

ESTUDIO DE LA ADAPTACIÓN AL ENLACE EN EL SISTEMA DE COMUNICACIONES MÓVILES 3.5G HSDPA



AUTOR

David Martín-Sacristán
Gandía
Msc. Telecomunicación
Universidad Politécnica de Valencia - Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
damargan@iteam.upv.es
ESPAÑA

AUTOR

José Francisco Monserrat del Río
PhD Telecomunicación
Universidad Politécnica de Valencia - Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
jomondel@dcom.upv.es

AUTOR

Daniel Calabuig Soler
Msc. Telecomunicación
Universidad Politécnica de Valencia - Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
dacaso@iteam.upv.es
ESPAÑA

AUTOR

José Díaz Cervera
Ing. Telecomunicación
Universidad Politécnica de Valencia - Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
jodiacer@iteam.upv.es
ESPAÑA

Fecha de Recepción del Artículo: Febrero 15 de 2008 **Fecha de Aceptación del Artículo: Mayo 13 de 2008**

Artículo Tipo 1

RESUMEN

La tecnología HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) es una evolución de UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) creada por el 3GPP (3rd Generation Partnership Project) con el objetivo de aumentar la capacidad de transmisión en el enlace descendente. Su mejora se basa en la utilización de un canal compartido de comunicación gestionado de forma eficiente desde la estación base - por medio de un packet scheduler -, la utilización de mecanismos de retransmisión y combinación de información avanzados - hybrid ARQ (Automatic Repeat-reQuest) - y la posibilidad de emplear modulaciones de orden superior - 16QAM y 64QAM. Todas estas características serían inútiles sin unos buenos procedimientos de adaptación al enlace (link adaptation) que ajustaran los parámetros de transmisión a la calidad del enlace radio. El presente artículo aborda el estudio y optimización de los mecanismos de link adaptation en HSDPA aunque las técnicas propuestas pueden ser aplicadas a otros sistemas similares. Tras introducirse la temática del link adaptation se presenta el 'estado del arte' en la materia tanto en HSDPA como en otros sistemas celulares previos. En base a simulaciones realizadas a nivel de sistema se realiza un estudio pormenorizado de las prestaciones ofrecidas por el procedimiento más divulgado en la bibliografía, basado en el uso de indicadores de la calidad del canal. Para mejorar las prestaciones de los procedimientos comunes se proponen nuevas estrategias de procesado de los indicadores de calidad. Mediante simulación se ha demostrado la mejora obtenida con estas nuevas estrategias en lo referente a la maximización del throughput de la transmisión.

PALABRAS CLAVE

HSDPA, Adaptación al enlace,
Indicadores de la calidad del canal

ABSTRACT

HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) technology is an evolved version of UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) done by the 3GPP (3rd Ge-

neration Partnership Project) focused on the downlink capacity improvement. HSDPA enhancement is based on the efficient management of a shared channel performed by the Node-B - employing a packet scheduler -, the usage of advanced retransmission and combination mechanisms - hybrid ARQ (Automatic Repeat-reQuest) - and the availability of high order modulations - 16QAM and 64QAM -. All these characteristics would be worthless without good link adaptation procedures that adjust transmission parameters according to the radio link quality. This paper deals with the study and optimization of link adaptation mechanisms in HSDPA, although the proposed techniques could be easily extended to similar systems. Firstly, link adaptation is introduced and it is presented link adaptation 'state of the art' in HSDPA and other older cellular systems. Based on the results obtained with a system level HSDPA simulator, the performance of the link adaptation algorithm most common in the literature, which employs channel quality indicators, is assessed. In order to improve the performance of the common method, new channel quality indicator processing strategies have been proposed. Simulation results have shown non-negligible throughput improvements with those new strategies.

KEYWORDS

HSDPA, Link adaptation, Channel quality indicator

INTRODUCCIÓN

El consumidor actual de redes de comunicaciones móviles no sólo espera disponer de un servicio básico de comunicación de voz en movilidad, sino que exige una calidad de servicio equiparable al de las redes fijas que le permita acceder a aplicaciones como la video conferencia, la difusión de audio y video o internet móvil con gran calidad.

Esta demanda fuerza y orienta la evolución de las diferentes tecnologías celulares e inalámbricas. En este sentido, el estándar 3G UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) ha evolucionado hacia el 3.5G HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) con el objetivo de aumentar la tasa de transmisión en el enlace descendente (de la estación base al usuario), optimizando su funcionamiento para la transmisión de paquetes.

Para profundizar en el conocimiento de la tecnología HSDPA se recomienda la lectura de [1] y [2].

Si bien muchos de los procesos y algoritmos de HSDPA están claramente especificados, para garantizar la interoperabilidad entre equipos y sistemas, algunos puntos clave de su funcionamiento están abiertos a diferentes implementaciones. Este hecho ha impulsado una gran actividad investigadora en campos como la adaptación al

enlace (link adaptation o LA) o la cronoexecución de las transmisiones (scheduling).

Este artículo se centra en el estudio y mejora de los mecanismos de link adaptation en HSDPA.

En primer lugar se hará una breve descripción de HSDPA. A continuación se realizará una exposición del estado del arte en adaptación al enlace presentando las técnicas de link adaptation más comúnmente adoptadas en GPRS (General Packet Radio Service) y EDGE (Enhance Data Rates for GSM Evolution). Se presentará el simulador empleado en el estudio. Posteriormente se describirán los fundamentos del link adaptation en HSDPA y el algoritmo clásico implementado. En base a simulaciones se discutirán las ventajas e inconvenientes del algoritmo típico para finalmente proponer y evaluar mejoras.

1. HSDPA

A continuación se indican los aspectos de HSDPA más relevantes para el presente estudio. En primer lugar es de destacar que HSDPA emplea un canal de transporte compartido. No se establece un canal dedicado mediante la reserva de recursos, sino que el conjunto de los recursos del sistema se reparte dinámicamente entre los usuarios. Cada 2 ms, que es el tiempo de transmisión de un bloque radio (TTI o Transmission Time Interval), se reasignan códigos de espectro ensanchado (el acceso es de tipo WCDMA) entre los usuarios del sistema.

Se permite tanto la asignación de múltiples códigos a un usuario (transmisión multi-código) como la asignación simultánea de códigos a varios usuarios (multiplexación por división en código). Esta reasignación rápida es claramente beneficiosa para la transmisión de paquetes.

En HSDPA es posible adaptar la modulación y codificación dinámicamente en cada TTI. Las modulaciones permitidas son QPSK, 16QAM y en las últimas versiones del estándar 64QAM. La disponibilidad de modulaciones de orden superior junto con el amplio ancho de banda empleado (alrededor de 5MHz) permite altas velocidades de transmisión. La codificación de canal se realiza mediante un turbocodificador de tasa 1/3, pero es posible obtener otras tasas empleando repetición o perforado (puncturing) de bits. Por lo explicado, se deduce que hay una gran cantidad de combinaciones de modulación y tasa de codificación disponibles. Por un lado esto permite una gran adaptabilidad al enlace radio y por otro lado dota al sistema de una alta flexibilidad para dar servicio a usuarios con diferentes requerimientos de calidad.

Por último, una novedad de HSDPA con respecto a las versiones previas de UMTS es el uso del mecanismo hybrid ARQ. Este mecanismo incluye un ARQ (Automatic Repeat-reQuest) tradicional en el que el receptor envía

reconocimientos al emisor para informarle de la recepción incorrecta o correcta de un bloque de datos, requiriendo o no su retransmisión. Concretamente, esta tarea se realiza por medio de un protocolo de tipo stop-and-wait (SAW) multicanal en el que varios procesos SAW operan en paralelo.

Cada proceso SAW en el emisor realiza paradas tras cada transmisión hasta la recepción de su reconocimiento, de ahí la necesidad de los múltiples canales para realizar un uso eficiente de los recursos. Adicionalmente, el mecanismo hybrid ARQ permite que las retransmisiones de una misma información se combinen en el receptor aumentando la probabilidad de realizar una decodificación correcta.

La combinación puede darse según dos esquemas: Chase combining, en el que las transmisiones a combinar son idénticas, e Incremental Redundancy (IR), en el que las transmisiones a combinar son diferentes.

2. LINK ADAPTATION

La adaptación al canal, o link adaptation LA, consiste en un conjunto de mecanismos que permiten modificar dinámicamente los parámetros de transmisión, adaptándolos a la calidad del enlace radio, con el objetivo de optimizar las prestaciones de dichas transmisiones de acuerdo a algún criterio. Son cuatro los elementos clave del LA: parámetros adaptables, medidas de calidad del enlace, criterios de optimización y algoritmo de adaptación.

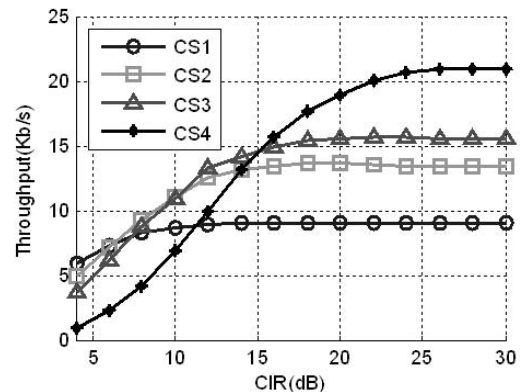
Según los parámetros que se varien se pueden considerar diferentes mecanismos de link adaptation. Por ejemplo, en el Adaptive Modulation and Coding (AMC) se puede modificar la modulación y codificación mientras que en el Incremental Redundancy (IR) se puede variar la redundancia de las transmisiones. Finalmente y en el Adaptive Power Allocation (APA) y Power Control (PC) se realiza una gestión dinámica de la potencia. Este artículo está centrado en el AMC e IR.

Las medidas de calidad del enlace pueden ser muy diferentes. Pueden, por ejemplo, tomarse directamente sobre la señal recibida (CIR – Carrier to Interference Ratio – o SINR – Signal to Interference plus Noise Ratio) o pueden referirse a la tasa de error en el receptor relativa a la cantidad de bits, paquetes o bloques recibidos (BER, PER y BLER respectivamente). En el presente estudio se emplean unos indicadores propios de HSDPA relacionados tanto con la SINR como con el BLER.

En cuanto a los criterios de optimización, un crite-

rio válido podría ser, por ejemplo, la maximización del throughput de transmisión, entendido como el número de bits correctamente recibidos por unidad de tiempo. Este criterio es muy útil cuando se trabaja con tráfico de tipo best effort, como puede ser el tráfico web, ftp o de e-mail, y es el empleado en el presente estudio.

Figura 1. Curvas de throughput vs CIR para los esquemas de codificación de GPRS [3].



A continuación se presentarán varios algoritmos de link adaptation empleados en sistemas celulares de 2G y 2.5G y, posteriormente, el más divulgado dentro de la tecnología 3.5G HSDPA.

2.1. Link adaptation en GPRS

La tecnología GPRS surgió como una evolución de la red GSM permitiendo la transmisión eficiente de paquetes. En GPRS se pueden emplear cuatro esquemas de codificación (Coding Schemes – CS), todos ellos con la misma modulación, GMSK, pero diferente tasa de codificación (1/2, 2/3, 3/4 y 1). En GPRS el link adaptation realiza un AMC que trata de elegir el esquema de codificación más adecuado a la calidad radio, generalmente con el objetivo de maximizar el throughput. Para ello se suelen emplear las curvas de throughput frente a CIR de cada esquema de codificación. Es importante tener en cuenta que las curvas de throughput dependen, entre otros factores, de la velocidad del móvil y de la aplicación o no de frequency hopping. La Figura 1 muestra estas curvas para un usuario a 3 km/h y considerando el uso de frequency hopping [3].

Hay dos tipos de algoritmos clásicos utilizados para link adaptation en GPRS:

- Algoritmos basados en CIR: en ellos se emplea el valor de CIR como indicador de la calidad del enlace. Se definen unos umbra-

les de CIR correspondientes a las intersecciones de las curvas de throughput para los diferentes CS (puntos A, B y C de la Figura 1). Este método es equivalente a elegir el CS que maximice el throughput efectivo calculado con la siguiente fórmula [3]:

$$Thr = Rate(CS) * (1 - BLER(CS, CIR)) \quad (1)$$

- Algoritmos basados en BLER: el parámetro empleado para estimar la calidad del canal es la proporción de bloques erróneamente recibidos, o BLER (Block Error Rate), promediada durante un cierto periodo de tiempo. Se puede encontrar un ejemplo en [3] donde se presenta una fórmula para obtener los umbrales de BLER óptimos. El algoritmo funciona de modo que si el BLER estimado durante un determinado periodo de tiempo es menor que el mínimo se elige un CS más eficiente (el modo superior). Si, por el contrario, el BLER es mayor que el máximo se elige un CS más robusto (el modo inferior) y en otro caso se mantiene el CS actual.

En general, las prestaciones de los algoritmos basados en CIR son superiores a los basados en BLER para velocidades altas y similares para velocidades bajas. La definición de unos buenos umbrales es clave, pero dichos umbrales varían según se considere o no frequency-hopping y según la velocidad, lo cual complica bastante la optimización del LA.

Se puede encontrar información adicional sobre link adaptation en GPRS en [4].

Como nota práctica, es destacable que en GPRS se suele emplear el parámetro denominado RX-QUAL como medida de calidad para realizar el LA. Este parámetro es una medida del Pseudo Bit Error Rate (PBER) que se calcula comparando la secuencia recibida antes de decodificar con la secuencia decodificada y vuelta a codificar, computando el número de errores o diferencias.

2.2. Link adaptation en EDGE

En EDGE se pueden emplear hasta 9 esquemas de modulación y codificación (Modulation and Coding Scheme o MCS). Además de GMSK, se dispone de la modulación 8PSK y, de nuevo, la tasa de codificación es variable.

Se pueden obtener curvas de throughput frente a SINR para cada MCS similares a las de GPRS. En EDGE se utiliza la técnica de IR para combinar las diferentes retransmisiones de los paquetes.

En EDGE se definió una nueva medida de calidad diferente a RXQUAL, el BEP (Bit Error Probability), más útil para medir la calidad en transmisión de paquetes. Esta medida se evalúa en cada ráfaga, obteniéndose mayor información sobre el canal radio y su variación durante la

transmisión de un bloque de datos. Empleando el BEP de cada ráfaga (BEPBurst) se obtienen el MEAN_BEPblock (media) y CV_BEPblock (varianza) de cada bloque radio tal y como se indica en [5]. Promediando dichos valores durante un periodo de reporte se obtienen el MEAN_BEP y CV_BEP. En el anexo D de [5] se aporta un ejemplo de selección de esquema de modulación y codificación basado en las estimas MEAN_BEP y CV_BEP orientado a la maximización del throughput. Es necesario disponer de tablas de este tipo con y sin IR, y para cada tipo de modulación.

En EDGE AMC e IR son complementarios, como se afirma en [6]. En dicho artículo se explica que un IR puro que emplee modulaciones de orden superior puede obtener mayores tasas que un LA puro con modulaciones adaptativas, pero a costa de una mayor complejidad, es decir más memoria, y pudiendo presentar un aumento en el retardo de la transmisión. Tanto el retardo como los requisitos de memoria pueden reducirse empleando tasas de codificación iniciales bajas, pero de esta forma el throughput disminuiría. Además de los problemas reseñados, por cuestiones de robustez es necesario tener la posibilidad de emplear modulaciones de bajo orden si la calidad del canal es muy baja, para asegurar la recepción de la información. De esta exposición se deduce que el link adaptation es necesario pero que debe ser optimizado.

3. LINK ADAPTATION EN HSDPA

Como ya se ha comentado, el link adaptation controla los parámetros que configuran la transmisión individual a un usuario adaptándola a la calidad del enlace radio. En HSDPA los parámetros configurables son el tamaño de bloque de transporte, tasa de codificación, modulación, parámetros HARQ y potencia.

El scheduling, por otro lado, decide a qué usuarios se transmitirán paquetes en cada TTI y con cuántos códigos y potencia.

Por lo tanto, en un sistema HSDPA real hay cierta interrelación entre el scheduling y el link adaptation. En este estudio se considera únicamente la optimización del link adaptation como paso previo para en un futuro optimizar la gestión global de recursos. Las conclusiones obtenidas podrán ser tenidas en cuenta en los schedulers particulares.

A continuación se presenta el indicador de calidad del enlace empleado en HSDPA y el algoritmo más común para el link adaptation.

3.1. Channel quality indicator

Como se ha visto para otros sistemas, todo algoritmo de link adaptation emplea algún indicador de calidad del canal como parámetro de entrada. El mecanismo de adaptación al enlace utilizado en HSDPA se basa en información de feed-back que los terminales móviles man-

dan al Nodo-B. La diferencia con respecto a otros sistemas radica en que esta información no consiste en un valor de CIR, SINR o similar medido por el terminal. La filosofía es distinta en HSDPA. En su lugar, el terminal recomienda al Nodo-B una combinación de parámetros de transmisión empleando un indicador conocido como Channel Quality Indicator (CQI). En las especificaciones de HSDPA [7] se puede encontrar la definición, procedimiento de medida y reporte del CQI. A continuación se incluyen los conceptos más relevantes para el presente estudio.

El CQI es un valor entero entre 0 y 30 que se envía desde los terminales móviles al Nodo-B. Físicamente está contenido en dos slots consecutivos del canal ascendente de control llamado HS-DPCCH (High Speed Downlink Physical Common Control Channel), concretamente en los dos últimos slots de cada subtrama radio.

Cada CQI tiene una traducción directa a una combinación de modulación, número de códigos, tamaño de bloque de transporte y tasa de código recogida en unas tablas contenidas en [7], que en adelante se denominará 'modo asociado' al CQI.

El CQI se genera de la siguiente forma: el terminal móvil realiza medidas de nivel físico sobre el canal piloto de UMTS (CPICH) durante un período que acaba 1 slot antes de empezar el reporte del CQI, esto es, durante la subtrama anterior a aquella en la cual se produce el reporte. Con las medidas de nivel físico se obtiene la SINR del canal piloto. Dicha SINR se traduce a un valor equivalente de SINR de una transmisión de datos mediante la adición de una corrección de potencia que se asume es la diferencia de potencia entre el canal piloto y la potencia de una transmisión de datos. Este valor viene configurado por capas superiores. Además, se especifica que el terminal debe asumir que la potencia está igualmente distribuida entre todos los códigos asignados en la transmisión. Con estos datos cada terminal debe ser capaz de obtener el CQI cuyo modo asociado asegurara que, para la calidad de canal experimentada durante el período de medida, se tuviera un valor de BLER menor al 10% en recepción. El método que el terminal siga para cumplir con este objetivo no está especificado, lo que sí está especificado son unos requisitos mínimos que se deben cumplir bajo ciertas condiciones de test referentes a la relación entre el CQI reportado y el BLER experimentado, recogidos en [8].

Dado que el cálculo del CQI se apoya en la estimación de una SINR, es importante tener en cuenta que la estimación de la SINR en la realidad no es

perfecta, existiendo un error en dicha medida. Otro aspecto de los CQIs que será relevante en adelante es todo lo relativo a su temporización. En primer lugar, ya se ha dicho que la medida de canal se realiza durante 2ms. El informe del CQI finaliza 2ms más tarde. Además, existe un retardo adicional.

Figura 2. Diagrama temporal en el procesado de los CQIs.

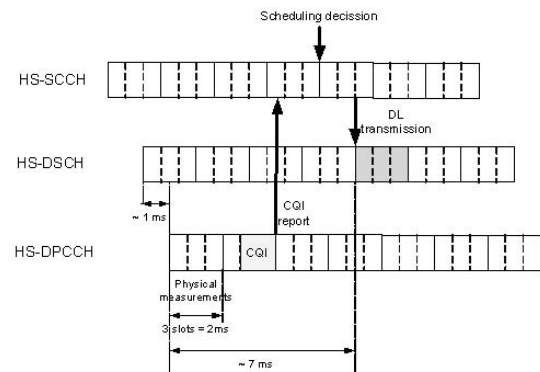
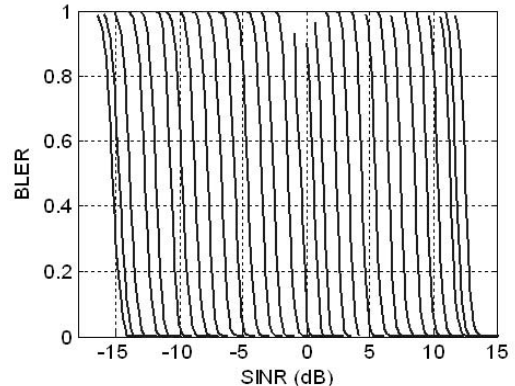


Figura 3. Curvas de throughput frente a SINR



en el Nodo-B desde la recepción del CQI hasta que se efectúa una transmisión teniendo en cuenta. En conjunto, se asume que el tiempo que pasa desde la medida de un CQI hasta que se recibe en el terminal móvil una transmisión formateada en base a la información de ese CQI es de 7 ms. Este retardo, considerando que el canal móvil es variable, puede ser muy perjudicial. Es destacable que en ese cálculo se asume que el CQI se envía en todas las subtramas ascendentes, esto es, con una periodicidad de 2ms. Si bien esta configuración es común en las redes actualmente desplegadas, otros valores mayores son posibles. La Figura 2 recoge el diagrama temporal del cálculo y envío del CQI tal y como se ha explicado.

En cuanto a los modos asociados a los CQIs, existen diferentes tablas que los relacionan según la categoría del terminal HSDPA. Estas tablas se diseñaron con una propiedad común consistente en que la diferencia entre los valores de SINR que precisan modos consecutivos para un BLER del 10% es de aproximadamente 1dB. En la Figura 3 se presentan las curvas de BLER frente a SINR para los 30 modos de la categoría 10 de terminal, donde se observa fácilmente la diferencia de 1dB.

3.2. Link adaptation basado en reportes del CQI

El papel del CQI enviado por el terminal móvil al Nodo-B es recomendar una combinación de parámetros de transmisión. Sin embargo, esta recomendación no es vinculante para el algoritmo de link adaptation que puede tomar decisiones en base a otros parámetros adicionales. El algoritmo de LA descrito en [9] utiliza la información contenida en los CQIs enviados por los terminales móviles al Nodo-B pero hace uso de un bucle de control externo que corrige los CQIs reportados para asegurar un BLER objetivo en la transmisión. Otra descripción del mismo puede encontrarse en [1]. Este algoritmo está en consonancia con lo propuesto por otros autores en [10] y [11].

El mecanismo de LA utilizado pasa por tener un factor de corrección, A , expresado en decibelios que se va actualizando con los reconocimientos del protocolo ARQ. Al recibirse un ACK, A se reduce en A_{down} decibelios y al recibirse un NACK, A se incrementa en A_{up} decibelios.

Al recibirse un CQI éste se traduce a un valor de SINR en base a tablas que dispone el Nodo-B. A dicho valor de SINR se le resta el valor de A , obteniendo un SINR corregido. El CQI finalmente considerado será aquel cuyo valor de SINR correspondiente se acerque más al corregido. Para que esta estrategia sea realizable se debe asumir un conocimiento a priori de la relación entre CQI y SINR en el Nodo-B. En [9], en lugar de asumir el conocimiento exacto de esta relación, se asume el conocimiento de la diferencia relativa de SINR entre CQIs consecutivos fijándola a 1dB (consecuente con lo que se vio en el apartado anterior), lo cual resulta equivalente.

Con el algoritmo propuesto, en caso de que la estimación del CQI enviada por el móvil al Nodo-B sea sistemática o estadísticamente optimista, el factor de corrección tenderá a crecer al producirse errores en la transmisión y recibirse NACKs, lo que hará que el CQI corregido tienda a ser menor que el indicado por el móvil, con lo que la probabilidad de que se produzcan errores en la transmisión decrecerá.

Se puede demostrar que usando este algoritmo el BLER de las primeras transmisiones, sin tener en cuenta el BLER de las retransmisiones, tiende a:

$$BLER = \frac{1}{1 + \frac{A_{up}}{A_{down}}} \quad (2)$$

4. ENTORNO DE SIMULACIÓN

En el presente estudio se ha utilizado un simulador dinámico de nivel de sistema del enlace descendente de HSDPA.

Tabla 1. Parámetros de simulación.

Parámetro	Modelo / Valor
Potencia del Nodo-B	43 dBm
Potencia del piloto	33 dBm
Pathloss	$L(dB) = 128.1 + 37.6 \log_{10} d(Km)$
Shadowing	lognormal, 8dB desv. estándar, distancia de correlación 20m.
Fast fading	$f_{\psi}(\psi) = \frac{27}{2} \psi^2 e^{-3\psi}$
Velocidad	Usuarios peatonales: 3 Km/h Usuarios vehiculares: 50 Km/h
Factor de ortogonalidad	Usuarios peatonales: 0.9 Usuarios vehiculares: 0.5
Radio celular	500 m
Número de celdas	7
Celdas interferentes	6
Error medida CQI	Distribución lognormal, media 0, desv. estándar 1dB
Categoría de Terminal	10
Procesos HARQ	6
Parámetros del bucle externo para LA	$A_{up} = 9 A_{down}$ BLER objetivo = 10%
Modos de transmisión	30 modos asociados a los CQI de la categoría 10
Combinación HARQ	Chase combining

Se trata de un simulador por eventos discretos implementado en C++. En la actualidad forma parte de una plataforma de simulación de redes heterogéneas denominada SPHERE. En [12] se puede encontrar una descripción detallada de su implementación.

Los principales parámetros de las simulaciones realizadas se muestran en la Tabla 1.

Es de destacar que en las simulaciones se ha considerado un único usuario moviéndose por la celda y que el modelo de tráfico es de buffer lleno, es decir, que la estación siempre tiene datos para transmitir al usuario. Así se consigue estudiar el link adaptation aislado del scheduling.

5. ESTUDIO DEL ALGORITMO COMÚN

Como ya se ha visto, en HSDPA el terminal móvil es el encargado de informar de forma periódica a la estación base de la calidad radio que percibe. Concretamente, el móvil le indica al Nodo-B en forma de CQI el modo de transmisión que podría utilizar garantizando un BLER inferior al 10%. Sin embargo, cada modo de transmisión tiene un BLER umbral distinto que optimiza su funcionamiento y, por lo tanto, un mecanismo de link adaptation en el que el scheduler del Nodo-B eligiera para la transmisión el modo indicado por el CQI sería sub-óptimo en términos de throughput. No obstante, al ser la caída de la función BLER para cada modo muy abrupta (véase la Figura 3), la diferencia en los umbrales óptimos y los obtenidos para BLER del 10% no es muy significativa y, en consecuencia, la variación en throughput tampoco lo debería ser. Hay otros problemas más perniciosos para las prestaciones del sistema como, por ejemplo, el error en la medida del CQI. Generalmente se asume que dicho error presenta una distribución lognormal de media nula y 1 dB de desviación estándar, con lo que no merece la pena ser muy meticuloso en la elección del BLER umbral considerando diferencias menores a 1 dB si luego la medida del CQI no es tan precisa. Por tanto, pese a que los medios puestos en el estándar para el link adaptation no son óptimos, en principio, para maximizar el throughput, son aceptables.

Además del error asociado a la medida, existe una importante fuente de error debida al retardo en el link adaptation. Canales muy variables combinados con retardos grandes pueden llevar a una estimación de calidad del canal basada en el CQI muy imprecisa y, por tanto, pueden producir muchas elecciones del modo de transmisión no óptimas: elecciones conservativas u optimistas.

La solución presentada en el apartado 3.2 permite solventar en parte estos errores cometidos en la estimación del canal, al corregir la información proveniente de los CQIs tratando de garantizar un cierto BLER en la transmisión. En este apartado veremos cuáles son sus prestaciones comparadas con un caso en el que se elige como modo de transmisión el asociado al último CQI recibido.

En la Figura 4 se puede observar la CDF (función densidad de probabilidad acumulada) del throughput de un usuario peatonal desplazándose a 3 km/h, calculado en intervalos de 1 segundo para diferentes modelos de transmisión de la información de calidad. Se presentan los resultados para el caso 'ideal' en el que la estación base conoce la SINR sin errores de medida ni retardo en el link

adaptation, para el caso en el que se dispone de la SINR sólo con errores de medida, para el caso en el que se dispone de la SINR sólo con error de retardo, para el caso 'error realista' en el que se dispone del CQI (con error de medida y retardo) y para el caso 'error realista + bucle' en el que se aplica el algoritmo común.

Se constata que en el caso de un usuario peatonal la degradación de prestaciones viene dada principalmente por el error en la medida.

Figura 4. CDF del throughput para un usuario peatonal sin retransmisiones.

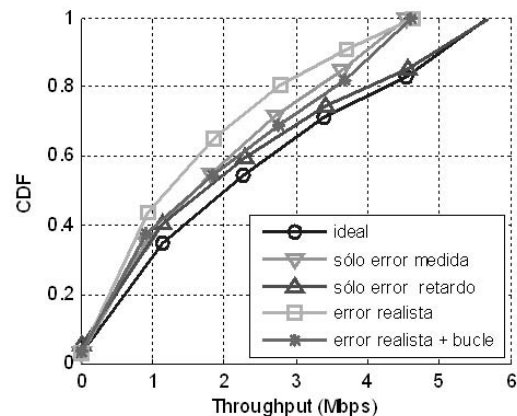


Tabla 2. Throughput medio en kbps para un usuario peatonal sin retransmisiones.

Ideal	Sólo error de medida	Sólo error de retardo	Error realista	Error realista y bucle
2336.0	1813.2	2128.2	1523.7	1877.2

Dicho error limita el máximo throughput alcanzable. Se aprecia una considerable mejora de prestaciones al añadir el bucle de control, que consigue unas prestaciones más cercanas al caso sin error en la medida aunque sin alcanzar los throughputs más altos.

Las diferencias entre los escenarios considerados son más visibles si comparamos los valores de throughput medio en kbps mostrados en la Tabla 2.

La mejora al usar el bucle de corrección con respecto al caso realista es del orden del 23%. Es importante destacar que aún se podría esperar cierta mejora adicional si se consiguieran alcanzar throughputs parciales altos.

En todos los estudios se ha utilizado un valor de γ y en el algoritmo de corrección del CQI. Esta configu-

ración ha mostrado ser la óptima al ser comparada con otras posibles.

En la Figura 5 se muestra la CDF del throughput de un usuario con velocidad vehicular a 50 km/h, para cinco escenarios idénticos a los estudiados para el usuario peatonal. Una comparación de las curvas lleva a la conclusión de que el error por el retardo del proceso degrada el throughput aumentando mucho la probabilidad de que se den tasas bajas (comparar curva 'ideal' con la de 'sólo error retardo'), mientras que la existencia del error en la medida produce una clara limitación en el máximo throughput alcanzable (comparar curva 'ideal' con la de 'sólo error medida'). La curva realista muestra ambos efectos perniciosos. En este caso se aprecia una leve mejora de prestaciones al añadir el bucle de control. Las diferencias entre los escenarios son más visibles si comparamos los valores de throughput medio en kbps de la Tabla 3.

La mejora al usar el bucle de corrección con respecto al caso con error es del orden del 6%. Si bien, es una mejora significativa, al comparar el valor obtenido con los casos ideales se intuye que una mayor mejora es posible. Es de notar, que persiste la limitación en el máximo throughput alcanzable como en el caso de usuarios peatonales.

La intuición expresada y que también se mostró en el caso de usuarios peatonales viene reforzada por varias cuestiones. Por un lado ya se ha visto que tratar de garantizar un cierto BLER es subóptimo en términos de throughput (siendo una solución de compromiso en ese caso tener un BLER de 0.1). Por otro lado, el método de corrección se realiza teniendo en cuenta la información proveniente de los reconocimientos de datos enviados por el receptor, pero todo el procesamiento necesario de estos reconocimientos implica un retardo en la adaptación al enlace que pudiera ser intolerable. Además, el modo en el que se fuerza a tener un BLER dado es artificial e ineficiente. Piénsese por ejemplo en un enlace muy estable que sin bucle cerrado podría fijar su modo de transmisión y no presentar errores, mientras que con el bucle cerrado presentará errores al forzarse el BLER de 0.1. Por todo ello en este artículo se cuestiona que este algoritmo sea óptimo y se propondrán alternativas más eficientes.

En todos los escenarios estudiados hasta el momento se ha supuesto que no hay retransmisiones. La existencia de retransmisiones combinables puede, en ocasiones, mejorar considerablemente las prestaciones de un sistema en cuanto al throughput ofrecido.

La Figura 6 presenta las CDF del throughput de un usuario peatonal con y sin retransmisiones para los escenarios con error realista sin corrección ('error realista') y

con corrección ('error realista + bucle'). La utilización de retransmisiones mejora mucho las prestaciones del sistema minimizando el efecto del error en el link adaptation. En este caso, la adición del bucle de control reduce el porcentaje de retransmisiones del 18% al 10%, pero es ineficiente y resulta perjudicial en términos de throughput, como se puede observar en la Figura 6 y la Tabla 4.

La Figura 7 presenta los resultados para los mismos escenarios que el caso anterior, pero para un usuario vehicular. De nuevo, la utilización de retransmisiones mejora las prestaciones del sistema aunque no tanto como ocurría en el caso peatonal (las gráficas están mucho más cercanas).

Figura 5. CDF del throughput para un usuario vehicular sin retransmisiones.

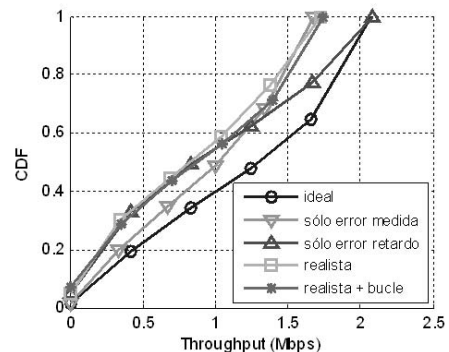


Tabla 3. Throughput medio en kbps para un usuario vehicular sin retransmisiones.

Ideal	Sólo error de medida	Sólo error de retardo	Error realista	Error realista y bucle
1203.7	998.9	954.6	817.2	864.6

Figura 6. CDF del throughput para un usuario peatonal con retransmisiones.

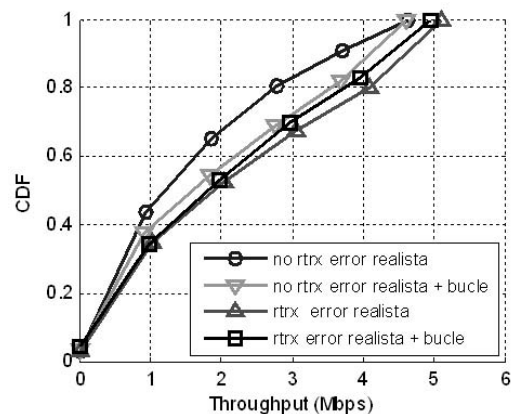
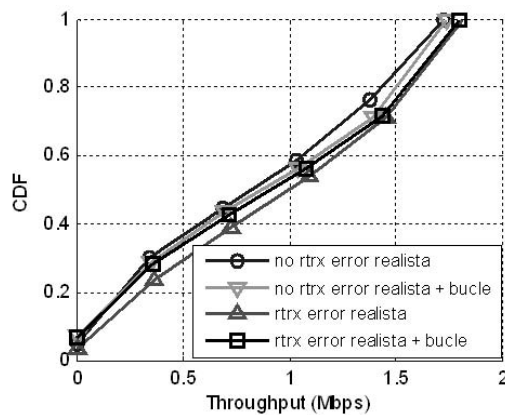


Tabla 4 Throughput medio en kbps para un usuario peatonal.

No rtrx, error realista	No rtrx, error realista y bucle	Con rtrx y error realista	Con rtrx, error realista y bucle
1523.7	1877.2	2177.8	2060.6

Por su parte, la adición del bucle de corrección reduce el porcentaje de retransmisiones pasando de un 25% (hay más errores originalmente que en el caso anterior por la mayor variación del canal del usuario vehicular) al 10%, pero vuelve a ser ineficiente y reduce el throughput, como se puede observar en la Figura 7 y Tabla 5.

Figura 7. CDF del throughput para un usuario vehicular con retransmisiones.**Tabla 5 Throughput medio en kbps para un usuario vehicular.**

No rtrx y error realista	No rtrx, error realista y bucle	Con rtrx y error realista	Con rtrx, error realista y bucle
817.2	864.6	952.1	899.5

En conclusión, la adición del bucle de control si bien es positiva en ausencia de retransmisiones, en presencia de éstas resta eficiencia a la comunicación para los escenarios estudiados. Dado que las velocidades estudiadas son comunes en un escenario urbano y que éste es el mercado fundamental de HSDPA, se desaconseja el uso del bucle de control por sí solo para maximizar el throughput.

6. MEJORA DEL LINK ADAPTATION EN HSDPA

Partiendo de un análisis profundo de los mecanismos que producen la variabilidad del canal radio y

los errores en el link adaptation basado en el CQI, en [14] se propuso prefiltrar o procesar los informes de CQI llegados al Nodo-B antes de ejecutar la adaptación al enlace.

En el citado artículo se asumió una medida de SINR en el equipo de usuario libre de errores y una comunicación sin retransmisiones. En este artículo se realiza una evaluación más completa y realista, suponiendo errores en la medida y la posibilidad de realizar retransmisiones. Como técnica de procesado se ha elegido la predicción LMS (Least Mean Squares) [15] de la serie de CQIs previamente filtrados con un filtro promediador de longitud 64 muestras. Se ha elegido esta técnica de procesado puesto que resultó ser la óptima en el estudio realizado en [14].

Tabla 6. Throughput medio en Kbps para el método mejorado.

	Con error realista	Con error realista y bucle	Con error realista y procesado	Con error realista, bucle y procesado
Peatonal sin retrx	1523.7	1877.2	1847.2	2209.8
Vehicular sin retrx	817.2	864.6	1038.0	988.7
Peatonal con retrx	2177.8	2060.6	1984.7	2173.0
Vehicular con retrx	952.1	899.5	1071.0	1040.0

La principal aportación del presente artículo consiste en la aplicación conjunta del procesado de los CQIs y del bucle de corrección del CQI. Concretamente, se propone la aplicación en primer lugar del procesado de los CQIs y posteriormente del bucle de corrección.

En la Tabla 6 se observa que, en el caso de un usuario peatonal, el procesado no aporta mejora por sí mismo, pero combinado con el bucle puede mejorar las prestaciones de éste último.

Además, en la Tabla 6 se muestra que la aplicación del procesado propuesto es muy beneficiosa para un usuario vehicular, mucho más que el empleo simple del bucle de corrección. Sin embargo, la aplicación conjunta de ambos proporciona unas prestaciones ligeramente inferiores a la del procesado LMS para throughputs altos.

Por tanto, la aplicación conjunta del filtrado y el bucle de control ha demostrado ser una solución válida tanto para usuarios vehiculares como peatonales, mejorando siempre la prestaciones del bucle de control trabajando aislado. El hecho de que la

mejora sea válida para ambas velocidades evita que el sistema tenga que distinguir a los usuarios por velocidad, que era uno de los problemas que se planteaba en [14] donde se empleaba únicamente el procesado.

Al realizar retransmisiones, de nuevo la estrategia combinada se muestra como la mejor opción. En la Tabla 6, para un usuario peatonal se observa que la predicción LMS por sí misma no añade ninguna mejora, pero en su operación conjunta con el bucle es capaz de mejorar el funcionamiento de este último operando aislado y acercarse a las prestaciones de un caso sin procesado. Aún así se produce cierto empeoramiento de prestaciones con respecto a un sistema sin corrección.

La situación es diferente para un usuario vehicular. Por último, en la Tabla 6, se observa que en ese caso tanto la predicción LMS como la operación conjunta de predicción LMS y bucle de corrección introducen una mejora en las prestaciones del sistema.

A la luz de los resultados se reafirma la utilidad del método de operación conjunta de procesado y bucle de corrección. En el caso vehicular la mejora en las prestaciones es notable mientras que en el caso peatonal la operación conjunta es mejor que usar únicamente el bucle de corrección y sólo implica una ligera degradación de prestaciones con respecto al caso sin corrección.

7. CONCLUSIONES

El presente artículo es el resultado de un estudio detallado de los mecanismos de link adaptation en HSDPA. Se ha evaluado el procedimiento de adaptación al enlace más común, el basado en el bucle de corrección. Tras esta evaluación se ha concluido que su uso es ineficiente en la maximización del throughput experimentado por un usuario en el caso de utilizarse mecanismos de HARQ. Para mejorar las prestaciones del algoritmo de bucle de corrección del CQI, se ha propuesto la operación conjunta de este proceso y de un prefiltrado o preprocesado de los CQIs. El procesado empleado ha consistido en la predicción de los CQIs con el método LMS previo filtrado de la serie a predecir con un filtro promediador. El uso del mecanismo propuesto ha proporcionado una mejora en el throughput alcanzado. Además, por el uso del bucle de corrección se evita la realización de un elevado número de retransmisiones que podría ser negativo al introducir grandes retardos. Los resultados obtenidos, por tanto, corroboran la validez del mecanismo propuesto en este artículo para mejorar las prestaciones del link adaptation.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) y al

Fondo Europeo de Desarrollo Regional, la financiación aportada por medio del proyecto TEC2005-08211-C02 "Gestión de Redes de Acceso Radio Reconfigurables mediante Algoritmos Predictivos". David Martín-Sacristán agradece al Ministerio de Educación y Ciencia el apoyo prestado mediante el Programa Nacional de Formación de Profesorado Universitario.

9. REFERENCIAS

- [1]H.Holma, A.Toskala, HSDPA/HSUPA for UMTS, John Wiley and Sons, 2006.
- [2]E.Dahlman, S.Parkvall, J.Sköld and P.Beming, 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband, Academic Press, 2007.
- [3]P.J.Ameigeiras, J.,Wigard, P.N.Andersen, H.C.Damgaard, P.Mogensen, Performance of Link Adaptation in GPRS Networks, Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Fall 2000, vol.2, pp.492-499.
- [4]O.Keseth, F.Gessler and M.Frodigh, Algorithms for Link Adaptation in GPRS, Proc. IEEE Vehicular Technology Conference 1999, vol.2, pp.943-947, May 1999.
- [5]3GPP Technical Specification 45.008, Radio subsystem link control, v 7.1.0, 2005.
- [6]S.Eriksson, A.Furuskär, M.Höök, S.Jäverbring, H.Olofsson and J.Sköld, Comparison of Link Quality Control Strategies for Packet Data Services in EDGE, Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Spring 1999, Houston, pp 938-942, May 1999.
- [7]3GPP Technical Specification 25.214, Physical Layer procedures (FDD), v. 7.6.0., 2007.
- [8]3GPP Technical Specification 34.121-1, User Equipment (UE) conformance specification;Radio transmission and reception (FDD); Part 1; Conformance specification, v. 8.0.0., 2007.
- [9]K.I.Pedersen, F.Frederiksen, T.E.Kolding, T.F.Lootsma and P.E. Mogensen, Performance of High-Speed Downlink Packet Access in Coexistence With Dedicated Channels, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 56, no. 3, May 2007.
- [10]M.Nakamura, Y.Awad and S.Vadgama, Adaptive Control of Link Adaptation for High Speed Downlink Packet Access (HSPDA) in W-CDMA, Proc. WMPC, 2002, pp. 382-386.
- [11]D.W.Parachynch and M.Yavuz, A Method for Outer Loop Rate Control in High Data Rate Wireless Networks, Proc. IEEE Vehicular Technology Conference 2002, pp.1701-1705.
- [12]J.Gozálvez, D.Martín-Sacristán, M.Lucas-Estañ, J.F.Monserrat, J.J.Gonzalez-Delgado, D.Gozálvez and M.Marhuenda, SPHERE – A Simulation Platform for Heterogeneous Wireless Systems, IEEE Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (Tridentcom), Orlando, 2007.
- [13]D.Martín-Sacristán, J.F.Monserrat, J.Gozálvez and N.Cardona, Effect of Channel Quality Indicator Delay on

HSDPA Performance, Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Spring 2007, pp. 804-808.
[14]D.Martin-Sacristán, J.F.Monserrat, D.Calabuig and N.Cardona, HSDPA Link Adaptation Improvement Based on Node-B CQI Processing,

International Symposium on Wireless Communications Systems 07, Trondheim, Oct 2007.
[15]S.Haykin. Adaptive Filter Theory. Fourth Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 920 pp.