

Mecanismos de Selección de Vecinos para Comunicaciones Multi-hop en Redes Mesh Inalámbricas

Baldomero Coll y Javier Gozávez

bcoll@umh.es, j.gozalvez@umh.es

Uwicore, *Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory* <http://www.uwicore.umh.es>

Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad, s/n, 03202 Elche, España.

Abstract- Multi-hop Cellular Networks rely on the establishment of wireless multi-hop paths to route the information from source to destination. Such wireless multi-hop routing can be conducted through the 802.11s standard. Such standard describes the management peer link mechanism between neighbor nodes, but it does not define the mechanism to identify candidate peer neighbors. In this context, this paper proposes a set of neighbor selection techniques that exploit spatial diversity to increase the mesh wireless multi-hop performance.

I. INTRODUCCIÓN

La futura generación de redes celulares (4G) deberá proveer a los usuarios de telefonía móvil de altas tasas de transmisión de forma espacialmente homogénea para soportar las cada vez más exigentes demandas de tráfico. Las actuales redes celulares, debido a que la comunicación se realiza a través de un enlace directo entre el usuario y la estación base (BS, *Base Station*), ven seriamente afectada la tasa de transmisión a medida que el usuario se aleja de la BS por la atenuación que sufre la señal con la distancia. La incorporación de la tecnología ad-hoc a las redes celulares, la cual permite una comunicación a través de múltiples saltos intermedios entre las estaciones fuente y destino, está siendo adoptada como posible tecnología para afrontar los retos de las exigentes demandas de tráfico de las redes 4G. La fusión de la tecnología celular junto con la tecnología ad-hoc da lugar a lo que se conoce como redes celulares de múltiples saltos, o en su acrónimo inglés MCNs (*Multi-hop Cellular Networks*) [1]. En el contexto de las redes MCN, el estándar 802.11s [2] es un claro candidato tecnológico para las comunicaciones inalámbricas multi-hop. El estándar 802.11s permitirá la formación de redes malladas, o redes mesh, en redes inalámbricas mediante protocolos que posibiliten la auto-formación de caminos entre nodos mesh (MP, *Mesh Point*) y el punto de acceso (AP, *Access Point*) a través de topologías multi-hop auto-configurables en sistemas distribuidos inalámbricos.

Un aspecto clave para el funcionamiento de una red multi-hop mallada es la identificación de los MPs vecinos que servirán para enrutar la información del nodo origen al destino. El estándar 802.11s no define los mecanismos para seleccionar a dichos vecinos, pero sí establece que el número de vecinos debe ser limitado, incrementando pues la importancia de una adecuada selección de los nodos MPs vecinos. Las primeras propuestas de mecanismos de

selección de vecinos para redes multi-hop existentes en la literatura utilizaban, como criterio para la selección, parámetros como la intensidad de la señal recibida de los vecinos [3] y la proximidad de los vecinos [4]. La sencillez de estas propuestas ha hecho que hayan sido utilizadas en numerosas aplicaciones de redes sensoriales, de redes *peer-to-peer*, etc. Además de no contar con un número limitado de vecinos a seleccionar, las propuestas [3] y [4] no están diseñadas para trabajar en un entorno urbano en el que pueden darse densidades de usuarios no uniformes, y por lo tanto debe garantizarse la diversidad espacial en la elección de los vecinos para incrementar el grado de conectividad de los nodos de la red. Un estudio reciente, llevado a cabo en [5], elabora un mecanismo de selección de vecinos para redes ad-hoc urbanas basado en el cálculo del PER (*Packet Error Ratio*) de los mensajes de beacon. El diseño del mecanismo de selección de vecinos propuesto en [5] está basado en el conocimiento de los autores de las características de la movilidad urbana para seleccionar a aquellos que vayan a ser vecinos durante el mayor tiempo. Al igual que las anteriores propuestas, [5] tampoco considera un número limitado de vecinos seleccionados.

En este contexto, el presente trabajo propone unos nuevos mecanismos que explotan la diversidad espacial en la selección de vecinos. La consideración de la diversidad espacial garantiza a la estación fuente una mayor posibilidad de alcanzar a la estación destino a través de los enlaces lógicos establecidos entre *peer*_MPs.

II. ESTÁNDAR IEEE 802.11S

El estándar 802.11s está centrado principalmente en la capa 2 o capa de nivel de enlace de datos del modelo de referencia OSI. Para llevar a cabo la formación de redes mesh inalámbricas, desarrolla funcionalidades tales como descubrimiento de la red mesh, autenticación, gestión de enlaces mesh, selección de canal, seguridad, selección de ruta, interworking y control de congestión entre otras. Este artículo analiza principalmente el descubrimiento de la red mesh y la selección de ruta, y especialmente la gestión de enlaces mesh.

El descubrimiento de la red mesh se lleva a cabo a través del envío y recepción de mensajes de beacon, mensajes enviados por los MPs en modo broadcast que permiten además conocer a los MPs vecinos.

El mecanismo de selección de ruta propuesto en el estándar 802.11s, denominado HWMP (*Hybrid Wireless Mesh Protocol*), está compuesto por un modo reactivo y otro proactivo, permitiéndose un funcionamiento individual y conjunto de ambos modos. Las propuestas presentadas en este artículo implementan la modificación de AODV [6] desarrollada en el modo reactivo. Esta modificación permite, a los nodos intermedios, procesar un mismo paquete de búsqueda de ruta en más de una ocasión, si el paquete contiene un coste acumulativo de ruta menor que los anteriormente procesados. Para calcular el coste de cada uno de los enlaces entre *peer_MPs*, el estándar 802.11s define por defecto la métrica ‘*Airtime Link Metric*’, aunque permite la utilización de otra métrica dependiendo de las características de la red. El presente trabajo ha optado por la implementación propuesta en [7] para calcular el coste de cada uno de los enlaces, debido a la idoneidad de los parámetros considerados en la función de costes para un escenario de las características de las redes MCN. La función de costes ‘Multi-Métricas’ presentada en [7] considera el número de saltos, la congestión del canal y el coste energético para determinar un valor que modele el coste de cada uno de los enlaces entre parejas de nodos. De este modo, la ruta escogida es aquella que minimiza el coste acumulativo de cada uno de los enlaces que componen las rutas que llegan a la estación destino desde la estación fuente.

El mecanismo de gestión de enlaces mesh descrito en el estándar 802.11s engloba las tareas de establecimiento y destrucción de enlaces lógicos entre MPs. La formación de los enlaces lógicos entre MPs provoca que los nodos involucrados pasen a denominarse *peer_MP* mutuamente, otorgándoles la capacidad de enviar y procesar mensajes distintos a los de descubrimiento de la red mesh y de establecimiento de enlaces lógicos. El estándar 802.11s especifica claramente que la definición de los requisitos que deben cumplir el número limitado de MPs candidatos a convertirse en *peer_MPs* no es objetivo del estándar.

III. ALGORITMOS DE SELECCIÓN DE VECINOS

Los algoritmos de selección de vecinos propuestos en este artículo trabajan en dos fases distintas. Una primera fase, o fase de establecimiento, realizada por cada MP con una periodicidad T , en la que es ejecutado el mecanismo de establecimiento de enlaces lógicos mesh con el MP vecino seleccionado. La fase de establecimiento es ejecutada únicamente si el número de *peer_MPs* es inferior al número máximo de vecinos seleccionables (*max_peer_MPs*). La segunda fase, o fase de actualización, comprueba que los *peer_MPs* sigan cumpliendo el criterio de selección por el que fueron escogidos, para que en caso contrario, se produzca una actualización si existe un MP candidato que verifique el criterio de selección. La fase de actualización implica la incorporación de un nuevo MP vecino sustituyendo al *peer_MP* causante del incumplimiento del criterio de selección. Esta segunda fase es ejecutada con una periodicidad $3T$.

A. Algoritmo de selección de vecinos ‘Bidireccional’

El algoritmo de selección de vecinos ‘Bidireccional’ (s-2D) pretende evitar la formación de todos los enlaces lógicos

permitidos en una misma dirección con el objetivo de que exista una mayor diversidad de rutas para alcanzar a la estación destino. En la fase de establecimiento, s-2D selecciona a sus vecinos en función del PER medido en los mensajes de beacon (criterio de selección de vecinos propuesto en [5], que será denominado a partir de este momento como s-PER), a excepción del último vecino permitido. En la selección del último de los vecinos, el algoritmo s-2D comprueba la localización de los *peer_MPs* establecidos previamente y busca en esta última selección asegurar la diversidad espacial, escogiendo a un MP situado en dirección contraria al resto de *peer_MPs*. La fase de actualización únicamente se ejecuta si el criterio s-2D no se cumple, es decir los vecinos seleccionados se encuentran todos en la misma dirección, y existe algún MP candidato para satisfacer el criterio.

Con el objetivo de mejorar la calidad de los *peer_MPs* seleccionados, ha sido implementado el algoritmo sh-2D. Esta versión híbrida entre los algoritmos s-2D y s-PER lleva a cabo una actualización de los MPs seleccionados si, por un lado el criterio de selección s-2D deja de cumplirse, y por otro lado existe algún MP vecino con una mejor relación de PER que no impida que el criterio s-2D siga cumpliéndose.

B. Algoritmo de selección de vecinos ‘mínima Separación’

El algoritmo de selección de vecinos ‘mínima Separación’ (s-mS) pretende evitar la selección de MPs que se encuentren próximos entre sí, y que por lo tanto no representan una opción diferenciadora en cuanto a las tareas de enrutamiento. Durante la fase de establecimiento, el algoritmo s-mS procura una distancia mínima (*dist_PEERs*) entre el MP candidato y el MP que está llevando a cabo el proceso de selección, y entre el MP candidato y cada uno de los *peer_MPs*. En la fase de actualización se comprueba si el criterio s-mS sigue cumpliéndose, es decir si existe una separación mínima *dist_PEER* entre vecinos seleccionados. Si no fuera el caso, se produciría una actualización si existe algún MP candidato que verifique la condición impuesta en s-mS.

La versión híbrida entre s-mS y s-PER también ha sido implementada. sh-mS pretende, en la fase de actualización, seguir garantizando el criterio de selección s-mS, pero además ejecuta el proceso de actualización si existe algún MP candidato con una mejor relación de PER que continúe verificando el criterio s-mS.

C. Algoritmo de selección de vecinos ‘Bidireccional-mínima Separación’

Con el objetivo de explotar la diversidad espacial de los algoritmos de selección de vecinos propuestos en este artículo, ha sido implementada una versión conjunta del algoritmo de selección de vecinos ‘Bidireccional’ y ‘mínima Separación’ (s-2D-mS). Durante la fase de establecimiento, el algoritmo s-2D-mS selecciona a sus vecinos bajo la condición ‘mínima Separación’, a excepción del último vecino permitido en el que se procura el cumplimiento del criterio ‘Bidireccional’. Durante la fase de actualización se comprueba primero que el criterio ‘Bidireccional’ siga cumpliéndose, y a continuación el criterio ‘mínima Separación’.

Al igual que en los dos algoritmos presentados anteriormente, ha sido implementada una versión híbrida con

el algoritmo s-PER, denominada sh-2D-mS. La versión híbrida pretende que los MPs seleccionados cumplan el criterio impuesto por el algoritmo de selección s-2D-mS, pero que además posean el PER del enlace más bajo, y por lo tanto una mejor calidad del canal con los peer_MPs.

IV. PLATAFORMA DE SIMULACIÓN

El presente estudio ha sido desarrollado empleando la plataforma de simulación ns2 (*Network Simulator v.2*) [8] con el fin de modelar la comunicación entre los distintos nodos del sistema.

Sobre un escenario tipo Manhattan de dimensiones 1900m x 1900m, 350 nodos se desplazan siguiendo un modelo de movilidad ‘*Random Walk Obstacle*’ [9]. Esta densidad de nodos garantiza que el 95% de los nodos del escenario tienen al menos cuatro vecinos, valor escogido como número máximo de vecinos seleccionables (*max_peer_MPs*). De esta forma se garantiza una selección de vecinos en base a los criterios impuestos por los algoritmos de selección de vecinos. Para dar mayor realismo al escenario de simulación, existen dos vías principales con una mayor densidad de nodos que se cruzan en el centro del escenario, donde está situada la estación destino del tráfico generado.

La tecnología de acceso radio empleada por los nodos es 802.11a a 5.8GHz. Las ecuaciones que modelan el efecto del *pathloss* para medir las pérdidas de propagación que sufre la señal radio al propagarse entre transmisor y receptor han sido extraídas del modelo urbano micro-celular desarrollado en el proyecto europeo WINNER [10]. Dicho modelo considera una topología tipo Manhattan, diferenciando la atenuación de la señal en base a la existencia de condiciones de visión directa (LOS – *Line-of-Sight*) o NLOS (*Non Line-of-Sight*). A pesar de que en el modelo implementado transmisor y receptor están ambos ubicados en el exterior, se considera una altura del transmisor de 5m y del receptor de 1.5m, lo cual no se ajusta fielmente al entorno urbano requerido, en el cual pueden darse transmisiones a la misma altura.

Tabla 1. Parámetros de configuración para la simulación

Parámetro	Valor
Potencia de Transmisión (W)	0.2
Anchura de los edificios (m)	225
Anchura de calle (m)	25
Tasa de transmisión (Mbps)	12
<i>dist PEERs</i> (m)	25 = Anchura de calle
<i>T</i> = Periodo de beacon (s)	1
Velocidad de desplazamiento (m/s)	1.5
Tamaño del paquete de datos (bytes)	500

El tráfico modelado para medir las prestaciones de los algoritmos sigue los patrones de tráfico a ráfagas actualmente experimentados en la transmisión de datos. Es importante destacar que el modelo empleado no pretende reproducir de forma exacta un cierto tipo de tráfico, sino modelar las intermitencias características en las transmisiones de datos y sesiones de Internet. En el modelo implementado, durante sesiones de 200 segundos se lleva a cabo un tráfico intermitente compuesto por periodos de actividad (ON) de duración 5 segundos y periodos de inactividad (OFF) de 15

segundos. Durante los periodos de ON son enviados en dirección a la estación destino un total de 50 paquetes, es decir, 10 paquetes/segundo. El periodo de inactividad de 15 segundos provoca la destrucción de las tablas de rutas de los nodos por expiración de la validez y por tanto, la necesidad de una nueva búsqueda de ruta en el siguiente periodo de ON.

El resto de parámetros utilizados para la configuración de la simulación vienen detallados en la Tabla 1.

V. RESULTADOS

Con el fin de evaluar las propuestas de mecanismos de selección de vecinos desarrolladas en el presente artículo, el criterio de selección de vecinos basado en el PER propuesto en [5] ha sido implementado como algoritmo base con el que realizar las comparaciones. Para evaluar el rendimiento máximo de la consideración de la diversidad espacial en la selección de MPs vecinos, también ha sido implementada MM, una propuesta en la cual se consideran a todos los MPs vecinos como peer_MPs, logrando en este caso el mayor grado de diversidad posible. Cabe destacar que, en un entorno realista, la asunción de que todos los vecinos pueden ser considerados como peer_MPs en redes cooperativas es totalmente irreal, debido a la inundación y congestión que se provocaría en la red.

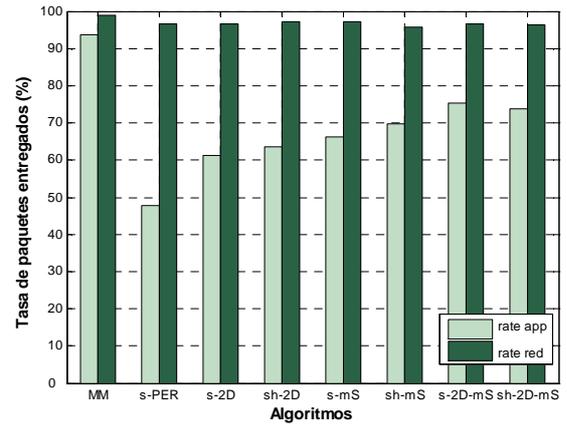


Fig. 1. Tasa de paquetes entregados al destino respecto a los generados por la aplicación y a los enrutados

En la Fig. 1 puede apreciarse cómo el algoritmo MM, que considera a todos sus vecinos como peer_MPs, consigue las mayores tasas de paquetes entregados al destino con respecto a los generados por la aplicación (rate_app), y de paquetes entregados al destino en relación al número de paquetes enrutados (rate_red). Sin embargo, la consideración de todos los nodos vecinos como peer_MPs requiere una elevada señalización en el proceso de búsqueda de ruta. Los resultados obtenidos han demostrado que el algoritmo MM incrementa el número de paquetes de búsqueda de ruta retransmitidos en cada intento de búsqueda de ruta en un 550% y un 700% respecto a los mecanismos de selección de vecinos s-2D-mS y s-2D respectivamente.

En la Tabla 2 puede encontrarse la justificación a los resultados obtenidos en relación a las tasas de paquetes entregados de la Fig. 1 para los mecanismos que consideran la selección de vecinos. Al incrementar el grado de diversidad espacial, representado en la Tabla 2 como la

separación existente entre los vecinos seleccionados, las posibilidades de encontrar una ruta entre las estaciones fuente y destino a través de los nodos intermedios se incrementan (Fig. 1). El incremento en las posibilidades de creación de ruta se traduce por lo tanto en un aumento de 'rate_app', llegando a conseguirse mejoras del 57% comparando los algoritmos s-PER y s-2D-mS.

Tabla 2. Media y desviación típica de la separación entre peer_MPs

Algoritmo \ Separación	s-PER	s-2D	s-mS	s-2D-mS
Media	150.62	159.76	182.01	183.42
Std	110.12	113.62	118.24	118.32

Las mejoras conseguidas en la tasa de paquetes entregados a nivel de aplicación por los algoritmos híbridos, por el hecho de contar con vecinos seleccionados con una mejor calidad del enlace manteniendo la consideración de la diversidad, presentan las consecuencias mostradas en la Fig. 2. En esta figura se muestra la duración de los enlaces lógicos creados entre peer_MPs. La constante actualización de vecinos seleccionados, llevada a cabo en los algoritmos híbridos y en el algoritmo s-PER, provoca un notable descenso en la duración de los enlaces lógicos. Teniendo en cuenta el intercambio de mensajes necesarios para el establecimiento y destrucción de enlaces lógicos, la actualización de vecinos implica además un incremento de señalización. Los resultados obtenidos demuestran que los algoritmos híbridos incrementan el número de intentos de establecimientos de peer_MPs en un 43% para el algoritmo s-2D, en un 14% para s-mS y en un 12% para s-2D-mS.

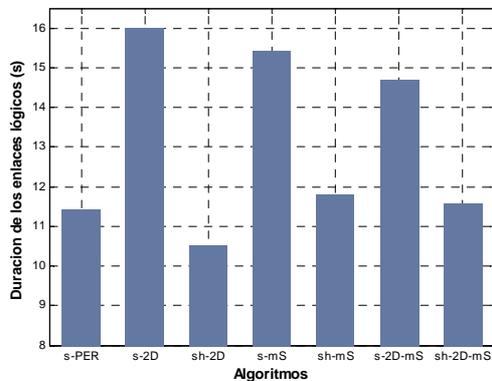


Fig. 2. Duración de los enlaces lógicos mesh creados entre peer_MPs

Por último, la Tabla 3 muestra un resumen de las características de las rutas creadas. Cabe destacar las diferencias existentes entre los resultados obtenidos para el algoritmo MM y el resto de algoritmos. El hecho de que MM cuente con todos los vecinos para el establecimiento de la ruta repercute en la creación de rutas más directas hacia el destino. Además, la función de costes utilizada sobre el protocolo de enrutamiento prima la creación de rutas con el menor número de saltos, de ahí la creación de rutas en MM con una mayor distancia entre saltos. La comparativa entre los algoritmos que realizan el proceso de selección de vecinos refleja de nuevo los beneficios de considerar la diversidad espacial en la selección de los vecinos. A pesar de que el algoritmo s-PER establece rutas con una menor

distancia, o rutas más directas, y con una menor distancia entre saltos, lo cual debería convertirse en una ventaja de s-PER sobre el resto de algoritmos, los resultados de la Fig. 1 muestran las carencias de s-PER. Las bajas tasas conseguidas por s-PER en 'rate_app' son fruto de la ausencia de la consideración de la diversidad en la selección de vecinos, reflejada en la Tabla 2.

Tabla 3. Tabla resumen de las características de las rutas creadas

Algoritmo	MM	s-PER	s-2D	s-mS	s-2D-mS
Número saltos	6.03	13.1	13.5	13.2	12.9
Distancia salto (m)	187.3	126.5	127.1	143.6	142.8
Distancia ruta (m)	1099.5	1532.7	1690.1	1869.9	1831.5

VI. CONCLUSIONES

En el presente artículo, los autores han propuesto una serie de mecanismos de selección de vecinos para redes mesh inalámbricas utilizando el procedimiento de gestión de enlaces descrito en el estándar 802.11s. Los mecanismos de selección de vecinos propuestos en este artículo explotan la diversidad espacial en la elección de los vecinos con el fin de incrementar la posibilidad de alcanzar a la estación destino de tráfico a través de los enlaces lógicos creados. Los resultados demuestran que considerar dicha diversidad permite incrementar la tasa de paquetes entregados al destino.

ARADICIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación bajo el proyecto TEC2008-06728 y por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio bajo el proyecto TSI-020400-2008-113.

REFERENCIAS

- [1] Y. Lin y Y. Hsu, "Multihop Cellular: A New Architecture for Wireless Communications", en *IEEE Proceedings INFOCOM*, vol. 3, pp. 1273-1282, 2000, Israel.
- [2] IEEE P802.11s/D2.0, draft amendment to standard IEEE 802.11: Mesh Networking. *IEEE Standard*, 2007.
- [3] S. Itaya, J. Hasegawa, P. Davis, N. Kadowaki y S. Obana, "Achieving stable operation of ad hoc wireless networks with neighbor pre-selection and synchronous route updates", en *IEEE Proceedings LCN*, pp. 702-708, 2005, Australia.
- [4] C. Cramer y T. Fuhrmann, "Proximity Neighbor Selection for a DHT in Wireless Multi-Hop Networks", en *IEEE Proceedings P2P*, pp. 3-10, 2005, Alemania.
- [5] A. Uchiyama, S. Fujii, T. Umeda, H. Yamaguchi y T. Higashino, "Neighbor Selection Algorithm for Ad hoc Networks with Highly Dynamic Urban Mobility", en *Proceedings IWCMC*, pp. 165-170, 2008, Grecia.
- [6] C. Perkins y E. Royer, "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing", en *IEEE Proceedings WMCSA*, pp. 90-100, 1999, EEUU.
- [7] L. Cao, K. Sharif, Y. Wang y T. Dahlberg, "Adaptive Multiple Metrics Routing Protocols for Heterogeneous Multi-Hop Wireless Network", en *IEEE Proceedings CCNC*, pp. 13-17, 2008, EEUU.
- [8] The Network Simulator - ns2. Sitio web oficial: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [9] K. Maeda, A. Uchiyama, T. Umedu, H. Yamaguchi, K. Yasumoto y T. Higashino, "Urban Pedestrian Mobility for Mobile Wireless Network Simulation", en *Ad Hoc Networks, Elsevier*, Vol. 7, No. 1, pp. 153-170, 2009.
- [10] WINNER, "D1.1.1. WINNER II interim channel models", *Public Deliverable*, <https://www.ist-winner.org/index.html>