

Encaminamiento con Calidad de Servicio para Redes Móviles Ad-Hoc

María Canales, José Ramón Gállego, Ángela Hernández-Solana, Antonio Valdovinos
Grupo de Tecnologías de las Comunicaciones
Universidad de Zaragoza
e-mail : {mcanales, jrgalleg, anhersol, toni}@unizar.es,

Abstract- Mobile ad hoc networks require a complex management to efficiently exploit the networks resources also covering the heavily demanded QoS constraints in current multimedia applications. This paper, presents a cross-layer design that tries to combine the functionality of the Routing layer with Medium Access Control information and physical layer parameters to provide the routing algorithm with the more accurate information about the environment. Thanks to this knowledge, it is feasible to estimate the current status of the links in the available paths, in order to find the more stable one that is able to guarantee the QoS requirements during the whole connection. The cross-layer design of the proposed interference-aware routing algorithm in conjunction with an effective resource allocation in the MAC layer operates as a distributed admission control which is able to improve the global performance in the network.

I. INTRODUCCIÓN

El gran desarrollo que las redes de comunicaciones móviles y los servicios proporcionados han experimentado en los últimos años ha supuesto un gran esfuerzo científico y técnico para dotar de mecanismos capaces de garantizar calidad de servicio (*QoS – Quality of Service*) a los usuarios de dichas redes. En el caso de las redes móviles ad-hoc (MANETs), no basadas en infraestructura, este esfuerzo es incluso más relevante debido a la complejidad del entorno de aplicación de las mismas, inherentemente dinámico. Para proporcionar calidad de servicio en estas redes, es muy importante resolver el compromiso entre garantizar los requerimientos necesarios y una gestión eficiente de los recursos disponibles. Con el objeto de proporcionar la calidad demandada por la gran mayoría de las aplicaciones actuales (aplicaciones multimedia y en tiempo real, con elevadas restricciones tanto de ancho de banda como de retardo), han surgido muchas propuestas de encaminamiento con calidad de servicio (*QoS Routing*) [1] – [4], que tratan de proporcionar rutas estables entre ambos extremos de la comunicación garantizando los requerimientos especificados (tasa de error, retardo, ancho de banda) durante la transmisión completa. No obstante, la complejidad de dichas redes presenta todavía una amplia problemática por resolver.

Este artículo presenta un diseño *cross-layer* basado en la comunicación o interrelación entre diferentes capas de la pila de protocolos, que trata de combinar la funcionalidad de la capa de encaminamiento con la de control de acceso al

medio (MAC) considerando además, parámetros de nivel físico, para tener información lo más exacta posible acerca del entorno, especialmente en lo referente a la interferencia que potencialmente pueden provocar otros usuarios o la que se puede causar sobre conexiones ya existentes. Gracias a dicho conocimiento, es posible estimar el estado actual de los potenciales enlaces en las posibles rutas hacia cada destino, de manera que pueda seleccionarse la ruta más estable capaz de garantizar los requerimientos de calidad de servicio durante toda la conexión. Por otra parte, una gestión eficiente de los recursos a compartir, teniendo en cuenta la propia naturaleza del medio de transmisión radioeléctrico, resulta muy importante, máxime si se considera la posibilidad de mezclar servicios de diferentes requerimientos de calidad de servicio. En ese caso, un algoritmo adecuado de control de admisión (*CAC – Call Admission Control*) debe repartir correctamente los recursos tratando de proporcionar dicha diferenciación entre aplicaciones con diferentes demandas. La dificultad de dicho reparto en las MANETs reside en la necesidad de establecer dicho procedimiento de CAC de manera distribuida, al carecer de elementos centralizados que realicen la gestión. La comunicación entre los diferentes nodos debe permitir la asignación de recursos de manera preferente a aquellos servicios más prioritarios a costa de aquellos con menores restricciones, sin por ello disminuir las prestaciones acordadas para aquellas conexiones ya admitidas en la red.

El diseño propuesto consiste en un algoritmo de encaminamiento con calidad de servicio basado en requerimientos de ancho de banda que tiene además en cuenta la interferencia real entre usuarios. La aplicación de dicho algoritmo, en conjunto con una asignación dinámica y compartida de recursos a nivel MAC, se traduce en un control de admisión distribuido que consigue mejorar las prestaciones de la red en global, así como garantizar la calidad de servicio esperada por las conexiones admitidas.

II. ENCAMINAMIENTO CON CALIDAD DE SERVICIO

A. Protocolo de encaminamiento

El diseño propuesto toma como base el protocolo de encaminamiento AODV [5]. Dicho protocolo pertenece a la familia de protocolos reactivos (*on-demand*) que basan su funcionamiento en la búsqueda de rutas cuando realmente se necesitan, en lugar de mantener una tabla de rutas para toda la red. De este modo, se reduce el overhead producido por las periódicas actualizaciones si bien se incrementa el tiempo

de acceso debido a la latencia de la fase de descubrimiento de ruta. La activación de una aplicación con calidad de servicio se considera como un flujo de datos que necesita una ruta estable durante la duración completa de la conexión. En el funcionamiento básico del AODV, la fuente inicia una búsqueda de ruta enviando, en modo broadcast, un paquete de petición (*Request Packet: RREQ*) para dicho flujo y cada nodo intermedio que lo recibe reenvía la primera copia recibida hasta que alcanza el destino, el cuál manda un paquete de confirmación (*Reply Packet RREP*) a través de la ruta inversa hacia la fuente. Dicho procedimiento se basa en una implementación distribuida del algoritmo de encaminamiento basado en distancia mínima, de manera que el camino encontrado es el de menor número de saltos. Por otro lado, si consideramos ahora la calidad de servicio, varios caminos alternativos pueden satisfacer los requerimientos sin que el primer paquete RREQ que alcanza el destino identifique necesariamente al mejor de ellos. Así pues, una búsqueda más selectiva puede permitir encontrar una solución subóptima (mayor número de saltos) pero que satisfaga en mayor medida la calidad de servicio deseada.

El algoritmo de encaminamiento con calidad de servicio propuesto, consiste en una versión modificada del protocolo AOMDV (Multipath-AODV) [6] que trabaja en conjunción con la capa MAC (*cross-layer*). Este algoritmo trata de aprovechar el funcionamiento multicamino del algoritmo para encontrar varios caminos alternativos, si bien no se trata de mantener todos ellos (base del citado funcionamiento multicamino) sino de seleccionar al final únicamente el considerado mejor en base a cierta métrica de calidad de servicio (métrica QoS). Aunque la selección de dicho camino no evita futuros cortes en la ruta, la probabilidad de dichos eventos es menor precisamente a las restricciones de calidad de servicio impuestas. El principal parámetro considerado como demanda de calidad de servicio consiste en los requerimientos de ancho de banda. De este modo, el funcionamiento de la solución propuesta, funciona como un algoritmo distribuido de control de admisión puesto que encuentra el mejor camino posible en el que se puede asignar (a nivel MAC) el ancho de banda requerido a lo largo de toda la ruta, minimizando la interferencia con las conexiones ya admitidas. Por otra parte, el reparto eficiente de recursos realizado gracias a dicho CAC distribuido permite mejorar las prestaciones, no sólo de las conexiones individuales sino de la red global.

B. Métrica de calidad de servicio

Determinar el ancho de banda disponible en una red ad-hoc no es tarea fácil y es básicamente dependiente de la capa MAC que se utilice. En el algoritmo propuesto, se ha considerado una capa MAC TDMA, que facilita la asignación de recursos entre los distintos usuarios. Existen distintas propuestas de estructuras TDMA distribuidas para redes ad-hoc. En este trabajo se ha implementado el protocolo CATA [7]. Dicha capa MAC considera eliminados los problemas del terminal expuesto y el terminal oculto [8] gracias a la señalización enviada slot a slot (SR, RTS-CTS, NTS) y permite la transmisión eficiente de datos tanto unicast como broadcast. Cada nodo puede determinar cómo "ve" los slots de la trama en su vecindario (libres, ocupados por alguien transmitiendo, con un receptor cerca...), hecho del que pretende aprovecharse el algoritmo de

encaminamiento, en su comunicación con dicha capa, para determinar la disponibilidad de slots y tomar una medida fiable del ancho de banda que puede garantizarse en determinado camino para una conexión. Para realizar dicha estimación, se ha añadido sobre el protocolo AOMDV un algoritmo de cálculo del ancho de banda basado en [3]. La idea básica de dicho algoritmo es encontrar el número de slots TDMA que pueden usarse para transmitir en cada uno de los enlaces del posible camino sin sufrir interferencia (ni causarla sobre enlaces ya establecidos). De esta manera, las futuras colisiones y roturas en los enlaces pueden reducirse. La Fig. 2 muestra un esquema de aplicación del algoritmo.

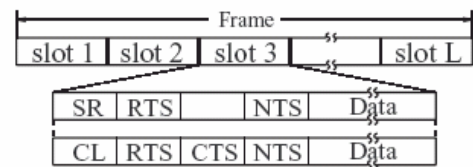


Fig. 1. Estructura de trama MAC-CATA.

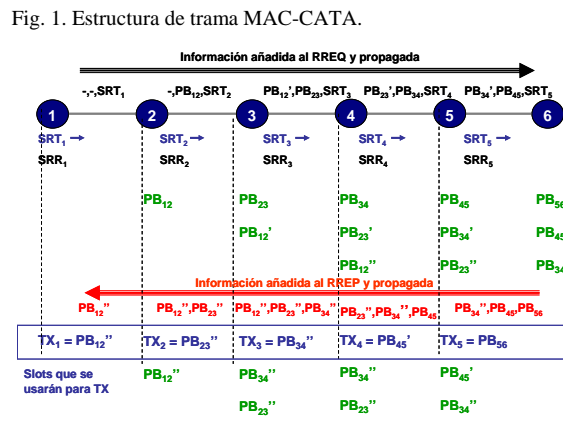


Fig. 2. Ejemplo esquemático de aplicación del algoritmo de cálculo de ancho de banda en conjunto con las fases de RREQ-RREP del encaminamiento.

Cada nodo va actualizando los slots en que puede transmitir (SRT_i , nodo i) y puede recibir (SRR_i , nodo i). Se trata de determinar los slots disponibles en cada enlace, donde PB_{ij} es el conjunto en el enlace (i,j) . Para ello, en el RREQ se propaga la información necesaria para evitar colisiones a tres saltos, y cada nodo recalcula los conjuntos evitando intersecciones (conjuntos disjuntos). En la fase de RREP, se vuelven a propagar dichos conjuntos tal como se han actualizado y se van seleccionando el número exacto demandado de cada uno de ellos.

Las medidas de ancho de banda se toman a lo largo de la fase de búsqueda de la ruta en cada uno de los nodos intermedios que recibe el paquete RREQ y se utilizan para el cálculo y actualización salto a salto de la métrica QoS basada en ancho de banda. Cuando un nodo recibe dicha petición para un flujo nuevo de datos, actualiza la métrica QoS $(1) - (2)$, añadida sobre el paquete, y evalúa si los requerimientos se satisfacen, en cuyo caso propaga el paquete. Así mismo, para posibilitar el citado cálculo, cierta información sobre los slots es añadida sobre el paquete (conjuntos de slots). Las copias repetidas de un mismo RREQ no se desechan directamente en el nodo destino para realizar la operación multicamino, de manera que se puedan

encontrar varias rutas y finalmente dicho nodo seleccione la de mejor métrica. El algoritmo de cálculo de ancho de banda finaliza en el nodo destino y el valor calculado representa, en realidad, el máximo ancho de banda disponible a lo largo del camino encontrado entre la fuente y el destino. De esta forma, la métrica se calcula en base a la relación entre el ancho de banda demandado y el realmente disponible, identificando así la calidad del potencial camino a través de dicha métrica. De este modo, el destino únicamente enviará un paquete RREP hacia la fuente por la ruta inversa a la establecida de mayor métrica. De acuerdo a la demanda real de ancho de banda, los slots en los que efectivamente se hará la asignación de recursos son seleccionados en cada nodo intermedio al recibir el paquete RREP. La Fig 3 muestra esquemáticamente el proceso.

$$BW_{metric,RREQ} = \begin{cases} 0.5 \cdot N_{av,link} / N_{RREQ} & N_{av,link} < N_{RREQ} \\ 0.5 \cdot (1 + N_{av,link} / N_{max,link}) & otherwise. \end{cases} \quad (1)$$

$$BW_{metric,PATH} = \min(BW_{metric,RREQ}) \quad (2)$$

$BW_{metric,RREQ}$ es el valor de ancho de banda medido en el enlace previo, donde $N_{av,link}$ es el número de slots disponibles en ese enlace y N_{RREQ} el número de slots necesarios para satisfacer la demanda real. $N_{max,link}$ es el número máximo de slots que estarían teóricamente idealmente disponibles, de acuerdo con el algoritmo de cálculo de ancho de banda. $BW_{metric,PATH}$ es el valor más restrictivo en el camino, y se corresponde con el valor BW_{metric} del último salto, como se muestra en [3].

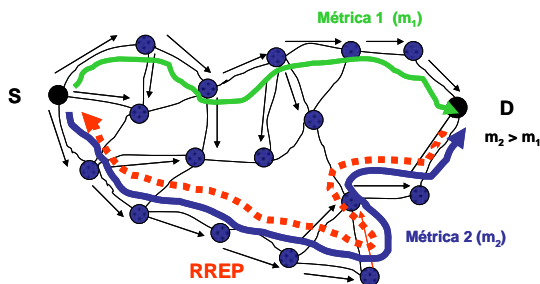


Fig. 3. Encaminamiento QoS: Sólo propagan RREP determinados nodos, espera en D y selección de la métrica mayor. RREP al único camino.

La selección de slots libres de interferencia se realiza considerando cómo la capa MAC asume dicha propiedad en base a la señalización – evitando los problemas de terminal expuesto y oculto – y teniendo en cuenta, además, la capacidad de eliminar posibles slots interferentes al propagar la información necesaria a lo largo de la búsqueda de la ruta (se considera que se necesitan conjuntos de slots disjuntos a lo largo de tres saltos antes de permitir el reuso).

C. Monitorización de la calidad de servicio

Una vez que se ha seleccionado el “mejor” camino de acuerdo a la métrica establecida, la variabilidad en las condiciones de la red (tráfico, movilidad) dificulta el mantenimiento de dicho camino sin cierto mecanismo de monitorización de la calidad de servicio y actualizaciones en las rutas establecidas. En el funcionamiento normal del algoritmo de encaminamiento AODV, los nodos reaccionan ante enlaces rotos enviando mensajes de error (RERR) para informar al vecindario acerca de dicho evento. En

consecuencia, nuevas búsquedas de rutas surgen en cuanto los nodos afectados por dichas roturas se dan cuenta de las mismas. Sin embargo, este mecanismo únicamente alerta de la existencia de enlaces rotos asumiendo que los caminos que los usan son inviables, mientras que en un escenario de calidad de servicio los enlaces pueden ser todavía viables aunque el ancho de banda haya dejado de ser suficiente para satisfacer las demandas previamente acordadas para ciertas conexiones en particular.

El algoritmo propuesto realiza un proceso de actualización usando cierta información añadida a los paquetes de datos o de reconocimiento (ACK), similar a la utilizada en el proceso de búsqueda (RREQ-RREP) que permite analizar si las prestaciones ya no pueden satisfacerse o incluso simplemente realizar una reasignación de recursos sin necesidad de indicar que se haya perdido la calidad. En caso pérdida irrecuperable, la fuente de la conexión sería informada de manera que puede activar una nueva búsqueda de ruta.

III. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Para poder evaluar las prestaciones del algoritmo de encaminamiento propuesto, se ha implementado un simulador orientado a eventos en lenguaje de programación C++, que tiene en cuenta las funcionalidades del diseño *cross-layer* propuesto, considerando la capa MAC TDMA CATA y su interacción con el AOMDV modificado, incluyendo el algoritmo de cálculo de ancho de banda integrado en el proceso de encaminamiento. Las funcionalidades del simulador permiten emular un escenario ad-hoc realista, teniendo además en cuenta la interferencia real entre los diferentes usuarios. Esto permite realizar el estudio considerando de una manera mucho más realista la peculiar naturaleza de este tipo de escenarios, donde la interferencia resulta ser un factor importante e influyente sobre las prestaciones del sistema, y mucho más complejo de gestionar. Un análisis más profundo muestra que los nodos que son incapaces de decodificar la señalización de los nodos más lejanos (no pudiendo así “reconocer” los slots ocupados por éstos) no están totalmente libres de sufrir su interferencia, puesto que la potencia acumulada puede afectar sobre las comunicaciones supuestamente libres de interferencia. De hecho, cuanto más débil es un enlace entre dos nodos (mayor distancia), más significativo puede ser el efecto de esta potencial interferencia, puesto que la transmisión posee una relación señal a interferencia (*SIR* – *Signal to Interference Ratio*) cercana al límite de decodificación. Dicho efecto se traduce en una reducción del throughput o incluso situaciones de rotura de enlaces ya establecidos pese a trabajar en condiciones estáticas que no pueden analizarse considerando un modelo de basado sólo en la distancia (donde la interferencia de los nodos fuera del rango es ignorada) como se ha realizado en trabajos anteriores [3].

Se han considerado varias topologías estáticas aleatorias de 25 nodos sobre las que se han promediado diferentes simulaciones. Las fuentes de tráfico aplicadas son de tipo Poisson (tasa media de 128 kbps que en la estructura de trama requiere cuatro slots TDMA). La trama MAC se ha dimensionado con 50 slots.

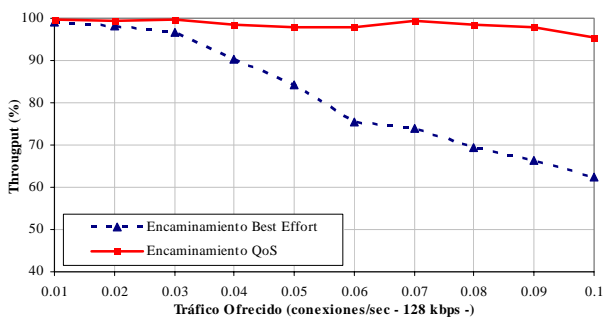


Fig. 4. Throughput (paquetes recibidos/ paquetes transmitidos) para conexiones de 128 Kbps (4 slots TDMA).

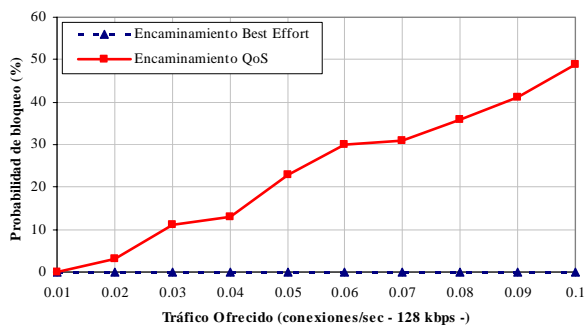


Fig. 5. Probabilidad de bloqueo de conexiones (%).

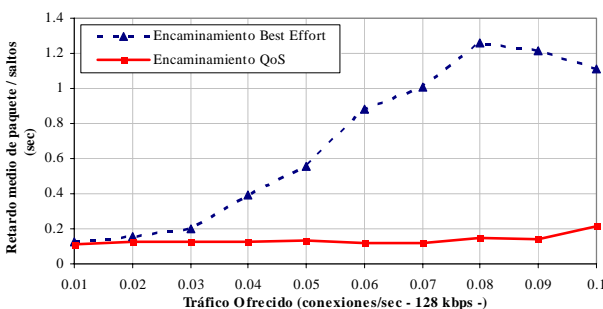


Fig. 6. Retardo medio de los paquetes, normalizado al número de saltos de la ruta.

El throughput de las conexiones con calidad de servicio admitidas tras el control de admisión mejora considerablemente respecto al caso de realizar un encaminamiento "Best-Effort" (sin evaluar ninguna métrica, ni usar multicamino), incluso para valores elevados de carga. Si bien el bloqueo crece considerablemente por el hecho de realizar dicho control de admisión, los resultados demuestran que, en determinadas circunstancias, si ciertos requerimientos deben ser cumplidos para un correcto funcionamiento de la aplicación, es preferible dicha admisión controlada que permita asignar de forma eficiente los recursos y garantizar unas elevadas prestaciones para dichas conexiones efectivamente admitidas. La Fig. 6 muestra cómo gracias al control de admisión, el retardo medio de los paquetes permanece estable pese al aumento de carga ofrecida a expensas de la cantidad total de tráfico admitido en la red, como demuestra el bloqueo representado en la Fig. 5. El throughput de las conexiones a las que efectivamente se ha asignado recursos resulta considerablemente mayor que la media cuando todas se admiten *Best-Effort* (Fig. 4), en cuyo caso, a la larga pueden transmitirse más paquetes pero a costa de tener un retardo mayor (no se evitan situaciones de congestión). El CAC por

el contrario admite únicamente conexiones si puede garantizar en ese mismo momento la existencia de recursos asignables a las mismas. Así pues, una vez una conexión entra en el sistema, transmite de una manera totalmente estable durante toda la conexión (retardo casi constante).

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto un mecanismo de encaminamiento con calidad de servicio para redes ad-hoc aplicado a conexiones con demanda de ancho de banda. El análisis se ha realizado considerando una situación realista, que tiene en cuenta la interferencia producida por todos los usuarios de la red. Los resultados muestran la capacidad del algoritmo para realizar un control de admisión distribuido que garantiza las prestaciones de las conexiones ya admitidas.

La interrelación propuesta entre las capas del encaminamiento y el control de acceso al medio hace dependiente el diseño de la selección de los protocolos concretos a utilizar, con especial importancia en lo referente a la capa MAC. Con objeto de poder realizar un análisis más exhaustivo se han planteado futuros trabajos considerando otros mecanismos de acceso, igualmente TDMA [9], con los que estudiar la influencia de los mismos y la posible generalización de algunos resultados

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia, TEC 2004-04529/TCM, y por Fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER)

REFERENCIAS

- [1] C.R. Lin and J.S. Liu, "QoS Routing in Ad Hoc Wireless Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 17, no.8, pp. 1426-1438, Nov./ Dic. 1999.
- [2] Q. Xue and A. Ganz, "Ad hoc QoS on-demand routing (AQOR) in mobile ad hoc networks", J. Parallel Distrib. Comput. Vol. 63 pp. 154-165, 2003.
- [3] Chenxi Zhu, M. Scott Corson. "QoS Routing for Mobile Ad Hoc Networks" in Proc. IEEE INFOCOM'02, New York, USA, June, 2002.
- [4] C.E. Perkins, E.M. Belding-Royer, "Quality of Service for Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing" draft-perkinsaodvqos-00.txt. Julio-2000.
- [5] Charles E. Perkins and Elizabeth M. Royer. "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing." En Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, New Orleans, LA, pp. 90-100, February 1999.
- [6] Mahesh K. Marina, Samir R. Das. "On-demand Multipath Distance Vector Routing in Ad Hoc Networks" En Proc. International Conference on Network Protocols, Mission Inn, Riverside CA. Noviembre, 2001.
- [7] Z. Tang y J.J. García-Luna-Aceves, "A Protocol for Topology-Dependent Transmisión Scheduling in Wireless Networks", En Proc. IEEE WCNC 1999, Septiembre 1999.
- [8] Z.J. Haas and Jing Deng, "Dual busy tone multiple access (DBTMA) - a multiple access control scheme for ad hoc networks", IEEE Transactions on Communications. Vol 50, issue 6, pp 975-985, 2002.
- [9] J.R. Gállego, L. Campelli, M. Cesana, A. Capone, F. Borgonovo, A. Hernández-Solana, M. Canales, A. Valdovinos, "Efficient Bandwidth Allocation for Basic Broadcast and Point-to-point Services in the AD-HOC MAC Protocol" En Proc. IFIP PWC 2005, Colmar, France, Agosto 2005.