

Modelado Matemático del Control de Flujo en HSDPA

Gaspar Pedreño, Juan J. Alcaraz y Fernando Cerdán

Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones,
Universidad Politécnica de Cartagena,

Plaza del Cronista Isidoro Valverde, Edificio "La Milagrosa", CP. 30202 Cartagena.

{gaspar.pedreno, juan.alcaraz, fernando.cerdan}@upct.es

Abstract—El objetivo de este artículo es mostrar el desarrollo teórico que caracteriza el algoritmo de control de flujo de HSDPA que de manera intuitiva/empírica se expone en [1]. Con dicho fin, se presenta un detallado estudio analítico donde este control de flujo es abordado como un problema de optimización cuadrática. Para resolver este problema se hace uso de técnicas de programación dinámica (Dynamic Programming, DP) [2].

Index Terms—HSDPA, Control de Flujo, Optimización, Programación Dinámica

I. INTRODUCCIÓN

HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) [3] fue introducido por el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) en la especificación de *Release 5* con el objetivo de aumentar la velocidad de transmisión de datos en sentido downlink, mejorar la QoS percibida por el usuario y lograr un menor coste por bit entregado. Todo ello con respecto al tráfico a ráfagas (servicios de tipo interactive, streaming y background) para el cual está diseñado.

El concepto HSDPA se basa en la implementación de un nuevo canal de transporte compartido en sentido downlink, denominado HS-DSCH (*High Speed Downlink Shared Channel*) [3], y en la transferencia de algunas funcionalidades de la capa MAC desde la RNC (*Radio Network Controller*) hasta el Nodo B donde aparece ahora la capa MAC-hs (*Medium Access Control-high speed*). El resto de capas/protocolos de la red de acceso radio que se encuentran por encima de la capa MAC son los mismos que en la arquitectura que se presentó en *Release 99* para UMTS, sin modificación alguna. No obstante, el protocolo RLC (*Radio Link Control*) sólo puede operar en modo con o sin reconocimiento, pero no en modo transparente debido al cifrado. La figura 1 ilustra la estructura de protocolos de la interfaz radio para una red UMTS con funcionalidad HSDPA.

En comparación con la arquitectura de *Release 99*, el desplazamiento del planificador de paquetes (*scheduler*) desde la RNC hasta el Nodo B es el cambio más notable. La motivación de este cambio es la necesidad de información reciente sobre el estado del canal radio por parte de los mecanismos de adaptación al canal (*link adaptation*) y del propio *scheduler*, a fin de poder realizar un seguimiento instantáneo de las condiciones radio de cada usuario. Ahora, al tomarse las decisiones de *scheduling* en la capa MAC-hs del Nodo B, se requieren nuevos buffers en el Nodo B para almacenar los datos de cada usuario que esperan ser transmitidos a través de la interfaz radio.

La distribución de la capacidad de almacenamiento entre la RNC y el Nodo B implica la necesidad de un mecanismo de

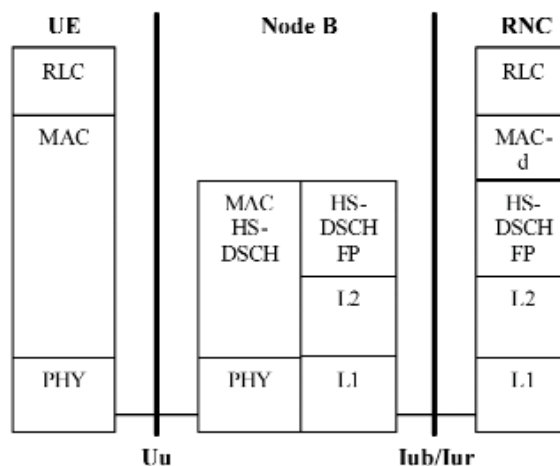


Fig. 1. Estructura de protocolos para la interfaz radio de HSDPA.

control de flujo que regule la transferencia de datos (tramas RLC) desde la RNC al Nodo B. El objetivo de este mecanismo es mantener los buffers del Nodo B a un nivel tal que, por un lado, la capacidad del canal radio no sea malgastada y, por otro, el retardo de encolamiento en el Nodo B no sea demasiado alto. Por otro lado, dichos buffers no deben estar demasiado llenos ya que, en caso de producirse un handover (cambio de celda/Nodo B por parte del terminal móvil), los datos que estaban almacenados en el Nodo B inicial son eliminados y la RNC debe volver a transmitirlos hacia el nuevo Nodo B que controle ahora al usuario.

El mecanismo de control de flujo recogido en las especificaciones del 3GPP para el canal HS-DSCH [4] es el mismo que se propuso para los canales dedicados (*Dedicated Channels, DCH*) en la *Release '99* y se conoce como un sistema basado en créditos. Sin embargo, las especificaciones básicamente se limitan a definir los formatos de las tramas de señalización *HS-DSCH Capacity Request* y *HS-DSCH Capacity Allocation*, y de datos *HS-DSCH Data Frames* que se utilizan durante el proceso [4]. Por último, también se especifica que dicho control de flujo se debe realizar de forma independiente para cada flujo de datos con el fin de proporcionar un trato equitativo a todos los flujos.

Cumpliendo las directrices indicadas por el 3GPP, un esquema que se utiliza habitualmente consiste en observar y controlar directamente el nivel del buffer en el Nodo B para

cada flujo de datos de forma que el tiempo de encolamiento no supere un valor previamente definido [1], [5]. Precisamente esta idea intuitiva es la que se desarrolla y estudia analíticamente en este artículo. Para ello se plantea el control de flujo de HSDPA como un problema de optimización cuadrática que se resuelve mediante técnicas de programación dinámica (*Dynamic Programming*, DP) [2].

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. En la sección 2 se describirá el modelo matemático utilizado para caracterizar el sistema de control de flujo de HSDPA y se resolverá el problema de optimización derivado de dicho modelo matemático. Por último, la sección 3 recoge las conclusiones y líneas futuras de este trabajo.

II. CONTROL DE FLUJO EN HSDPA

A. Modelo del sistema

El escenario considerado para realizar nuestro estudio es una celda 3G con funcionalidad HSDPA (ver figura 2), donde varios usuarios (*User Equipments*, UEs) se conectan al Nodo B a través del canal *High Speed Downlink Shared Channel* (HS-DSCH) en sentido *downlink* y mediante un canal dedicado (DCH) en sentido *uplink*. La interfaz Iub, la cual conecta el Nodo B y la RNC, se supone de capacidad constante para el tráfico HSDPA. Asimismo, se considera que la RNC se conecta directamente a Internet a través de un enlace de capacidad constante. En una situación real, la capacidad de la Iub disponible para HSDPA es variable y depende del tráfico de los canales dedicados pero este hecho provoca picos de retardo y retardos impredecibles que dificultaría aislar la influencia de este efecto en las prestaciones de los distintos esquemas de control de flujo. El procedimiento encargado de controlar estos cambios en la capacidad de la Iub es el control de congestión (fuera del ámbito de estudio de este artículo). En futuras investigaciones incorporaremos dicho mecanismo a nuestro análisis a fin de estudiar las interacciones entre ambos controles (flujo y congestión).

Por simplicidad consideraremos sólo un flujo MAC-d por usuario, es decir, una sólo conexión de datos por usuario. Cada uno de estos flujos está asociado a una cola de prioridad del Nodo B, que guarda los datos que están a punto de ser transmitidos por la interfaz radio, y a un buffer en la RNC donde llega la información de dicho flujo desde Internet. Por tanto, la función del control de flujo consistirá en determinar la cantidad de información a transmitir para cada conexión de datos desde la RNC al Nodo B en un periodo de tiempo de longitud fija (cada conexión de datos tiene su propio proceso de control de flujo independiente del resto, tal y como describe el 3GPP en [4]). Dicho periodo es lo que comúnmente llamamos time-slot. Con el fin de obtener matemáticamente una política que determine las decisiones del control de flujo de HSDPA, cada conexión de datos entre la RNC y el Nodo B se modela como un sistema lineal en tiempo discreto. Cada time-slot se corresponde con la unidad de tiempo mínima en nuestro sistema en tiempo discreto, T_u .

Denotaremos por $q_i[n]$ la longitud en tramas RLC de la cola del Nodo B para el usuario i al inicio del time-slot n , y por $r_i[n]$ la tasa de transferencia de tramas RLC que son transmitidas por primera vez a través del canal radio para el usuario i durante el time-slot n (tasa efectiva). Sea $v_i[n]$ el

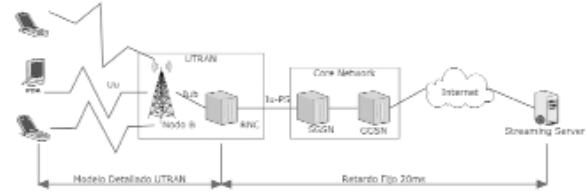


Fig. 2. Arquitectura de la red HSDPA considerada.

número de *créditos*/tramas RLC concedidas por la RNC al usuario i para el time-slot n . La evolución de la cola en el Nodo B para cada usuario i viene dada por la ecuación lineal:

$$q_i[n+1] = q_i[n] + v_i[n] - r_i[n] \cdot T_u \quad (1)$$

Dada la variabilidad de la calidad del canal radio, la tasa de transmisión efectiva $r_i[n]$ puede cambiar de manera impredecible siendo desconocido su valor al inicio del time-slot n . En nuestro modelo matemático la representaremos como:

$$r_i[n] = \bar{r}_i[n] + \xi_i[n] \quad (2)$$

dónde $\bar{r}_i[n]$ es el valor esperado de $r_i[n]$ y $\xi_i[n]$ es una variable aleatoria de media cero y varianza finita que consideraremos como un error en la estimación de $r_i[n]$.

B. Análisis Matemático

Genéricamente, la mayor parte de algoritmos diseñados para llevar a cabo el control de flujo en HSDPA regulan la transferencia de datos desde la RNC hasta el Nodo B con el objetivo de conseguir un tiempo de encolamiento predefinido T_w para los buffer del Nodo B $q_i[n]$ [1], [5]. En consecuencia, el control de flujo trata de mantener el nivel del buffer para cada flujo a un valor objetivo $Q_i[n]$:

$$Q_i[n] = r_i[n] \cdot T_w[n] \quad (3)$$

Para cada usuario i , cada time-slot el control de flujo trata de compensar la diferencia entre el nivel deseado $Q_i[n]$ y el nivel real $q_i[n]$. Hasta la fecha, los artículos que abordan este problema muestran directamente las expresiones que lo resuelven pero no explican de donde vienen dichos resultados. Sin embargo, en este artículo se formula el problema de control de flujo en HSDPA como un problema de optimización cuadrática. Así, la función objetivo a minimizar para cada usuario es:

$$E\{\sum_{n=0}^K [(q_i[n] - Q_i[n])^2 + (v_i[n] - r_i[n] * T_u)^2]\} \quad (4)$$

donde el primer término representa la penalización por desviarse del valor objetivo de la cola del Nodo B y el segundo término es una medida de la calidad con la que la tasa de transferencia de la RNC (*créditos*) sigue la tasa efectiva del canal. K es el número de etapas o time-slots sobre los que se minimiza.

Introduciendo los siguientes cambios de variable:

$$\begin{aligned} x_i[n] &:= q_i[n] - Q_i[n] \\ u_i[n] &:= v_i[n] - \bar{r}_i[n] * T_u \end{aligned} \quad (5)$$

y usando notación vectorial

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_n &= (x_1[n], \dots, x_M[n])' \\ \mathbf{u}_n &= (u_1[n], \dots, u_M[n])' \\ \mathbf{w}_n &= (\xi_1[n] \cdot T_u, \dots, \xi_M[n] \cdot T_u)'\end{aligned}\quad (6)$$

la ecuación del sistema (1) con M usuarios en la celda se puede expresar como:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{A}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{B}_n \mathbf{u}_n + \mathbf{w}_n = \mathbf{x}_n + \mathbf{u}_n + \mathbf{w}_n \quad (7)$$

donde \mathbf{x}_n es el vector de estados, \mathbf{u}_n es el vector de control y \mathbf{w}_n es el vector de perturbaciones. En nuestro caso, tanto \mathbf{A}_n como \mathbf{B}_n son matrices identidad de orden $M \times M$.

Por su parte la función de coste o función objetivo (4) se puede expresar ahora de la siguiente forma:

$$E \left\{ \mathbf{x}'_K \mathbf{Q}_K \mathbf{x}_K + \sum_{n=0}^{K-1} (\mathbf{x}'_n \mathbf{Q}_n \mathbf{x}_n + \mathbf{u}'_n \mathbf{R}_n \mathbf{u}_n) \right\} - E \left\{ \mathbf{x}_K^2 + \sum_{n=0}^{K-1} (\mathbf{x}_n^2 + \mathbf{u}_n^2) \right\} \quad (8)$$

donde las matrices \mathbf{Q}_n y \mathbf{R}_n son matrices identidad de orden $M \times M$. Las primeras representan el coste asociado a la ocupación de los buffers y las segundas el coste asociado a los vectores de control. K es el número de etapas sobre las que se desea optimizar el sistema. En nuestro caso, estamos interesados en reducir los niveles de los buffers al final de cada time-slot y, por tanto, minimizaremos sobre una sola etapa.

La minimización de la función de coste se llevará a cabo mediante programación dinámica aproximada. Básicamente lo que haremos es ir calculando etapa a etapa cuál es la combinación de controles que consigue minimizar el estado siguiente (nivel buffers), empezando en orden inverso desde la última etapa ($n+1$ en nuestro caso) hasta llegar a la etapa inicial. Así, en la etapa n , nuestro objetivo será minimizar el coste del control \mathbf{u}_n y del estado \mathbf{x}_{n+1} . El coste de la última etapa sería:

$$J_{n+1}(\mathbf{x}_{n+1}) = \mathbf{x}_{n+1}^2 \quad (9)$$

El objetivo es encontrar el vector de control \mathbf{u}_n con el que se obtenga el mínimo coste desde la etapa n hasta la $n+1$. En la etapa n , el coste vendría dado por:

$$J_n(\mathbf{x}_n) = \min_{\mathbf{u}_n} E \left\{ \mathbf{x}_n^2 + \mathbf{u}_n^2 + J_{n+1}(\mathbf{x}_{n+1}) \right\} \quad (10)$$

aplicando (9) y sustituyendo \mathbf{x}_{n+1} por su valor en (7) obtenemos:

$$J_n(\mathbf{x}_n) = 2\mathbf{x}_n^2 + E \left\{ \mathbf{w}_n^2 + 2\mathbf{x}'_n \mathbf{w}_n \right\} + \min_{\mathbf{u}_n} \left\{ 2\mathbf{x}'_n \mathbf{u}_n + 2\mathbf{u}_n^2 + E \left\{ 2\mathbf{w}'_n \mathbf{u}_n \right\} \right\} \quad (11)$$

Teniendo en cuenta que la esperanza de \mathbf{w}_n es cero (sus componentes $\xi_i[n]$ son variables aleatorias de media cero) el último término de la expresión anterior desaparece. El vector de control que minimiza $J_n(\mathbf{x}_n)$ puede obtenerse directamente derivando (11) con respecto a \mathbf{u}_n e igualando el resultado a cero, obteniendo la siguiente ley de control:

$$\mathbf{u}_n = -\frac{1}{2} \mathbf{x}_n \quad (12)$$

Deshaciendo los cambios de variable realizados en (5), obtenemos el número de créditos óptimo que debe enviar la RNC para cada flujo i :

$$v_i[n] = -\frac{1}{2} (q_i[n] - Q_i[n]) + r_i[n] \cdot T_u \quad (13)$$

Curiosamente, en [1] se propone esta misma expresión desde un planteamiento intuitivo.

III. CONCLUSIONES

En este artículo se ha abordado el problema del control de flujo de HSDPA desde una perspectiva diferente a los trabajos realizados hasta la fecha. Se ha planteado como un problema de optimización cuadrática para cuya resolución se ha hecho uso del método de programación dinámica.

En un futuro se pretende extender este análisis matemático al control de congestión del Iub con el fin de obtener un algoritmo capaz de desempeñar las dos funcionalidades: control de flujo y de congestión del Iub.

AGRADECIMIENTOS

Gaspar Pedreño agradece el apoyo del Ministerio de Educación y Ciencia a través de la beca FPU AP2006-01568.

REFERENCES

- [1] *Impact of Iub Flow Control on HSDPA System Performance*, Marc C. Necker, Andreas Weber, 2005. 2nd International Symposium on Wireless Communication Systems
- [2] *Dynamic Programming and Optimal Control, Vol. 1*, Dimitri P. Bertsekas, Prentice Hall, USA, 1987
- [3] 3GPP 25.308 "UTRA High Speed Downlink Packet Access (HSDPA); Overall description"
- [4] 3GPP 25.877 "HSDPA - Iub/Iur Protocol Aspects"
- [5] *Providing congestion control in the Iub Transport Network for HSDPA*, Szilveszter Nadas, Sandor Racz, Zoltan Nagy and Sandor Molnar, Globecom 2007.