all these data may be outdated when they are received by the base station. Decisions made from outdated information may lead to a system performance degradation. In this paper, the impact of UE speed on the physical layer performance, is studied.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) está en pleno proceso de definición de los estándares de las futuras redes celulares 4G [1]. Se trata de un proceso, en el que participan fabricantes, operadores e institutos de investigación, para discutir las propuestas de evolución de UTRAN (*Universal Terrestrial Radio Access Network*). Se pretende llegar a una tecnología capaz de transmitir altas tasas de información con una baja latencia y que optimice la asignación de los recursos radio disponibles. Así la denominada Evolución a Largo Plazo (*Long Term Evolution*, LTE) [2] ofrecerá a los usuarios finales un acceso inalámbrico de banda ancha con una tasa de varios Mbit/s y con un alcance de varios kilómetros. El empleo de OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) en la capa física junto con su capa de control de acceso al medio (*Medium Access Control*, MAC), permite una asignación de recursos optimizada y la base para implementar servicios con diversa calidad de servicio (*Quality of Service*, QoS).

OFDMA logra una alta eficiencia espectral dividiendo el ancho de banda disponible entre un conjunto de subcanales que se comparten entre todos los usuarios de manera eficiente. Para maximizar la eficiencia de transmisión manteniendo la tasa de error de bit (Bit Error Rate, BER) se emplea modulación adaptativa. De este modo tanto la asignación de los subcanales como el esquema de modulación ha utilizar en cada uno de ellos se deciden de manera dinámica. Por tanto, es necesario que el transmisor conozca en cada momento el estado del canal para poder adaptar la transmisión a los cambios en este. Esto se consigue con los indicadores de calidad del canal (*Channel Quality Indicators*, CQI) son enviados en el canal ascendente (uplink) desde los terminales de usuario (User Equipment, UE).

A parte de los posibles errores que puede introducir el canal ascendente (cuyo análisis está fuera de los objetivos

de este artículo), la existencia de retardos puede provocar que la información sobre el estado del canal sea obsoleta. Esto provoca que la asignación de subcanales y la elección de niveles de modulación deje de ser óptimo y, por tanto, se degrade el rendimiento global del sistema. Los efectos de estos retardos se ven incrementados cuando la velocidad de los terminales de usuario se incrementa al disminuir el tiempo de coherencia del canal.

El objetivo de este artículo es determinar cuales son las velocidades máximas que pueden alcanzar los terminales de usuario para un retardo en la adaptación determinado. Para realizar las simulaciones se ha empleado un modelo basado en las especificaciones de LTE [2] implementado sobre la plataforma WM-SIM [3]. El modelo permite simular un enlace descendente LTE en el que, entre otros muchos parámetros, se puede configurar la velocidad a la que se desplazan los terminales. La importancia de estudiar el impacto de la velocidad radica en la aplicación de OFDMA a las comunicaciones vehiculares como se propone en [9].

Para completar la exposición del problema bajo estudio, en la sección II se realiza una breve descripción de LTE centrada en cómo se realiza la asignación de recursos y la modulación adaptativa. También se analiza los factores que afectan a la BER en estos sistemas prestando especial atención en el retardo en la realimentación de los CQI en el canal ascendente y en los efectos de la velocidad de los terminales de usuario. La sección III presenta el modelo, mientras que los resultados obtenidos se analizan en la sección IV. Por último, la sección V recoge las principales conclusiones y las líneas de trabajo futuras.

II. CONSIDERACIONES PREVIAS

A. Tecnología base

El término OFDMA se emplea cuando se utiliza la modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) como técnica de multiplexación. OFDM es una técnica de modulación extensamente empleada para contrarrestar los efectos de la interferencia intersimbólica (*Inter Symbol Interference*, ISI) en canales selectivos en frecuencia [8]. Se basa en la división del ancho de banda en un conjunto de subbandas o subcanales lo suficientemente estrechos como para poder considerar que la respuesta del canal en ellos es plana. Para LTE se define un anchura de $M = 12$ subportadoras, que pueden ser localizadas o dispersas, para estas subbandas. Los anchos de banda establecidos van desde los 1.25 hasta los 20 MHz con un conjunto de portadoras por símbolo OFDM que va desde las 128 hasta las 2048. Para el ancho de banda de 20 MHz el número de subportadoras útiles se reduce a 1200 con

lo que el número de subbandas se fija en 100. Las restantes se dividen entre las 848 subportadoras de guarda y las 200 dedicadas a tonos piloto.

En el transmisor, la secuencia de símbolos que se pretende transmitir se divide en flujos de símbolos de menor velocidad que se transmiten de manera simultánea sobre un conjunto de portadoras. Para realizar la modulación se emplea la transformada rápida de Fourier inversa (*Inverse Fast Fourier Transform*, IFFT). Posteriormente se añade un prefijo cíclico formado por la copia de un determinado número de las últimas muestras de salida de la IFFT. Este prefijo tiene un doble propósito: por un lado, permite mitigar los efectos de la ISI y, por otro, permite modelar el paso por el canal como una convolución cíclica con lo cual se simplifica la equalización. En el receptor se suprime el prefijo cíclico, se compensan los efectos del canal y se emplea la transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) para demodular la señal.

Los esquemas de modulación definidos para LTE son QPSK, 16QAM y 64QAM. El número de bits asignados a cada subportadora se puede modificar a nivel de subtrama para seguir la respuesta temporal del canal manteniendo los requerimientos establecidos para la BER. En LTE, el intervalo mínimo de transmisión (*Transmission Time Interval*, TTI) en el enlace descendente se corresponde con la duración de dos subtramas $T_{sub-frame} = 0.5$ ms.

Para este estudio se ha asumido una de las configuraciones posibles en LTE en la que la subtrama está compuesta por un símbolo de señalización y 6 de datos. De la misma forma, se ha considerado que los subcanales están compuestas por subportadoras continuas ya que es un caso más propicio para aplicar modulación adaptativa.

B. Errores en la adaptación

Existen diversos fenómenos que pueden producir errores en la modulación adaptativa. En primer lugar, la selección de la modulación se realiza normalmente a partir de una información sobre las condiciones del canal (*Channel State Information*, CSI) no ideal. Esto es debido a que no se conoce la respuesta del canal sino una estimación de la misma. Por otro lado, el desplazamiento Doppler puede hacer que la CSI recibida quede obsoleta, es decir, es diferente en el instante en el que se va a usar en el transmisor de como era cuando se midió en el receptor. Este efecto se agrava al aumentar la velocidad a la que se desplazan los terminales receptores. Un estudio en profundidad de ambos efectos para una transmisión monoportadora puede encontrarse en [4].

Finalmente, el propio retardo en el cálculo de la CSI o en su transmisión por el enlace ascendente y los errores que se puedan producir en su transmisión también influyen en el rendimiento final del sistema.

Con el objetivo de acotar el estudio a determinar el efecto de la velocidad a la que se desplazan los terminales, se han realizado las siguientes asunciones:

- Se dispone de un conocimiento perfecto del comportamiento del canal,
- el retardo con el que se recibe la información sobre el canal en el transmisor se mantiene constante,
- y no se producen errores en el enlace ascendente.

C. Efectos del desplazamiento relativo

El desplazamiento relativo de los terminales móviles respecto a la estación base provoca la aparición del denominado efecto Doppler. Éste provoca un desplazamiento en frecuencia de la señal recibida respecto a la transmitida que puede llegar a originar interferencia entre portadoras (*InterCarrier Interference*, ICI). En [6] se demuestra que este efecto es apreciable cuando la frecuencia Doppler normalizada, $f_D T$, se encuentra por debajo de un determinado umbral. Antes de analizar los resultados se calculará este parámetro para valorar el impacto de la ICI sobre los mismos.

III. MODELADO DEL SISTEMA

En la figura 1 se muestra un esquema del escenario modelado. Con él se trata de emular el comportamiento del enlace descendente en una celda LTE, en la que una estación base, eNode B (*Enhanced Node B*), da servicio a varios terminales de usuario, UEs, que se desplazan por ella. En aras de la simplicidad, este desplazamiento se asume constante y se produce siempre por el interior de la celda. Para cada usuario se calculan los estadísticos de QoS: BER, retardo, *throughput* y tasa de pérdidas.

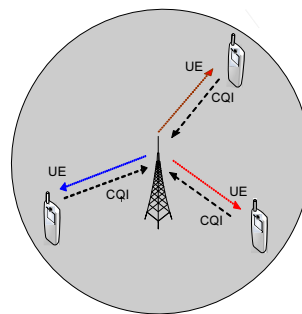


Fig. 1. Escenario modelado

A. Estación base

Simula el comportamiento de una estación base LTE (eNode B) y, como tal, realiza la planificación y asignación de recursos, construye la subtrama y envía los símbolos OFDM que la componen al canal de manera secuencial.

Para asignar los turnos de transmisión se emplea un algoritmo de planificación (*Round Robin* o *Best Channel*). Estos algoritmos tienen en cuenta datos como los indicadores CQI, la ocupación de las colas o la QoS asignada a cada usuario para determinar cómo se hace la asignación de recursos.

Para cada usuario se determina el nivel de modulación a ritmo de subtrama en función del valor instantáneo de la SNR en los subcanales que se le ha asignado y de su valor de BER objetivos. Así, para cada BER objetivo se tienen predefinidos unos umbrales de SNR. Los niveles de modulación pueden variar de un usuario a otro por lo que en un mismo símbolo OFDM pueden utilizarse distintas modulaciones.

Una vez se rellenan la subtrama, se le añaden las subportadoras pilotos y de guarda y se procesan, de manera secuencial, los símbolos OFDM en modém para su transmisión. Este realiza la IFFT del símbolo OFDM y, ya en el dominio del tiempo, le añade el prefijo cíclico con el que se minimiza la ISI y se transmite.

B. Enlaces radio

Para el enlace radio descendente se ha modelado un canal selectivo en frecuencia en el que se producen desvanecimientos temporales debido a la propagación multicamino [5]. La respuesta del canal está compuesta por múltiples etapas (taps) que determinan el perfil medio de potencia para Suburbano [7]. La potencia instantánea de los retardos varía siguiendo una distribución de Rayleigh mientras que los retardos se consideran constantes. El efecto del ruido en la antena receptora se modela con un bloque AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) de media cero. Al ser la potencia de la señal transmitida unitaria y constante, la varianza de ruido se modela a partir del valor medio de la SNR para esa antena.

El modelado del canal ascendente es más simple: se ha asumido que se dispone de un conocimiento perfecto del comportamiento del canal, que el retardo con el que se recibe la información sobre el canal en el transmisor se mantiene constante y que no se producen errores en él.

C. Terminal de Usuario

El terminal de Usuario (UE) recibe la señal física transmitida que ha sufrido los efectos del canal radio. Así, se suprime el prefijo cíclico, se ecualiza para paliar los efectos del canal y se demodula empleando la FFT.

La respuesta del canal debe estimarse en cada terminal aunque en este estudio se ha asumido como conocida. Dicha respuesta se emplea para realizar una ecualización *zero-forcing*. Esta técnica tiene el inconveniente de potenciar el ruido que contamina la señal recibida por el fenómeno conocido como mejora de ruido.

La información de planificación se extrae del primer y segundo símbolo de la subtrama y se usa para recuperar los recursos radio asignados a ese usuario y para realizar la demodulación de los mismos.

IV. RESULTADOS

Antes de presentar los resultados de las simulaciones es necesario determinar las condiciones en las que se ha realizado el estudio. Los parámetros del modelo empleado en la simulación se pueden consultar en la tabla I.

TABLE I
PARÁMETROS DEL SISTEMA

Parámetro	Valor
Tamaño de la FFT	2048
Subportadoras de datos	1200
Longitud del prefijo cíclico	144 muestras
Frecuencia de portadora	1.8 GHz
Frecuencia de muestreo	30.72 MHz
Velocidad del terminal	5-15 Km/h
SNR	10-25 dB
Desviación media SNR	3 dB
Número de usuarios	5
Retardo en el uplink	1 y 3 ms
BER Objetivo	10^{-4}

Al suponer conocida la respuesta del canal y considerar el retardo en el enlace ascendente como constante, se fijan las condiciones de simulación para centrar el estudio en el efecto de la velocidad de los terminales. Sin embargo, existe un efecto más a tener en cuenta: el desplazamiento Doppler que se producen por el movimiento de los terminales.

Este desplazamiento en frecuencia puede llegar a provocar la aparición de ICI dependiendo del valor de la frecuencia Doppler normalizada, $f_D T$. Este parámetro se define como el producto del desplazamiento Doppler, dependiente de la velocidad del terminal, por la longitud del símbolo OFDM. En [6] se concluye que los efectos de la ICI se pueden considerar despreciables siempre y cuando $f_D T \ll 10^{-3}$.

Si se realiza los cálculos para la máxima velocidad considerada, 15 Km/h, se obtiene un valor aproximado de $f_D T$ de $1.7 \cdot 10^{-3}$, ligeramente superior al límite antes comentado. En este caso, aunque existe ICI, su efecto puede considerarse despreciable respecto a los otros factores de error: el valor de la SNR y, sobre todo, la incorrecta modulación adaptativa provocada por una CSI obsoleta.

El valor escogido para fijar el retardo es 3 ms que parece el estándar de facto para las simulaciones en las propuestas sobre LTE bajo consideración por parte del 3GPP. En todos los casos se han considerado 5 UEs en la celda, cada uno de los cuales tiene una SNR que sigue una distribución lognormal con una desviación media de 3 dB sobre la fijada. Por ello se representa la BER promedio calculada a partir de la de cada usuario.

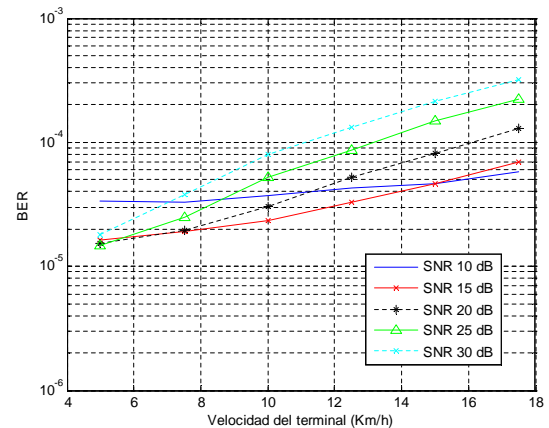


Fig. 2. Variación de la BER con la velocidad del terminal para diferentes valores de SNR. Retardo de 1 ms y *Round Robin*.

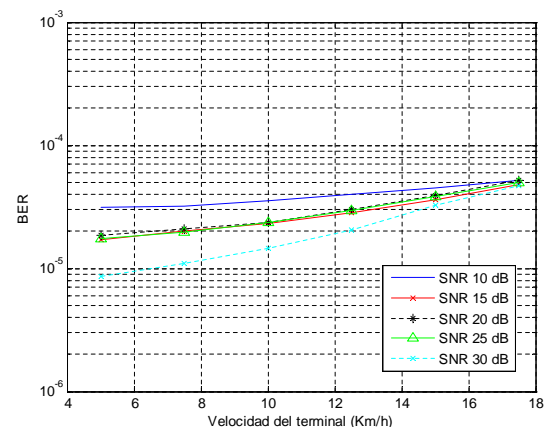


Fig. 3. Variación del promedio de la BER con la velocidad del terminal para diferentes valores de SNR. Retardo de 1 ms y *Best Channel*.

En las figuras 2 y 3 se comparan los resultados obtenidos cuando no existe apenas retardo y se emplean dos algoritmos

de planificación diferentes. Para *Best Channel*, figura 3, se mantiene la BER medio por debajo del objetivo marcado mientras que con *Round Robin* existe una mayor sensibilidad al aumento de la velocidad del UE y se llega a superar el umbral fijado. Dicha sensibilidad es incluso mayor al incrementarse la SNR media. Estas diferencias se deben a que *Round Robin* no hace uso de información sobre el estado del canal para asignar los turnos. En ambos casos, se detecta que tanto la BER como la dependencia de ésta con la velocidad aumentan al incrementarse la SNR. Ello es debido a que, a medida que aumenta la SNR, se emplean modulaciones mayores con lo que el impacto de los errores sobre la BER, si estos se producen, es mayor.

Cuando el retardo se aumenta hasta 3 ms (figuras 4 y 5) se hace patente la degradación de la BER al aumentar la velocidad para una SNR media fija. Para *Best Channel* el retardo implica un doble error ya que tanto la asignación del turno de usuario como del nivel de modulación se ven afectadas. En cambio, para *Round Robin* tan solo se ve afectada la elección del nivel de modulación.

En la figura 5 se observa como el error con *Best Channel* es similar para diferentes valores de la SNR y la BER evoluciona de manera similar con la velocidad. En ambos casos queda claro que la BER se mantiene por debajo de la BER objetivo si la velocidad no supera los 7 Km/h. Este valor es un límite superior razonable para un usuario pedestre.

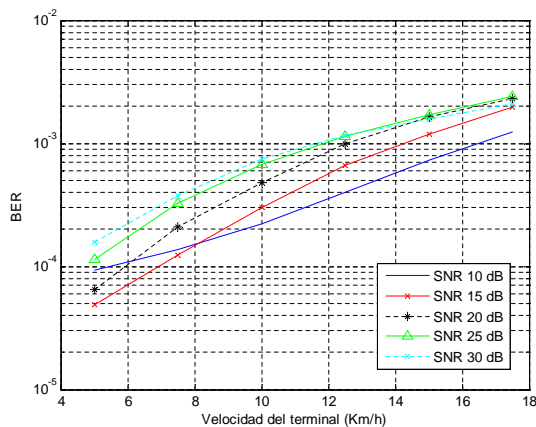


Fig. 4. Variación de la BER con la velocidad del terminal para diferentes valores de SNR. Retardo de 3 ms y *Round Robin*.

Incluso cuando el retardo introduce errores, *Best Channel* permite una mejor BER media en el sistema que *Round Robin*. Aunque el primero margine a los usuarios con peor calidad de recepción es el más indicado en un sistema celular. Ello es debido a que los usuarios tienen un peor percepción del servicio cuando éste es de peor calidad que cuando no lo tienen por estar en zona de poca cobertura.

V. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este artículo se ha evaluado cómo la velocidad a la que se desplazan los terminales de usuario afecta al rendimiento de un sistema OFDMA. Los cambios en el tiempo de coherencia del canal debidos a la velocidad de los terminales receptores provoca que las variaciones del canal sean más rápidas. En ese caso puede existir diferencias entre las condiciones actuales del canal y el conocimiento del mismo que se tiene en la

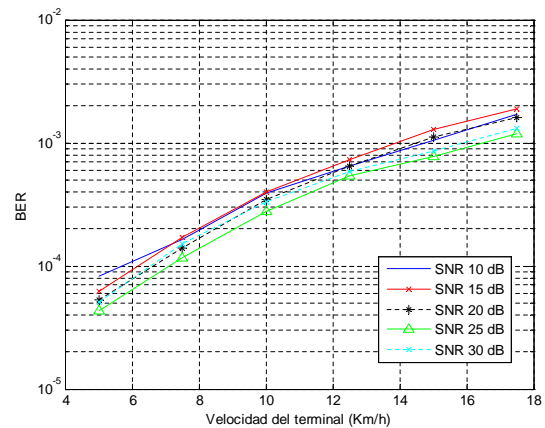


Fig. 5. Variación de la BER con la velocidad del terminal para diferentes valores de SNR. Retardo de 3 ms y *Best Channel*.

estación base, lo que empeora el rendimiento obtenido con al modulación adaptativa.

De las simulaciones se concluye para una determinada BER_T va a existir una máxima velocidad para los terminales por encima de los valores de BER superan el límite impuesto. Las limitaciones detectadas deben ser tenidas en cuenta si se escoge tecnologías similares para los futuros servicios de banda ancha en vehículos. Por ejemplo, en [9] ya se proponía un enlace ascendente OFDMA para este tipo de comunicaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado parcialmente por el gobierno de España y la Unión Europea de acuerdo al proyecto TIC2003-07819 (FEDER) y por la empresa AT4Wireless, S.A.

REFERENCIAS

- [1] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). www.3gpp.org
- [2] 3rd Generation Partnership Project. "UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE)". <http://www.3gpp.org/Highlights/LTE/LTE.htm>
- [3] Sánchez, Juan J.; Gómez, G.; Morales-Jiménez, D.; Entrambasaguas, J. T.: "Performance evaluation of OFDMA wireless systems using WM-SIM platform". MOBIWAC. Proceedings of the international workshop on Mobility management and wireless (Torremolinos, Spain.). ISBN:1-59593-488-X.2006, Pages: 131 - 134.
- [4] Paris, J.F.; Aguayo-Torres, M.C.; Entrambasaguas, J.T.: Non-ideal Adaptive Modulation: Bounded Signaling Information and Imperfect Adaptation. Proceedings of the Global Communication Conference, Globecom 2004, Dallas, December, 2004
- [5] Goldsmith, A.: Wireless Communications. Cambridge University Press, 2005.
- [6] Aguayo Torres, M.C.: Modulación multiportadora adaptativa para canales selectivos en frecuencia con desvanecimientos. Ph. D. Universidad de Málaga. Departamento de Ingeniería de Comunicaciones. Septiembre 2001
- [7] 3rd Generation Partnership Project. "Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA)", Release 7. Technical Specification 25.814, <http://www.3gpp.org>.
- [8] Nee, R.; Prasad, R.: OFDM for wireless multimedia communications. Artech House Publishers, Boston, 2000
- [9] Nogueroles, R.; Bossert, M.; Donder, A.; Zyablov, V.: Improved performance of a random OFDMA mobile communication system Vehicular Technology Conference, 1998. VTC 98. 48th IEEE, Volume 3, 18-21 May 1998 Page(s):2502 - 2506 vol.3 Digital Object Identifier 10.1109/VETEC.1998.686210