

Encaminamiento Multicast Eficiente en Extensiones Ad Hoc a Redes IP Fijas: El Protocolo MMARP

Pedro M. Ruiz, Antonio Gómez-Skarmeta, Pedro Martínez Asensio
Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones. Universidad de Murcia
Campus de Espinardo. Facultad de Informática
30071 Espinardo (Murcia)
Teléfono: 968 36 46 76 Fax: 968 36 41 51
E-mail: {pedrom, skarmeta, pma}@dif.um.es

Abstract. Most of the typical IP multicast protocols which are used in fixed IP networks, like IGMP, assume that the terminals are in the same link. However, the multi-hop nature of ad hoc network extensions prevents standard-IP nodes from taking part in IP multicast communications through the ad hoc network. We propose a multicast architecture in combination with a new ad hoc multicast routing protocol called MMARP. MMARP nodes are challenged with special IGMP-handling capabilities allowing our solution to combine the efficiency of multicast ad hoc routing protocols with the support of standard-IP nodes without compromising the performance of the protocol. The use of the IGMP protocol as the interface between standard IP nodes, the fixed network and the ad hoc network extension allows a ready deployment of this approach in existing IP multicast networks.

1 Introducción

IP Multicast ofrece comunicaciones multipunto eficientes entre un grupo de nodos y ha emergido como una de las áreas de investigación más trabajada dentro de las redes de comunicaciones. El problema de la distribución de datagramas a un grupo dinámico de receptores ha sido investigado desde los años 80 y la mayoría del equipamiento de red existente hoy día soporta los protocolos básicos de IP multicast. La principal ventaja de IP multicast es la enorme reducción del consumo de ancho de banda que consigue. Esto es especialmente interesante para las redes móviles e inalámbricas 'beyond 3G' en las que el número de terminales se espera que sea elevado y las aplicaciones sean principalmente multimedia y tendrán a consumir bastante ancho de banda. En este marco, IP multicast puede suponer un valor añadido importante para un operador dada la reducción de costos y posibilidad de nuevos servicios que requieran este tipo de transporte.

El proyecto IST MIND (Mobile IP-based Network Developments)[1] ha investigado la idea de emplear redes de acceso ad hoc inalámbricas basadas en el protocolo IP. La arquitectura general de red se basa en un núcleo IP que interconecta las diferentes redes de acceso. De entre las diferentes redes de acceso posibles, las 'Mobile Ad hoc Networks' (MANETs) han despertado gran interés como camino hacia redes 'beyond 3G' ya que permiten ampliar el área de cobertura sin necesidad de añadir nueva infraestructura. En esta extensión ad hoc, un terminal de usuario puede emplear los de otros usuarios como routers para obtener caminos multisalto hacia el núcleo de red. Un ejemplo de esta idea de redes 'beyond 3G' se muestra en la Fig.1.

La provisión de comunicaciones multicast en este tipo de extensiones ad hoc conectadas a redes IP fijas resulta bastante más complejo que en las redes IP tradicionales. A la complejidad de los protocolos de encaminamiento multicast para MANETs habría que añadir en este caso, la interacción con los protocolos

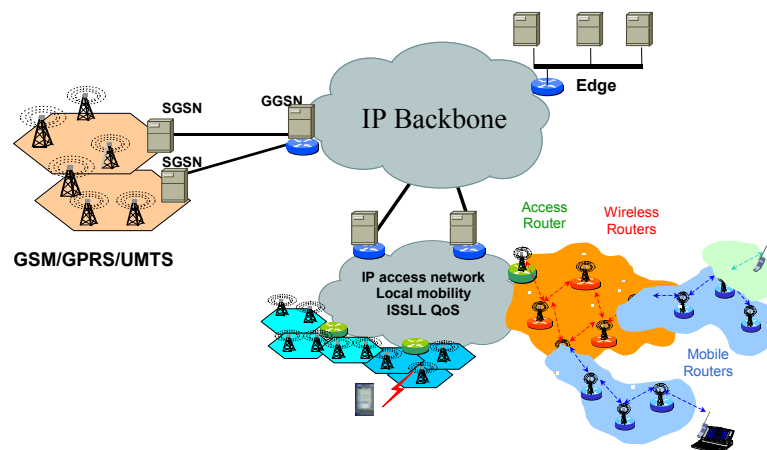


Figura. 1. Esquema de una futura red 'beyond 3G'

empleados en la red fija y el soporte de terminales IP estándar, que no están normalmente soportados por los protocolos de encaminamiento ad hoc.

Se han propuesto en la literatura muchos protocolos [1] de encaminamiento multicast para redes IP fijas. Sin embargo, estos protocolos no son capaces de ofrecer un buen rendimiento en redes ad hoc debido a que las estructuras de distribución que emplean son muy frágiles y su actualización muy lenta, como para soportar los frecuentes cambios en la topología que suceden en las redes ad hoc. Para resolver estas limitaciones han aparecido protocolos de encaminamiento multicast específicos para redes ad hoc [2]. Estos protocolos incorporan funcionalidades específicas para resolver los problemas que plantean las redes ad hoc, pero hasta el momento éstos protocolos sólo han sido pensados para funcionar en redes ad hoc puras sin interconexión a redes IP fijas y, por lo tanto, no son capaces de interoperar con redes IP ni de soportar nodos IP multicast estándar.

Hoy día ya se pueden encontrar algunos trabajos como [5], que consideran la interconexión de redes ad hoc a redes IP. Por el momento las soluciones presentadas en este sentido sólo se centran en la provisión de comunicaciones unicast y no ofrecen una interacción con la red fija para enviar tráfico multicast. Aún así, tampoco permiten que la extensión ad hoc se convierta en una red de acceso para terminales que no se encuentren en la zona de cobertura de los routers de acceso.

En este artículo presentamos el Multicast MANet Routing Protocol (MMARP), un nuevo protocolo de encaminamiento multicast para redes ad hoc que es capaz de ofrecer encaminamiento eficiente en la red ad hoc a la vez que ofrecer, sin una penalización significativa en el rendimiento, una interacción adecuada con la red fija y con nodos IP estándar que pudiesen emplear la extensión ad hoc como una red de tránsito hacia la red fija. Para ello los nodos MMARP se extienden con la posibilidad de interceptar y procesar los mensajes IGMP[6], a la vez que posibilitan que los nodos IP multicast estándar que se encuentren en la red ad hoc participen en sesiones multicast exactamente como lo harían si estuviesen conectados a la red fija.

El resto del artículo se organiza como sigue: la sección 2 analiza los problemas y requerimientos así como la arquitectura multicast propuesta para extensiones ad hoc a redes IP fijas. La descripción del protocolo MMARP se encuentra en la sección 3. La sección 4 presenta unos resultados empíricos del empleo de MMARP en una maqueta real. Finalmente, la sección 5 recoge algunas conclusiones y describe líneas de actuación futuras.

2 Extensiones Ad hoc a Redes Fijas

Las extensiones ad hoc a redes IP fijas se han propuesto en el marco del proyecto IST-MIND para

facilitar las comunicaciones entre nodos en la red de IP fija y nodos IP que pudiesen estar fuera del radio de cobertura de las estaciones base. La creación de este tipo de extensiones ad hoc formadas espontáneamente es muy económica para el operador debido al ahorro en infraestructura. Por supuesto, el ancho de banda en este tipo de redes es más limitado y variable que en un enlace inalámbrico tradicional, pero el área de cobertura es bastante más elevada. En estos escenarios es precisamente donde IP multicast puede ayudar en gran medida a reducir el consumo de ancho de banda sobre todo para las aplicaciones multimedia de tiempo real.

2.1 Requisitos

Los nodos ad hoc normalmente disponen de un pila de protocolos diferente a un router o terminal IP. De hecho, algunos protocolos de encaminamiento ad hoc no usan direcciones IP. Para marcar la diferencia entre este tipo de nodos, emplearemos el término 'nodo IP estándar' para denotar a un terminal o router IP empleando protocolos estándar, mientras que denominaremos 'nodos ad hoc' a los terminales ad hoc, cuya pila de protocolos es específica para redes ad hoc.

La interacción de las extensiones ad hoc con la red de acceso y con los terminales IP estándar plantea una serie de requisitos que no satisfacen actualmente ni los protocolos de encaminamiento multicast empleados en las redes fijas, ni los protocolos de encaminamiento multicast que se han propuesto hasta la fecha para redes ad hoc.

Nuestro objetivo para este tipo de extensiones ad hoc es ser capaces de llegar a un compromiso en el que al menos se satisfagan los siguientes requisitos:

- Interoperabilidad con el modelo IP multicast empleado en las redes fijas.
- Eficiencia, escalabilidad y baja sobrecarga de control.
- Tolerancia a fallos y robustez. Por ejemplo, que se pueda disponer de diferentes puntos de acceso a la red fija dentro de una misma extensión ad hoc.
- Compatibilidad con los protocolos de encaminamiento multicast entre dominios.

2.2 Problemas a superar

Para los terminales el proceso de participación en sesiones multicast es muy sencillo. Para enviar datagramas multicast es suficiente con enviar datagramas usando como dirección IP destino una dirección de grupo (Ej. en el caso de IPv6 en el rango 224.000 a 239.255.255.255). Para recibir tráfico multicast los terminales han de emplear el Internet Group Management Protocol (IGMP[6]) para solicitar a su router multicast, situando en su misma subred IP, su interés en unirse a ese grupo. Estos mecanismos no son soportados por los protocolos de

encaminamiento multicast propuestos hasta el momento. Como veremos, aparecen una serie de problemas que dificultan el empleo de este modelo.

1) Problemas con el Time To Live

El protocolo IGMP se basa en el empleo de datagramas IP multicast que se transmiten con un Time to Live (TTL) igual a uno porque los routers multicast se supone que están a un único salto de los terminales. Dada la naturaleza ‘multihop’ de las redes ad hoc, éstos datagramas IGMP no podrían transitar la extensión ad hoc para llegar al router de acceso situado en la red fija..

2) Naturaleza ‘multihop’ de las redes ad hoc

Los paquetes enviados por los emisores que se encuentren a más de un salto de la red fija no serán recibidos automáticamente por el router de acceso. Sin embargo, los nodos intermedios tendrían que garantizar esto, ya que es un requerimiento para los protocolos de encaminamiento de la red fija. Por ejemplo, en el caso de Protocol Independent Multicast Sparse Mode (PIM-SM [7]), ésta es la única forma de que el router de acceso registre a esas fuentes en el Rendezvous Point (RP).

Permitir que los terminales IP estándar puedan usar la red ad hoc como una red de acceso hacia la red fija, requiere que los nodos ad hoc sean capaces de procesar los mensajes IGMP, ya que ésta es la forma en la que los nodos IP estándar se unen a los grupos multicast. Sin embargo, los protocolos de encaminamiento para redes ad hoc propuestos hasta la fecha asumen que todos los nodos son ad hoc y no contemplan la existencia de terminales IP tradicionales.

3) Direccionamiento plano de las redes ad hoc

Otro problema adicional es la diferencia en el modelo de direccionamiento entre las redes ad hoc y las redes fijas. Mientras que en Internet es necesario emplear un direccionamiento jerárquico en el que las direcciones IP tienen un significado topológico, en las redes ad hoc se usa un direccionamiento totalmente plano. El principal problema es que los routers multicast aplican a cada paquete entrante el llamado ‘RPF-Check’. Este proceso descarta todo paquete que llegue por un interfaz diferente al que el router usaría para llegar a la fuente de dicho paquete.

2.3 Arquitectura Propuesta

Durante el proyecto MIND evaluamos diferentes alternativas para conseguir un soporte eficiente de comunicaciones multicast entre nodos de la extensión

ad hoc y los nodos en la red fija. Básicamente se pueden agrupar en dos enfoques: emplear túneles entre los nodos IP estándar y el router de acceso o emplear un protocolo específico de encaminamiento multicast en la extensión ad hoc. Este segundo enfoque es el seleccionado ya que, como demostramos en [7], resulta más eficiente en términos de escalabilidad, simplicidad y rendimiento.

Como se aprecia en la Fig. 2, la clave para obtener estas ventajas es la idea de confinar en los nodos de la extensión ad hoc toda la nueva funcionalidad necesaria para interactuar con los nodos IP estándar y la red fija, empleando protocolos estándar para dichas interacciones. De este modo se consigue una independencia total del protocolo de encaminamiento que se emplee en la red fija y permite la participación de los nodos IP estándar sin necesidad de incorporar ningún cambio o modificación a su comportamiento normal.

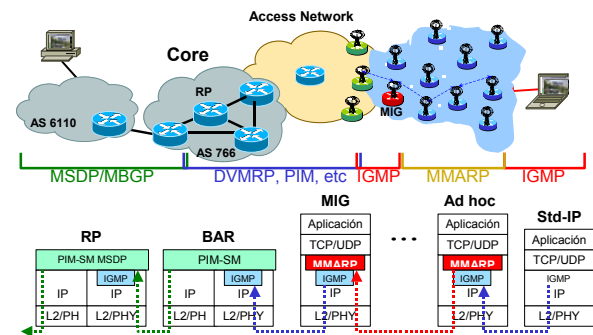


Figura 2. Arquitectura multicast para extensiones ad hoc

Los protocolos usados en las redes IP fijas como ARP, IGMP, etc, resultan costosos de emplear en una red ad hoc porque suponen una sobrecarga adicional. Para poder soportarlos de un modo eficiente, el propio protocolo MMARP incluirá los mecanismos necesarios para reducir la sobrecarga al mínimo. La descripción detallada de estos mecanismos se encuentra en la siguiente sección.

La Fig. 3. muestra las interacciones necesarias para recibir un flujo multicast según el enfoque propuesto. Como se aprecia, el nodo IP estándar aparece marcado como ‘MN’, los nodos ad hoc como ‘MMR’ mientras que el ‘BAR’ sería el router de acceso a la red fija, y el router identificado como ‘RP’ representa al RP para este grupo multicast, supuesto que estamos empleando PIM-SM. La clave de este planteamiento, es que el protocolo MMARP es capaz de interceptar los mensajes IGMP de todos los nodos de la extensión ad hoc, y hacer llegar al router de acceso los IGMP Reports correspondientes, ofreciendo caminos eficientes dentro de la red ad hoc y sin penalizar en términos de sobrecarga de control.

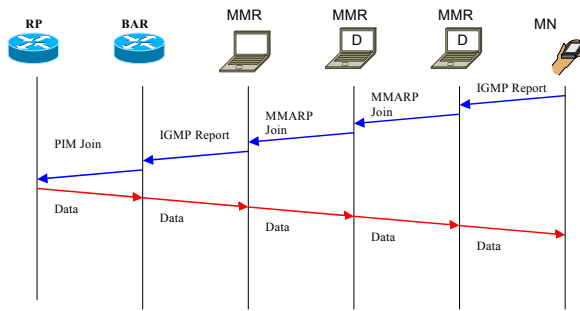


Figura. 3. Interacción para recibir un flujo multicast

3 El Protocolo MMARP

El protocolo MMARP está especialmente diseñado para redes ad hoc móviles (MANETs). Es totalmente compatible con el modelo estándar de IP Multicast [8] y permite que los nodos IP estándar participen en sesiones multicast sin necesidad de ningún cambio a su operación habitual. MMARP es el encargado de procesar y generar los mensajes IGMP necesarios para interoperar tanto con los nodos IP estándar como con los routers de acceso.

La interacción con los routers de acceso se realiza mediante los denominados Multicast Internet Gateways (MIGs). Denominaremos 'MIG' a cada uno de los nodos MMARP que se encuentran situados a un único salto de la red IP fija. Es decir, a un único salto de los routers de acceso. Cualquier nodo MMARP puede convertirse en MIG en cualquier momento. La única diferencia entre un MIG y un nodo MMARP normal es que los MIGs son los responsables de notificar a los routers de acceso los grupos multicast para los que hay receptores interesados dentro de la red ad hoc.

Tal cual funciona IP multicast, al router de acceso no le preocupa qué nodos concretos están interesados en unirse un grupo multicast determinado. Lo que el router necesita saber es si hay algún nodo interesado en unirse o no. Es precisamente esta anonimidad del servicio IP multicast la que explota MMARP con el concepto de MIG. El MIG a todos los efectos es como un host para el router de acceso, pero en este caso representará los intereses de todos los nodos (tanto ad hoc como IP estándar) que hay en la extensión ad hoc. Se puede decir que el MIG actúa como un host virtual formado por múltiples terminales que emplearán MMARP como protocolo para distribuir eficientemente el tráfico multicast dentro de la extensión ad hoc. De este modo, el protocolo MMARP consigue funcionar con cualquier protocolo de encaminamiento en la red fija, a la vez que lo independiza del protocolo de encaminamiento entre dominios que se emplee.

MMARP usa un modelo híbrido para construir una malla de distribución. Las rutas entre nodos ad hoc se establecen reactivamente (es decir, bajo demanda). Por el contrario, las rutas hacia fuentes o receptores en la red fija se establecen proactivamente mediante

un anuncio periódico por parte de los MIGs hacia la red ad hoc.

3.1 Funcionamiento General

MMARP usa una estructura de distribución con topología de malla similar a la empleada por ODMRP. Este tipo de estructura de distribución ofrece una buena protección frente a la rotura de los enlaces causada por la movilidad de los nodos (ver Fig. 4). Tanto la parte reactiva como la parte proactiva del protocolo participan en la creación de dicha malla de distribución.

La parte reactiva consta de una fase de solicitud y otra de respuesta. Cuando un nodo ad hoc tiene nuevos datos que enviar, periódicamente envía mediante un broadcast con TTL de un único salto un mensaje MMARP_SOURCE que se propaga por toda la red ad hoc, para actualizar el estado de los nodos en el camino hacia los receptores así como las rutas multicast. Estos mensajes incluyen en su cabecera un identificador único que permite a los nodos intermedios detectar duplicados y evitar que un mismo nodo distribuya varias veces un mensaje MMARP_SOURCE que pudiera llegarle por diferentes caminos. Cuando un mensaje MMARP_SOURCE llega por primera vez a un nodo, éste almacena la dirección

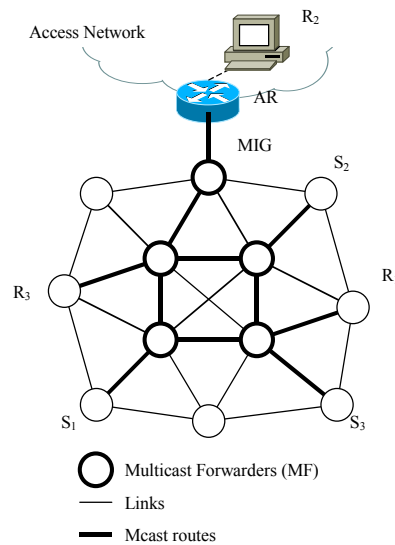


Figura 4. Malla de distribución entre fuentes (S) y destinos (R).

IP del vecino que se lo envió y lo vuelve a reenviar a sus vecinos con un broadcast limitado a un salto. Cuando el mensaje llegue a un receptor o a un nodo ad hoc que se encuentre a un único salto de un nodo IP estándar que se ha unido a ese grupo multicast, el nodo envía de nuevo con un broadcast limitado a un salto un mensaje MMARP_JOIN que incluye la dirección IP del vecino del cual se recibió el MMARP_SOURCE, que será el nodo elegido para formar parte del camino hacia la fuente. Al detectar su dirección IP en un mensaje MMARP_JOIN, un nodo se da cuenta de que está en el camino entre una fuente y un destino. En ese momento activa su Multicast Forwarder Flag (MF_FLAG) para el grupo

multicast correspondiente y envía un mensaje MMARP_JOIN incluyendo la dirección IP del siguiente salto elegido hacia la fuente. Con la repetición sucesiva de este proceso, se consigue crear el camino más corto entre la fuente y el receptor. Los nodos con su MF_FLAG activo para un grupo multicast simplemente reenviarán los datagramas multicast que les lleguen dirigidos a dicho grupo. Al haber múltiples fuentes y receptores, este proceso genera una malla de distribución multicast como la mostrada en la Fig. 4.

La parte proactiva del protocolo consiste en el anuncio periódico del MIG como router por defecto hacia la red fija. Como el TTL de los mensajes IGMP está prefijado en un único salto, la recepción de un mensaje IGMP Query puede emplearse como mecanismo para que los MIGs se den cuenta de que lo son y activen su MIG_FLAG. Los MIGs periódicamente enviarán por broadcast mensajes MMARP_DFL_ROUTE que serán retransmitidos de modo similar a los MMARP_SOURCE y servirán para crear caminos multicast entre los receptores en la extensión ad hoc y los emisores que estén en la red fija. Cuando el mensaje MMARP_DFL_ROUTE llega a un receptor o a un vecino de un receptor IP estándar, dicho nodo comenzará el proceso de unión hacia la fuente enviando un mensaje MMARP_JOIN incluyendo en la cabecera el siguiente salto en el camino inverso al de la propagación del MMARP_DFL_ROUTE. Al igual que en la parte proactiva, el mensaje MMARP_JOIN se va propagando hasta llegar al MIG. Cuando el MIG recibe el mensaje MMARP_JOIN construye un IGMP Report que es enviado al router de acceso para informarle del interés de al menos un nodo por unirse a ese grupo multicast en la red fija.

En el caso particular de que un nodo IP estándar pase a enviar datagramas multicast, el proceso de creación de la malla de distribución es similar sólo que en este caso, como las fuentes IP estándar no han de notificar nada, serán los sus vecinos MMARP más cercanos los que, al recibir los datagramas multicast, construirán el mensaje MMARP_SOURCE para informar de la existencia de esta nueva fuente en la extensión ad hoc.

El protocolo MMARP incorpora mecanismos para la reparación local de enlaces que permiten solventar las roturas de enlaces que pudieran darse durante la fase de creación de la malla de distribución. Cuando tras cuatro intentos un nodo comprueba que le es imposible entregar un mensaje MMARP_JOIN a su vecino en el camino más corto hacia la fuente, éste envía con un broadcast limitado a un salto un mensaje MMARP_NACK indicando a todos sus vecinos su incapacidad para construir el camino. Sus vecinos, al recibir este mensaje activarán su MF_FLAG y usarán sus propias rutas para proseguir la construcción del camino hacia la fuente. Si alguno de estos nodos no conociese una ruta hasta la fuente, repetiría el proceso enviando de nuevo un MMARP_NACK a sus vecinos. Este mecanismo

garantiza que se encontrará un camino hacia la fuente. Si bien este nuevo camino posterior a la rotura del anterior no es óptimo, sí que ofrece una recuperación rápida hasta la siguiente actualización de la topología.

Una vez creada la malla de distribución, la distribución del tráfico multicast es muy simple: los paquetes de datos dirigidos a un grupo multicast serán sólo propagados por aquellos nodos MMARP que tengan su MF_FLAG activo para ese grupo. Cuando tales paquetes de datos llegan a un nodo cuyo MF_FLAG para ese grupo aún no ha expirado, éste chequea que no se ha enviado ya antes (para evitar duplicados) y lo reenvía. En cualquier otro caso, el paquete es descartado.

3.2 Soporte eficiente de nodos IP estándar

Los protocolos que usan los nodos IP estándar para realizar sus funciones básicas tales como ARP o IGMP fueron pensados para funcionar en redes de medio compartido BMA (Broadcast Medium Access). Sin embargo, el funcionamiento de las redes ad hoc a nivel de enlace es algo diferente. Mientras que en las redes BMA se garantiza que todos los nodos que son capaces de recibir una trama de otros nodos son capaces también de comunicarse entre sí, esto no se puede garantizar en las redes ad hoc, en las que dos nodos pueden recibir datos de un tercero sin estar éstos últimos alcanzables entre sí.

Para los protocolos de encaminamiento ad hoc usuales, al no soportar terminales IP estándar, esto no es un problema. Cada nodo envía sus propios mensajes de control. Sin embargo, la compatibilidad con el modelo IP multicast estándar obliga a que los nodos MMARP además de sus propios mensajes de control (Ej. MMARP_SOURCE o) tengan que enviar los referentes a sus vecinos IP estándar. Por ejemplo, al recibir un mensaje IGMP Report, un nodo MMARP enviaría un MMARP_JOIN para ese grupo multicast en representación de su vecino. Uno de los problemas que puede aparecer es el hecho de que varios nodos MMARP reciban un mismo IGMP Report y creen diferentes caminos hacia una misma fuente.

El protocolo MMARP ha sido diseñado para evitar la generación innecesaria de caminos. Para ello, los mensajes MMARP incluyen un campo llamado "Generator IP Address" que indica el nodo IP estándar que provocó la generación de un determinado mensaje de control. De este modo, diferentes mensajes MMARP_SOURCE y MMARP_JOIN generados por un mismo mensaje IP estándar, se pueden detectar como duplicados, evitando así la generación innecesaria de caminos.

MMARP tiene unas particularidades que lo diferencian del resto de protocolos de encaminamiento multicast para redes ad hoc que lo hacen no directamente comparable en términos de rendimiento: el soporte de terminales estándar y la

interacción con la red fija. En [10] demostramos analíticamente que MMARP es capaz de ofrecer todas estas nuevas funcionalidades sin apenas sacrificar el rendimiento del protocolo. Para llegar a esta conclusión comparamos el protocolo MMARP con el protocolo ODMRP [4] que es famoso por ser uno de los más eficientes para routing multicast en redes ad hoc hasta la fecha. En la siguiente sección analizaremos empíricamente el rendimiento de ambos protocolos.

4 Resultados Empíricos

Para el análisis experimental hemos preparado una maqueta consistente en 6 ordenadores portátiles con tarjetas IEEE 802.11b; cuatro de ellos actuarán como nodos MMARP y el resto como nodos IP estándar que establecerán una sesión IP multicast entre ellos. Las evaluaciones de rendimiento se han realizado con tres topologías diferentes: red ad hoc estática, movimiento de los nodos finales, y movimiento de los nodos MMARP.

En este artículo presentamos los resultados correspondientes al escenario más representativo, en el que un receptor multicast se va a ir desplazando por toda la extensión ad hoc. Los resultados se comparan con los obtenidos en [11] para el protocolo ODMRP en un escenario similar. Dado que la implementación de ODMRP no está disponible, haremos una configuración similar a la que el autor empleó para las pruebas de ODMRP para poder contrastar los resultados al menos de un modo cualitativo.

La información sobre la sobrecarga del protocolo MMARP se va a extraer directamente de los ficheros de registro generados por nuestra implementación de MMARP sobre Linux. Para la información de jitter, paquetes perdidos y demás, emplearemos una herramienta multimedia llamada ISABEL-lite que es una versión reducida para dispositivos ligeros de la herramienta ISABEL [12]. Los datos se extraerán de los logs de la sesión RTP que establece la aplicación.

4.1 Escenario con receptor móvil

La prueba consiste en una red ad hoc con la topología mostrada en la Fig. 5, en la que el receptor (R) se moverá según el patrón de movimiento marcado en la figura. La fuente (S) generará un flujo consistente en un video en formato MJPEG a 6 frames por segundo usando tamaño QCIF y un flujo de audio en formato GSM muestreado a 16 KHz con muestras de 8 bits. Los dos flujos se enviarán al mismo grupo multicast pero a diferentes puertos para el audio y el vídeo.

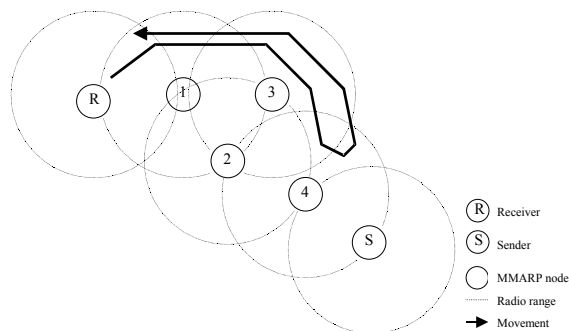


Figura 5. Topology changes in the end-node mobility scenario

Estos flujos generan aproximadamente un flujo continuo de unos 115 Kb/s. El receptor se unirá al grupo multicast al comenzar la prueba, para recibir estos datagramas.

Los datos inicialmente fluirán por el camino <S-4-2-1-R> que es el camino más corto entre la fuente y el destino. Esta situación se mantendrá hasta los 9 segundos de comenzar la prueba, momento en el cual el receptor se encuentra en el rango de cobertura tanto del nodo 1 como del nodo 3. El camino cambia pues a <S-4-2-3-R>. En algún momento entre los 9 y los 12 segundos, el enlace entre el receptor y el nodo 1 se rompe. Desde los 21 segundos hasta los 24 el nodo receptor estará en el radio enlace tanto del nodo 3 como del nodo 4. A los 24 segundos desde el inicio, el enlace entre el receptor y el nodo 3 se rompe y el camino cambia por tanto a <S-4-R>. A los 33 segundos del comienzo, el enlace entre R y el nodo 3 vuelve a estar disponible. Sin embargo, el camino más corto sigue siendo <S-4-R> por lo que este camino no cambiará hasta el segundo 36 en el que el enlace entre el receptor y el nodo 4 se rompe. A los 45 segundos desde el comienzo de la prueba el enlace R - 1 vuelve a estar disponible, y en el segundo 48, cuando se rompe el enlace R - 3, el mejor camino vuelve a ser <S-4-2-1-R>. Desde este instante hasta el final de la prueba este camino sigue siendo el óptimo.

Los resultados de las pruebas mostrados en la Fig. 6 soportan las mismas conclusiones que se extraen de las pruebas de ODMRP en [11]. Las pérdidas son una constante en las redes ad hoc, así como la variación en la capacidad de la red. Esto se aprecia especialmente en los puntos concretos de cambios de camino. También veremos como los resultados muestran la capacidad de MMARP para reestablecer los caminos rápidamente incluso con la movilidad de los nodos.

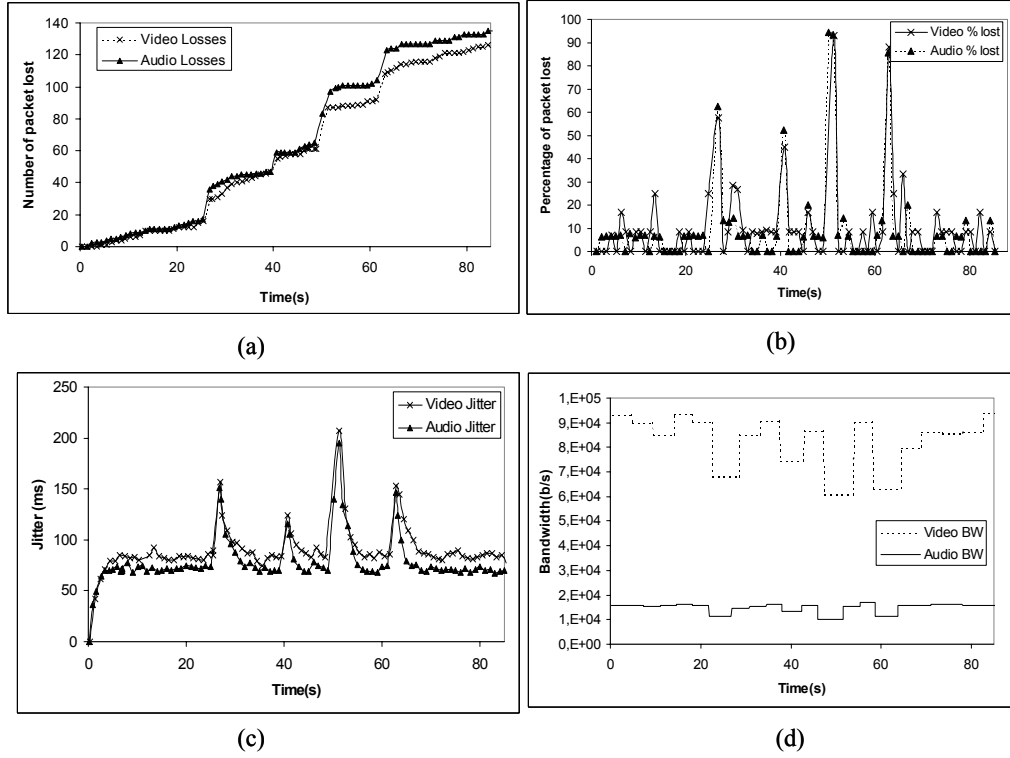


Figura. 6. Pérdidas totales (a), porcentaje de pérdidas (b), jitter (c) y ancho de banda (d)

La Fig. 6(a) muestra la pérdida de paquetes que se ha experimentado. Estas pérdidas corresponden aproximadamente a 1,5 paquetes por segundo tanto para el audio como para el vídeo. Los intervalos con altas pérdidas de paquetes corresponden a los cambios del camino más corto. Se aprecia como MMARP hace que estos periodos de altas pérdidas sean muy reducidos en el tiempo y en general el tiempo hasta crear un nuevo camino es menor a un segundo desde que se rompe el camino anterior. Esto queda claramente demostrado en los picos asociados a los porcentajes de pérdidas de la Fig. 6(b). Como se aprecia las pérdidas en esos instantes concretos son muy altas porque el nuevo nodo que pasa a formar parte del camino óptimo no tiene activo su MF:FLAG, y se ha de esperar al siguiente periodo de refresco hasta obtener un nuevo camino. Este es claramente el peor caso, y en una red de acceso con muchos más grupos activos y muchos más emisores y receptores la probabilidad de que se dé este peor caso es mucho más reducida y podrían llegar a no aparecer pérdidas en los handovers. En lo referente al jitter mostrado en la Fig. 6(c) se aprecia como en los periodos con baja tasa de pérdidas presenta cierta variabilidad propia de las redes ad hoc y la aleatoriedad en el acceso al medio compartido de 802.11b. Como era de esperar, en los periodos en los que se cambia de camino, el interarrival jitter aumenta debido a la pérdida de paquetes intermedios. Lo mismo se aprecia en la Fig. 6(d) en la que el ancho de banda se reduce justo cuando los caminos quedan invalidados por la rotura de los enlaces y hay que buscar nuevos caminos. Es destacable el hecho de que el porcentaje medio de pérdidas se reduce respecto a los resultados en [11] para un testbed real

de MMARP. Mientras que en nuestro testbed conseguimos un 9% de pérdidas como media tanto para el audio como para el vídeo, las pruebas con ODMRP mostraron un 29% de pérdidas.

Hemos calculado la sobrecarga del protocolo comparando el consumo de ancho de banda debido a los mensajes de control de MMARP frente al consumo de ancho de banda debido a los mensajes de datos. Se ha definido la sobrecarga como:

$$\Omega = \frac{\sum_{j=1}^{N_{PC}} length(PC_j) * 100}{\sum_{i=1}^{N_{PD}} length(PD_i) + \sum_{j=1}^{N_{PC}} length(PC_j)} \quad (1)$$

Donde N_{PC} y N_{PD} son el número de mensajes de control y de datos respectivamente que se han cursado, $length(PC_j)$ representa el tamaño del paquete de control j y $length(PD_i)$ representa el tamaño del paquete de datos i . Los resultados comparados extraídos de los logs de MMARP se han comparado con los disponibles para ODMRP y se muestran en la Tabla I.

Como se puede apreciar la implementación de MMARP tiene muy poca sobrecarga más que ODMRP y el rendimiento, en términos de tasa de datos conseguida, es similar. Esto no hace más que confirmar los resultados del modelo matemático de la sobrecarga de estos protocolos que elaboramos en [10]. Es importante destacar que estas diferencias en sobrecarga no son significativas, especialmente si tenemos en cuenta que MMARP aporta nueva funcionalidad en lo referente a soportar nodos IP

estándar e interacción con la red fija, que suponen una mayor sobrecarga.

TABLA I
SOBRECARGA DE MMARP Y ODMRP EN EL ESCENARIO PROPUESTO

	MMARP		ODMRP	
	Valor	% of BW	Valor	% of BW
Duración	85 s	N/A	66,76 s	N/A
Control	3,86 Kb/s	1,06	1,53 Kb/s	0,49
Datos	360,02 Kb/s	98,94	307,72 Kb/s	99,5

5 Conclusiones

Hemos presentado una nueva arquitectura multicast capaz de conseguir comunicaciones multicast eficientes en extensiones ad hoc a redes IP fijas. Además, se ha presentado la combinación de esta arquitectura con nuestra propuesta del protocolo MMARP, que por lo que sabemos es el primero en la literatura capaz de ofrecer comunicaciones multicast en extensiones ad hoc a redes IP fijas a la vez que se soporta el modelo IP multicast, terminales estándar e interacción con la red fija. Hemos ofrecido un análisis de la problemática de cumplir estos nuevos requisitos en un escenario de extensiones ad hoc y hemos demostrado que con un diseño apropiado un protocolo como MMARP es capaz de conseguir cumplir estos requisitos prácticamente sin penalizar el rendimiento (comparado a ODMRP [4]) a consta de algo de complejidad adicional en el protocolo.

Los resultados empíricos han demostrado que estas conclusiones, así como la idoneidad del protocolo para este tipo de entornos que formarán parte de las futuras redes inalámbricas de cuarta generación..

Como trabajo futuro, se están estudiando extensiones para soporte de tráfico unicast, así como el análisis de los mismos problemas usando como protocolo de red IPv6.

Referencias

- [1] IST Project MIND (www.ist-mind.org)
- [2] M. Ramalho, "Intra- and Interdomain Multicast Routing Protocols: A Survey and Taxonomy," *IEEE Commun. Surveys and Tutorials*, vol. 3, no. 1, Jan.-Mar. 2000, pp. 2-25.
- [3] E.M. Royer and C.-K. Toh, "A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no 2, April 1999, pp. 46-55.
- [4] Y. Yi, S.-J. Lee, "On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP) for Ad Hoc networks." Internet-Draft, draft-ietf-manet-odmrp-04.txt. Work in progress, November 2002.
- [5] H. Lei and C.E. Perkins. Ad Hoc Networking with Mobile IP. In *Proceedings of the Second European Personal Mobile Communications Conference*, October 1997, pp. 197-202.
- [6] W. Fenner: "Internet Group Management Protocol, Version 2". *RFC 2236*, November 1997.
- [7] D. Estrin, D. Farinacci, A. Helmy, D. Thaler, S. Deering, M. Handley, V. Jacobson, C. Liu, P., Sharma and L. Wei.: "Protocol Independent Multicast Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification". *RFC 2362*, June 1998.
- [8] S. Deering, "Host Extensions for IP Multicasting", Request For Comments (RFC) 1112. Internet Engineering Task Force (IETF), 1989
- [9] Pedro M. Ruiz, Graeme Brown, Ian Groves, "Scalable communications for ad hoc extensions connected to Mobile IP networks". In *proceedings of the Personal Indoor Mobile Radio Communications (PIMRC) Symposium*. Lisbon, September 2002.
- [10] Pedro M. Ruiz, David Larrabeiti and Antonio F. Gómez-Skarmeta. "Analytical Model for the Overhead Evaluation of Multicast Ad hoc Routing Protocols". Technical Report, University of Murcia. TR-DIIC 1/2002.
- [11] S. J. Lee. "Routing and Multicasting Strategies in Wireless Mobile Ad hoc Networks". Ph. D. Dissertation. University of California. L.A. 2000.
- [12] ISABEL CSCW Application. <http://www.agora-2000.com>.