

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

**INGENIERÍA TÉCNICA DE
TELECOMUNICACIONES,
ESPECIALIDAD EN TELEMÁTICA**

Trabajo Fin de Carrera

**Estudio de protocolos de enrutamiento en redes Ad-hoc
vehiculares**

Iván Cantero Mencerreyes

2011

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

Escuela Politécnica Superior

INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIONES, ESPECIALIDAD EN TELEMÁTICA.

Trabajo Fin de Carrera

Estudio de protocolos de enrutamiento en redes Ad-hoc
vehiculares

Autor: Iván Cantero Mencerreyes

Director: José Manuel Giménez Guzmán

TRIBUNAL:

Presidente: Guillermo Ibáñez Fernández

Vocal 1º: Juan Antonio Carral Pelayo

Vocal 2º: Jose Manuel Giménez Guzmán

CALIFICACIÓN:

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento a José Manuel Giménez Guzmán, mi tutor y profesor del departamento de Automática de la Universidad de Alcalá, por la dedicación de su tiempo, la supervisión y toda la ayuda prestada durante la elaboración de este trabajo fin de carrera. Muchas horas de su tiempo dedicadas a mí, respondiendo a mis dudas a la mayor brevedad posible, entendiendo mis necesidades, ayudándome y orientándome en todo momento. De nuevo mi más sincero agradecimiento.

También aprovecho para agradecer todo el esfuerzo realizado por los profesores del departamento de automática que fundamentalmente son los que he tenido cerca durante el transcurso de la carrera, y por extensión a todos los profesores de la politécnica de la Universidad de Alcalá, ya que con su esfuerzo y trabajo continuo han hecho posible que la politécnica se haya adaptado en esta época de cambios a las nuevas titulaciones, manteniendo una buena valoración de los titulados de la universidad de cara a nuestro futuro profesional.

Y finalmente quiero agradecer a mi familia, a mi novia y amigos todo su ánimo y constante apoyo durante estos meses de proyecto y estos años de carrera, ya que ha sido un estímulo fundamental para poder seguir adelante y conseguir mis objetivos.

Resumen

Las redes vehiculares son una clase novedosa de redes inalámbricas entre vehículos equipados con tecnología inalámbrica de corto y medio alcance. Este tipo de redes usualmente conocidas como redes VANET (Vehicular Ad hoc NETWORKS).

Estas redes están siendo concebidas en la actualidad y existen muchas líneas de investigación. Para este proyecto nos centramos en el enrutamiento VANET. El proyecto realiza una valoración sobre protocolos destinados a este fin, para adquirir una opinión y poder elaborar unas conclusiones que ayuden a la hora de implementar un protocolo de enrutamiento.

Palabras clave: Encaminamiento, VANET, nodos vehiculares, ruta, transmisión.

Abstract

Vehicular networks are a novel class of wireless networks that are formed spontaneously between moving vehicles equipped with short, medium-range wireless technology. They are usually referred to as VANET (Vehicular Ad hoc Networks).

These networks are being designed now and there is a vast ocean of ideas and lines of work around these networks. For this project we focus on the case of routing in such networks. The paper makes a documentation and a valuation of a large number of protocols for this purpose, to have at the end, own opinions and conclusions to help implement a future routing protocol.

Key words: Routing, VANET, Vehicular nodes, path, transmission.

Índice

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN	1
1.1 REDES VANET	1
1.2 LOCALIZACIÓN DEL DESTINO	6
1.3 ENRUTAMIENTO	10
CAPÍTULO II - PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO UNICAST	15
2. Unicast – Dirigido a un solo destinatario	15
2.1 Protocolos Reactivos	18
2.1.1. AODV (Ad -hoc On-demand Distance Vector)	19
2.1.2. PRAODV y PRAODV-M	20
2.1.3. AODV + PGB (Preferred Group Broadcasting)	21
2.1.4. CAR (Connectivity-Aware Routing in VANETs)	22
2.1.5. DYMO (DYnamic Manet On-demand protocol)	24
2.1.6. DSR (Dynamic Source Routing)	26
2.1.7. DNVR (Dynamic Nix-Vector Routing)	27
2.1.8. OLDW (On-Demand Link Weight protocol)	28
2.1.9. RSRP (Robust Secure Routing Protocol)	30
2.2 Protocolos Proactivos	32
2.2.1. OLSR (Optimized Link State Routing)	33
2.2.2. TBRPF (Topology dissemination Based on Reverse Path Forwarding)	34
2.2.3. TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm)	36
2.2.4. ATR (Augmented Tree-based Routing Protocol for Scalable AdHoc Networks)	37
2.2.5. LOUVRE (Landmark Overlays for Urban Vehicular Routing Environments)	39
2.3 Protocolos basados en clusterización.	42
2.3.1. COIN (Clustering for Open IVC Networks)	43
2.3.2. LORA_CBF (LOcation Routing Algorithm with Cluster-Based Flooding)	44
2.4 Protocolos basados en Georouting	46
2.4.1. Estrategias de control del rango de transmisión	48
2.4.2. DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility)	49

2.4.3. LAR (Location Aided Routing)	50
2.4.4. GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)	52
2.4.5. GSR (Geographic Source Routing)	53
2.4.6. CBF (Contention-Based Forwarding)	54
2.4.7. A-STAR (Anchor-based Street and Traffic Aware Routing).....	55
2.4.8. ExOR.....	56
2.4.9. MoVe (Motion Vector).....	57
2.4.10. GPCR (Greedy Perimeter Coordinator Routing).....	59
2.4.11. GPSR + AGF (Advanced Greedy Forwarding)	60
2.4.12. SMF (Skewed Map Forwarding)	61
2.4.13. GyTAR (improved Greedy Traffic Aware Routing protocol).....	63
2.4.14. GpsrJ+	66
2.4.15. GeOpps (Geographical Opportunistic Routing for Vehicular Networks)	68
2.4.16. VCLCR (VANET Cross Link Corrected Routing Protocol)	69
2.4.17. GeoDTN + NAV (A Hybrid Geographic and DTN routing with Navigation Assistance in Urban Vehicular Networks)	71
2.4.18. GRANT (Greedy Routing with an Abstract Neighbour Table).....	73
2.4.19. VRR (Vehicular Reactive Routing algorithm)	75
2.4.20. RVBT (Road-Based using Vehicular Traffic information routing).....	77
2.4.21. TO-GO (Topology-assist Geo-Opportunistic Routing in Urban Vehicular Grids)	79
2.4.22. SPANER (wireless multihop communication in SPArse vehicle ad-hoc Networks Routing)	81
2.5 Protocolos Híbridos	84
2.5.1. ZRP (Zone Route Protocol).....	85
2.5.2. HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol)	86
2.5.3. HRPLS (Hybrid Routing Protocol for Large Scale mobile ad-hoc networks)	87
2.5.4. LANMAR + DFR (Direction Forward Routing)	88
CAPÍTULO III - PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO MULTICAST	93
3.1 Protocolos GEOCAST	94
3.1.1. GeoRouting	94

3.1.2. LBM.....	96
3.1.3. GeoTORA.....	97
3.1.4. GeoGRID	98
3.1.5. DUHGP	99
3.1.6. ZOR	101
3.1.7. IVG	102
3.1.8. CGG (Cached Greedy Geocast)	103
3.1.9. AG (Abiding Geocast).....	105
3.2 Protocolos BROADCAST.....	109
3.2.1. BROADCAST.....	109
3.2.2. UMB (Urban Multi-Hop Broadcast)	110
3.2.3. VTRADE y HV-TRADE (Vector-based TRacking Detection y Historic-enhanced VTRADE).....	111
3.3 Protocolos MULTICAST	115
3.3.1. SENCAST	115
3.3.2. EraMobile	116
3.3.3. MRMP (Maximum-Residual Multicast Protocol).....	117
CAPÍTULO IV - PRESUPUESTO	121
4.1 Tareas realizadas	121
4.2 Diagrama de Gantt	123
4.3 Esfuerzo.....	124
CAPÍTULO V - CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	125
Conclusiones y trabajo futuro	125
BIBLIOGRAFÍA.....	135

Capítulo I

Introducción

1.1 Redes VANET

Las redes VANET (Vehicular Ad-hoc NETWORKS) son un caso específico de las redes MANET (Mobile Ad-hoc NETWORKS). Ambas son redes que interconectan de manera inalámbrica todos sus nodos con diferentes posibilidades tecnológicas, y en ambos tipos de red los nodos están en constante movimiento de una manera no uniforme, un tanto aleatoria y variando constantemente la posición relativa de los nodos entre sí. Entre ambas existen diferencias implícitas derivadas del tipo de red que explicaremos más adelante.

Las VANETs son una nueva tecnología emergente diseñada para aprovechar las posibilidades que aportan este tipo de redes sin cables de nueva generación a los vehículos. La idea es proporcionar conectividad ubicua mediante estas redes cuando los usuarios móviles están en los vehículos, al igual que tienen hoy en día en casa, en el lugar de trabajo, redes móviles, etc. y que a su vez estas redes están conectadas al mundo exterior e interconectadas entre sí. El segundo punto importante de estas redes es proporcionar comunicaciones eficientes que permitan sistemas inteligentes de transporte (ITS- Intelligent Transportation Systems). Así pues las VANET se las conoce también como *Inter-vehicle Communications (IVC)* o *Vehicle-to-Vehicle (V2V) communications*. Esto último constituye una de las mayores aplicaciones a VANETs. Incluye una variedad de aplicaciones como monitorización de tráfico cooperativo, control del flujo del tráfico, los llamados cruces ciegos (sin semáforos), prevención de colisiones, información de servicios en las cercanías, y procesamiento de los desvíos a seguir en una ruta en tiempo real, al igual que podría hacer actualmente un GPS, pero con el valor añadido de conocer el estado del tráfico.

Otra aplicación importante es proporcionar conectividad hacia Internet en los nodos vehiculares mientras que estos se mueven, tal que los usuarios dentro de los nodos puedan

descargarse música, enviar emails, consultar la web o jugar a juegos en red desde los asientos de atrás.

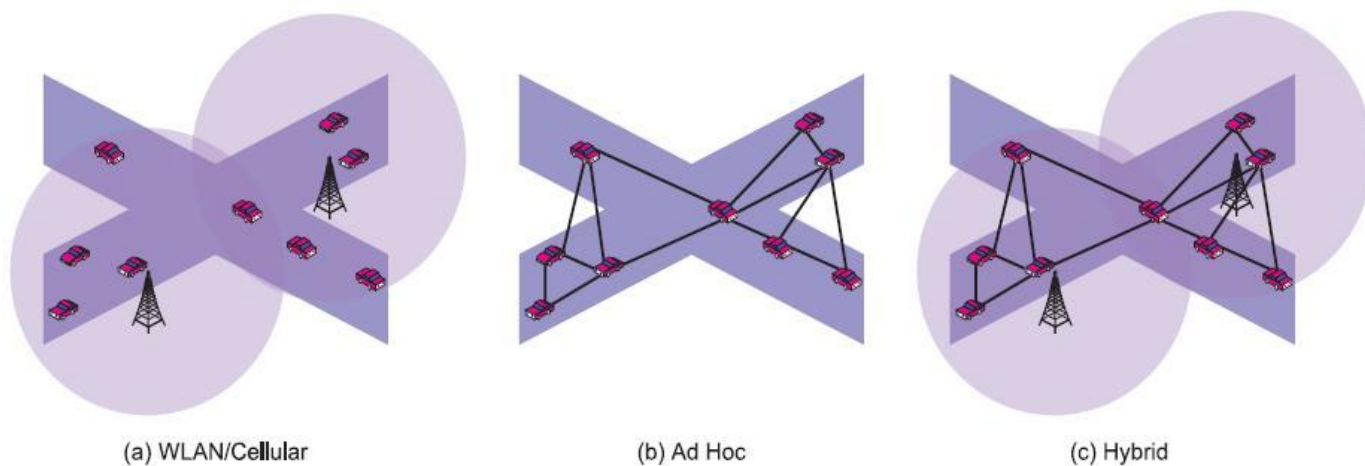
El desarrollo de las VANET ha sido una parte importante de las investigaciones llevadas a cabo desde universidades y desde grandes compañías automovilísticas. Uno de los primeros estudios *IVC* fue desarrollado por la JSK (Asociación para la tecnología electrónica en el tráfico automovilístico y la conducción) en los años 80. A partir de ahí se han demostrado muchas técnicas novedosas, entre ellas la técnica de unir dos o más vehículos juntos eléctricamente para formar un tren, de manera que el único que tenga que preocuparse de la conducción sea el conductor del primer vehículo, un conductor profesional (al igual que haría un conductor de autobús responsabilizándose de los pasajeros) y los conductores de los *vehículos vagón* únicamente se preocupan de realizar una fase previa para adjuntarse y otra al final para separarse.

Siguiendo esta tendencia, se han creado varios nuevos *workshops* para focalizar los problemas de la investigación en este área emergente, tales como el “ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks” o el “Workshop on Intelligent Transportation”. Por otro lado varios fabricantes automovilísticos han comenzado a invertir en redes vehiculares. Audi, BMW, DaimlerChrysler, Fiat, Renault y Volkswagen se han unido para crear una organización sin ánimo de lucro llamada Car2Car Communication Consortium (C2CCC), la cual está dedicada al objetivo de incrementar rápidamente la seguridad y eficiencia vial mediante estas comunicaciones entre vehículos.

La organización de estandarización IEEE también ha formado el nuevo grupo de trabajo IEEE 802.11p, el cual está enfocado a proporcionar acceso sin cables para los entornos vehiculares. De acuerdo a las predicciones oficiales de planes de evolución IEEE 802.11, el estándar 802.11p fue publicado en 2009 con el nombre de WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments).

Debido a la alta movilidad de los nodos y a unos canales de comunicación poco fiables, las VANET tienen sus propias características que proponen multitud de retos y problemas que investigar, como la diseminación eficiente de la información, la compartición de datos y distintos problemas de seguridad, ya que las VANET se apoyan en comunicaciones inalámbricas.

Las MANET generalmente (aunque pueden hacerlo para determinados servicios) no se apoyan en una infraestructura fija para la comunicación y disseminación de información. Las VANET siguen el mismo principio y lo aplican a sus entornos, altamente dinámicos dentro del transporte



superficial. Como podemos observar en la figura, la arquitectura VANET se puede distribuir en 3 categorías: red totalmente celular, totalmente ad-hoc o híbrido entre ambas.

A día de hoy, las investigaciones principales se centran en las redes puramente ad-hoc, ya que los servicios celulares requieren de un pago a las compañías con infraestructura en activo. Estas redes están creciendo en gran medida en la actualidad, tanto en cobertura como en capacidad, por lo tanto si bien es cierto que se tiene en cuenta como segunda opción, no conviene obviar esta tecnología y las posibilidades que puede aportar, sobre todo de cara a servicios solicitados por los vehículos que requieran de acceso a Internet, los cuales necesitan una mínima infraestructura desplegada. La otra opción existente es la de desplegar en la cercanía de la carretera dispositivos que proporcionaran la conectividad entre los nodos vehiculares e Internet. El problema de esta solución es que la infraestructura tendría que desplegarse partiendo de cero, y aunque no es imposible, sí es seguro que llevará bastante tiempo el que alguien asuma los costes, por lo tanto la estructura híbrida (*celular/ad-hoc*) sería una solución intermedia ya que actualmente a nivel celular está muy desplegada, y a nivel ad-hoc iría incorporada dentro de los propios vehículos asumiendo cada usuario el coste del dispositivo individual.

Una vez alcanzado el despliegue de los dispositivos a los lados de las vías, el objetivo de las VANET de cara a tener acceso a Internet en los vehículos, es poder llegar a dichos dispositivos mediante los protocolos de enrutamiento adecuados, de manera que la información se transmita en modo multisalto a través de varios nodos para alcanzar los dispositivos y pueda después realizar el

camino de vuelta hasta el nodo que solicitó la información. Esta comunicación se la conoce como *vehicle to road communication (V2R)* o viceversa.

En cuanto a los demás servicios, esos protocolos de enrutamiento tendrían que permitir el alcance entre nodos a varios saltos de distancia, de manera que puedan comunicarse entre sí aportándose información relativa a situaciones de emergencia, información vial, accidentes o información recabada de manera distribuida como por ejemplo el estado del tráfico. Este otro tipo de comunicación es la llamada *Vehicle to Vehicle communication (V2V)*.

Los vehículos habilitados para tal fin, con capacidad radio, forman las VANET y actúan como nodos móviles por un lado y por otro lado como routers para los demás nodos. Además de las similitudes con las redes ad-hoc, como un rango de transmisión corto, auto organización y gestión interna de la red, las VANETs se pueden distinguir de otros tipos de redes ad-hoc en los siguientes aspectos:

– Topología altamente dinámica: debido a la alta movilidad de los vehículos, la topología de las VANET está constantemente cambiando. Por ejemplo, si asumimos que el rango de transmisión de cada vehículo es de 250m, cuando se establece un enlace entre dos nodos la distancia entre ellos será menor a los 250 metros. En el peor de los casos, si dos vehículos viajan en sentidos opuestos a 100km/h (27.8m/s), el enlace entre los dos durará aproximadamente 10 segundos. Si extrapolamos el resultado a toda la red, observamos que continuamente se están rompiendo enlaces por lo que constantemente habrá que hallar nuevas rutas de encaminamiento *end-to-end*, consumiendo recursos en los nodos, sobrecargando la red con paquetes de control para generar esas rutas y todo esto al final para tener un mínimo tiempo de aprovechamiento del enlace, que además decrece fuertemente a medida que el número de saltos que tiene la ruta hasta el destino aumenta. De ahí la importancia de un buen algoritmo de enrutamiento capaz de hallar rutas de forma casi inmediata, que a su vez sean lo más estables posible y en las cuales se maximice el tiempo de utilización.

– Conexiones intermitentes, con frecuentes desconexiones: la topología, frecuentemente cambiante resulta en frecuentes desconexiones de red tal y como se comenta en el anterior punto, debido a que el enlace entre dos vehículos puede desaparecer rápidamente mientras que se está transmitiendo la información. Además un condicionante añadido es que existe gran diversidad de

densidad de nodos, y mientras que en las carreteras más frecuentadas existen muchos vehículos con quienes crear enlaces, en carreteras nacionales y dependiendo de a qué horas, habrá menos vehículos vecinos o incluso nos encontraremos solos en la carretera, siendo imposible comunicarnos con alguien y menos aún realizar una comunicación multisalto. A partir de esa problemática se generan distintas metodologías sobre qué hacer con los paquetes que tenemos que enviar. Pueden desecharse o conservarse hasta que tengamos al alcance a un nodo al que reenviar para avanzar a nuestro destino.

– Patrones de movilidad: los vehículos siguen unos ciertos patrones de movilidad, en función de las vías por las que circulan, los límites de velocidad, los semáforos, las condiciones del tráfico, comportamientos del conductor. Debido a estos patrones de movilidad, la evaluación de los protocolos de enrutamiento cobra sentido teniendo en cuenta estos patrones.

– Modelo de propagación: en VANETs el modelo de propagación no es el típico libre de interferencias, ya que muchas veces entre los propios vehículos se interponen elementos urbanos tales como edificios, arboles u otros vehículos que a su vez están transmitiendo. Un modelo de propagación VANET debería considerar bien los efectos de los objetos que se puedan interponer y las potenciales interferencias de los otros vehículos.

– Capacidad ilimitada de batería y almacenamiento: al igual que otros dispositivos se conectan a la batería del vehículo, cualquier dispositivo VANET podría alimentarse de la misma manera, sin tener que preocuparse de la potencia de transmisión como sucede en otros dispositivos de cualquier tipo con batería propia. De igual manera, el almacenamiento no es un recurso caro, por lo que si bien es cierto que se debe optimizar su uso, no es vital que el uso de la memoria empleada sea mínimo.

– Sensores de abordo: se asume que los nodos tendrán sensores capaces de proporcionar información útil para el enrutamiento, bien sea información GPS, mapas, estado del tráfico...

Otro punto importante en estas redes móviles es la localización del destino. Frente a cualquier

red fija en la que la localización del destinatario de un paquete viene asociada con su posición o con una serie de nodos intermedios fijos por los que llegar al destino, sabiendo que se va a seguir el camino hacia el objetivo de una manera similar para todos los paquetes, es relativamente sencillo mantener el objetivo al alcance. Los mayores problemas a los que se enfrentan son aquellos en los que hay que rehacer la ruta, y vienen dados por la caída de alguno de los nodos intermedios, y que ante la imposibilidad de atravesarlo, hay que buscar un nuevo camino atravesando otros nodos. Esto no ocurre así en las redes móviles y por consiguiente tampoco en la redes vehiculares. Existen dos planteamientos posibles que se pueden presentar y que los protocolos de comunicaciones correspondientes han de resolver. En el caso de que la comunicación la queramos realizar con un punto fijo, por ejemplo un nodo (no vehicular) al lado de la carretera que forme parte de la infraestructura desplegada de la red para dar acceso a Internet a los nodos vehiculares, se podría asociar ese nodo fijo con su localización física y por consiguiente con sus coordenadas. El protocolo correspondiente puede entonces enviar sus paquetes hacia esa dirección de manera que salto a salto se llegue al destino. Pero un problema fundamental es que hay que realizar un proceso de descubrimiento de nodos y rutas intermedias, ya que no conocemos el estado y la localización de dichos nodos intermedios, cosa que en una red fija, permanece prácticamente constante. Otro problema es el hecho de que la información viaja en ambos sentidos, y para el nodo intermedio resulta aún más complicado encontrar al nodo que había solicitado información previamente, ya que el nodo puede haber variado su posición perfectamente y sin saber donde se encuentra, ¿cómo saber hacia dónde reenviar?. Pero el caso aún más complicado, y segundo caso que se quiere resaltar es, en una comunicación entre dos nodos vehiculares (por ejemplo el compartimiento de información entre ellos, P2P) que se desplazan por dos carreteras distintas y por supuesto en direcciones distintas, desde un principio cómo saber donde se encuentra el otro nodo, y mientras dure la comunicación y se vayan desplazando los nodos, cómo saber si el nodo se ha vuelto a mover o a permanecido constante, y si hay que reenviar cómo saber si hay que hacerlo hacia otro nodo intermedio o hacia el mismo.

1.2 Localización del destino

Para resolver estos problemas existen una serie de algoritmos, sobre los que vamos a realizar una breve introducción y unas conclusiones orientativas para relacionar las características “especiales” de las VANET, con que se pueda o no utilizar protocolos en nuestro entorno móvil vehicular. Se trata de GLS, D-GHT y MLS, algoritmos que tratan de solucionar los problemas antes

mencionados informando al nodo origen de la situación del destino.

- **GLS (Grid Location Service):**

En [Li, 2000] se puede encontrar la información detallada sobre el algoritmo, pero en resumen, aquí se usa una estrategia denominada “todos para algunos” en la que todos los nodos de la red almacenan la información de enrutamiento en algunos nodos específicos, es decir que cada nodo periódicamente actualiza a un pequeño grupo de nodos específicos (denominados servidores de localización) con su posición actual.

Los servidores de localización no están designados de manera especial. Cada nodo puede actuar de servidor en beneficio de unos cuantos nodos cercanos. El protocolo está diseñado de manera que los servidores de localización alrededor de un nodo son relativamente abundantes, pero lejos de él son escasos. Así se asegura que a la hora de establecer una ruta, cualquier nodo cercano al destino pueda usar un servidor de localización cercano para encontrar a dicho destino, además de que así también se limita el número de servidores de localización para cada nodo. GLS proporciona técnicas de elección de líder o de jerarquización para determinar la responsabilidad de los servidores de localización.

Aún así al ser de tipo proactivo no es considerado muy eficiente [Mauve, 2001] en entornos muy dinámicos, porque con significantes cambios topológicos de la red, se incrementa la transmisión de paquetes de control y consecuentemente se comprometen los recursos de ancho de banda.

- **D-GHT (Dinamic Geographic Hash Table):**

Sobre este algoritmo podemos seguir la referencia de [Le, 2006] para una información más detallada, pero podemos decir que básicamente este algoritmo está encuadrado dentro de los algoritmos de almacenamiento central de datos (DCS). En los sistemas DCS la localización de los nodos se almacena relacionándola con el nombre del nodo. La localización del dato almacenado es obtenida através del uso de las *tablas de hash geográfico*, las cuales enlazan los nombres de los nodos con sus localizaciones geográficas. Los sistemas tradicionales de DCS, como *GHT* [Ratnasany, 2002][Ratnasany, 2003] usan una función estática para conseguir esto, resultando en un número estático de nodos sirviendo a la red durante todo su tiempo de vida. Así es que esos nodos pueden sufrir problemas de utilización de recursos no balanceados y la red no será capaz de lidiar con el propio dinamismo al que se someta dicha red, con la aparición de nuevos nodos y con errores

en los nodos en tiempo de ejecución. Básicamente no tienen una buena adaptabilidad.

Para solucionar estos problemas se recurre a proponer el “GHT dinámico” que se fundamenta en dos ideas:

- Una función hash, que genera una tabla que mapea datos geográficos con un sistema de eventos que tienen en cuenta el tiempo, aportando así una gran adaptabilidad del algoritmo a la red con independencia del movimiento de los nodos.
- Un esquema de localización basado en una potencial contribución de los nodos proactivamente y que contribuye también a la adaptación del sistema al dinamismo de la red.

El sistema en principio estaba orientado a almacenar datos de sensores móviles en una gran red, pero podría ser adaptado a nuestro caso [Flury, 2006] para asociar posición geográfica con el nombre del nodo de manera dinámica.

- **MLS (Mobile ad-hocs Location Service):**

Para información específica y avanzada se puede consultar la referencia [Flury, 2006], pero en resumen MLS consiste en un algoritmo que funciona de manera concurrente y que demuestra su utilidad cuando los nodos son verdaderamente móviles, de manera que incluso se mueven mientras se está enviando el paquete. Según las pruebas realizadas por sus diseñadores la velocidad máxima de movimiento de nodos con la que funciona el protocolo resultó ser 1/15 de la velocidad de enrutamiento.

Se asume que todos los nodos tienen un GPS o un sistema de posicionamiento. MLS permite que un nodo pueda enviar mensajes a cualquier nodo sin saber su posición exacta. Para ello MLS almacena información sobre la localización de los nodos que buscamos, en unos lugares bien definidos y conocidos. Así los paquetes se envían a alguna de esas posiciones especiales, en las que se aprende sobre la localización actual del destino y así se reinicia el algoritmo hasta alcanzar el destino.

El algoritmo se divide en dos partes, la de publicación y la de búsqueda. La de publicación la realiza cada nodo permanentemente para mantener su información sobre posición actualizada. La otra parte se encarga de enrutar mensajes a uno de los nodo bien conocidos mediante algún algoritmo de enrutamiento.

Ahora se van a extraer unas conclusiones orientativas de los tres, para poder ver la relación que tienen las características “especiales” de las redes VANET, con que determinados algoritmos se puedan o no implementar en nuestro entorno vehicular. Empezaremos por GLS por ser el más antiguo de los tres. Presenta una características que resultan positivas como pueden ser el hecho de que no requiere de una infraestructura fija para los “servidores móviles” y el que intenta repartir la carga algorítmica entre los distintos nodos de manera jerárquica, pero por el contrario parece resultar poco eficiente para el descubrimiento de rutas hacia nodos lejanos ya que se almacena la información en muy pocos nodos cuando los vehículos están alejados. Además y concluyendo con este protocolo, debido al alto dinamismo de las redes VANET resulta ineficiente, ya que como veremos en repetidas ocasiones a lo largo de todo el documento, dicho dinamismo resulta muy problemático en muchos casos y acabará por relegar a la condición de ineficientes a gran cantidad de algoritmos.

Continuando con D-GHT (Dinamic Geographic Hash Table), de este algoritmo que aunque nos ha servido para ilustrar la problemática existente y las posibles soluciones que existen, no podemos determinar que pueda ser empleado para redes VANET, ya que en las simulaciones realizadas por los autores [Le, 2006] el movimiento de los nodos es prácticamente nulo en comparación con las velocidades requeridas por la red VANET que recordemos, están formadas por vehículos desplazándose a una gran velocidad. De nuevo el dinamismo resulta un gran problema para los algoritmos existentes. El único punto positivo que se puede concluir de este algoritmo, es que sus autores consiguieron mejorar los problemas de utilización de recursos de los sistemas DCS comentados anteriormente y prolongar el tiempo de vida de la red de manera significativa.

Del que sí se puede dar una mejor valoración es del último protocolo utilizado para ilustrar esta problemática existente en las redes móviles y sobre todo en las VANET, el protocolo MLS. Una de las principales ventajas que tiene este protocolo de las que se beneficia es que permite realizar rápidos reenvíos hacia la zona aproximada de localización del destino, y a medida que se va aproximando el paquete transmitido, los nodos intermedios con información actualizada permitirán refrescar la información de la localización del nodo, que será devuelta al nodo emisor que buscaba dicha información. Por otro lado hay que señalar que en las simulaciones que realizaron los autores se asumieron como ciertas algunas características que pueden no darse en algunos casos, como alta densidad de nodos, comunicaciones fiables... Otro inconveniente que presenta este protocolo es el hecho de que no se puede reutilizar la información de localización del emisor para responder a este desde el destinatario.

A continuación, en el apartado siguiente y después de habernos situado con una introducción en lo que son las redes VANET y algún detalle técnico, vamos a ir entrando en materia más específica y técnica pasando al apartado de enrutamiento, primero igualmente con una introducción sobre el tema y después iremos poco a poco profundizando en los diversos protocolos.

1.3 Enrutamiento

También llamado encaminamiento, es la función por la cual se trata de buscar el mejor camino de entre todos los posibles en una red de paquetes, normalmente formada por un número elevado de nodos, a través de los cuales se enviarán los paquetes por el camino seleccionado de entre los disponibles.

La elección del mejor camino a menudo es una tarea difícil, que depende de distintos factores y en la cual interviene un número de caminos posibles que va incrementándose de manera exponencial a medida que aumenta el número de nodos. Por ello los criterios para tomar la decisión cobran mucha importancia a la hora de descartar caminos “peores”.

Algunos parámetros para determinar qué camino es mejor en función del uso que se le vaya a dar son:

- El camino consigue mantener acotado el retardo entre pares de nodos de la red.
- Consigue una alta cadencia de datos con independencia del retardo medio empleado.
- Permite ofrecer el menor costo (por tiempo de ocupación del camino durante el servicio, por costes generados al desplegar la red...).

Si nos centramos en la utilidad del encaminamiento en las redes VANET debemos valorar este tipo de aspectos positivos, parámetros y características para valorar cuales nos son de utilidad en nuestro entorno VANET para comparar caminos y tomar la mejor decisión posible:

- Un número de saltos menor lleva como consecuencia implícita que el número de nodos implicados en el transporte del paquete por dicho camino va a ser menor, por lo que se disminuyen los retardos por procesamiento y retransmisión en cada nodo intermedio. Pero además habría que tener en cuenta más aspectos, ya que debido a la alta movilidad de los nodos en las VANET, si únicamente nos fijamos en este parámetro y elegimos el camino con menos saltos (mayor distancia entre nodos) corremos el riesgo de que, una vez elegida la ruta a seguir y durante el transporte del

paquete a lo largo del camino, el nodo $N+1$ (siguiendo el orden de nodos intermedios que atraviesa el paquete) deje de ser alcanzable por el nodo N , por lo que el criterio tomado dejaría de ser válido para elegir un buen camino.

– Una alta cadencia de datos sería un parámetro muy importante si lo que se quiere es dar un acceso a Internet en los vehículos. Para ello se puede utilizar enrutamiento multisalto dirigido a dar conectividad a los vehículos con unos nodos con acceso a Internet, que podrían ser fijos y a su vez parte de la infraestructura vial para dar este servicio. Esta es una gran diferencia con respecto a redes fijas o con menor movilidad, que calculando esporádicamente la cadencia a través de un camino pueden utilizar ese valor durante un largo periodo ya que la red apenas varía.

– Un camino que permita mantener acotado el retardo podría ser de utilidad para aplicaciones de tiempo real, pero para mantener controlado dicho retardo se requiere de una constante comunicación colectiva por parte de los nodos entre sí y como consecuencia estaríamos introduciendo una constante sobrecarga en la red debido a las constantes reestructuraciones que sufre esta.

– Además hay otros parámetros que pueden servir de gran utilidad en entornos VANET. Uno de ellos es el *tiempo de vida estimado del camino*. Debido a que cada vez que se pierde un camino es necesario hallar una nueva ruta, si conseguimos orientarnos sobre cuál es el que permanecerá activo durante un mayor periodo de tiempo, podremos aprovechar el tiempo empleado en recalcular rutas para seguir transmitiendo datos. Para orientarnos sobre el tiempo de vida de nuestros caminos nos podemos valer de otros parámetros que se comunican entre sí los nodos periódicamente, como por ejemplo la velocidad y dirección de desplazamiento. Si conseguimos saber qué vehículos de los que tenemos en nuestros posibles caminos circulan por la misma carretera que nosotros y encima obtenemos su sentido de circulación, podemos deducir, que evidentemente los caminos que pasen por nodos circulando en nuestro sentido, a una velocidad similar y por la misma vía permanecerán en nuestro rango de alcance durante mucho más tiempo que los nodos que se desplacen en sentido contrario, por vías perpendiculares o a una velocidad muy distinta de la nuestra. Lógicamente esto se debe a que la distancia relativa a nuestro nodo origen permanecerá más constante y a que la capacidad de transmitir un mensaje a nivel físico depende que el destino se encuentre en el rango de alcance.

– Existe otra característica fundamental del enrutamiento que es el lugar en el que se toma la decisión del camino por donde enviar un paquete, que depende del método que se emplee para

obtener nuestra ruta: en el *origen*, en los *nodos intermedios* de manera distribuida o en un *nodo centralizado*. En VANET la última opción como tal no se considera viable por la magnitud de la red y la imposibilidad de que todos los nodos tengan acceso a uno concreto y centralizado. Pero existe una solución intermedia llamada clusterización. En ella la red se divide en zonas o *clusteres*, en la que los nodos individualmente están asociados a un *cluster*, dentro del que se encuentra un nodo con más “responsabilidades” y en quién delegan los demás nodos del *cluster* funciones como la de elección de la ruta adecuada de encaminamiento. Pero fundamentalmente se recurre a las dos primeras soluciones para aprovechar la capacidad de procesamiento distribuido de las redes VANET y evitar los “cuellos de botella” en los nodos centralizados. Principalmente y a grandes rasgos dentro de los que toman la decisión completa del camino a seguir *en el origen*, se encuentran los métodos reactivos y los proactivos (aunque también existen híbridos) que más tarde estudiaremos, y dentro de los algoritmos que deciden su camino *nodo a nodo*, se encuentran fundamentalmente los que utilizan información geográfica como la localización GPS para tomar las decisiones en cada nodo intermedio.

– Existe un factor de costes a tener en cuenta que hay que dividir en varios aspectos. Se puede analizar un coste por procesamiento y elección de la ruta adecuada que recae en el procesador de la unidad que se encargue del enrutamiento y un coste por reprocesamiento cada vez que se pierda la conexión en la ruta, esto último está ligado estrechamente al factor de *tiempo de vida estimado de la ruta* que se ha comentado anteriormente. Por suerte hoy en día la capacidad de los procesadores es alta con bajos costes, por lo que aunque lógicamente cuanto menos tiempo de procesamiento se emplee mejor, es cierto que este aspecto está perdiendo importancia. Otro factor relacionado con el coste, es la diferencia de coste energético empleado por transmitir una señal a más o menos distancia dependiendo de los nodos existentes en los posibles caminos a elegir. Y aunque para otras redes móviles este aspecto tiene mucha importancia, no es así en redes VANET en la que existe una alta y duradera capacidad de aporte energético. Por lo tanto las diferencias de costes más significativas a la hora de elegir un camino u otro se centran fundamentalmente en el tiempo empleado por el procesador de la unidad de enrutamiento en recalcular una ruta tal y como se ha mencionado anteriormente con el factor de *tiempo de vida estimado de la ruta*.

A partir de ahora comenzaremos a hacer un análisis de una gran cantidad de protocolos de enrutamiento orientados en mayor o menor medida a redes VANET y trataremos de analizarlos, referenciarlos, explicar su funcionamiento algorítmico característico y relacionarlos entre sí para ver su evolución, ventajas, inconvenientes y mejoras con respecto a los anteriores.

Para ello vamos a hacer una pequeña clasificación inicial en dos grupos que van a depender de a cuantos destinatarios se dirige el paquete que vamos a enviar. Por lo tanto nuestros dos grupos iniciales que a su vez dividiremos en dos capítulos van a ser, *un solo destino* (unicast) y *varios destinatarios* (multicast, broadcast, geocast).

Capítulo II

Protocolos de enrutamiento unicast

2. Unicast – Dirigido a un solo destinatario

Dentro de los algoritmos de enrutamiento orientados a que el destinatario sea único, se pueden distinguir varios grupos dependiendo de su forma de operar. Reactivos, proactivos, basados en *clusters*, basados en localización o híbridos son solo los nombres de los grupos en los que agruparemos los distintos protocolos de este capítulo.

Primero analizaremos los protocolos reactivos, que son los que se caracterizan porque hallan la ruta a través de la que enviar una vez que el emisor lo solicita para realizar una transmisión. Algunos ejemplos de estos protocolos los podemos encontrar en [Perkins, 2003], [Namboodiri, 2004], [Naumov, 2006], [Naumov, 2007], [Maltz, 1996], [Maltz, 1998], [Lee, 2005], [Khwildi, 2007], [Afzal, 2008].

Después pasaremos a analizar los que se comportan de manera proactiva, es decir, aquellos en los que de manera individual los nodos intentan establecer las rutas de encaminamiento provocando que cuando el nodo emisor lo solicite, tenga esas rutas disponibles de una manera más rápida. Algunos de los ejemplos de este tipo de protocolo que analizaremos son: [Clausen, 2003], [Ogier, 2004], [Park, 1997], [Caleffi, 2007] y [Lee, 2008, 2].

Más adelante nos centraremos en los basados en clusterización, con una muestra menor de protocolos ya que realmente existe un menor número de estos. Aún así nos va a servir para saber que son y cuáles son sus características generales. Podemos encontrar información detallada de cada uno de ellos en sus correspondientes referencias: [Santos, 2005] y [Blum, 2003]. Estos protocolos se basan en la división del área geográfica en celdas, asociando a los nodos a una celda concreta y nombrando a responsables dentro de la celda para realizar el tráfico intercelda y los handover desde unas celdas hacia otras.

A partir de ahí entraremos en el mundo del georouting: protocolos que se valen de la información geográfica (normalmente coordenadas GPS) que es aportada por dispositivos de localización, para localizar a otros nodos vehiculares o fijos y para saber finalmente hacia qué dirección deben enviar un paquete de datos para alcanzar al destino. Sobre los protocolos basados en localización podemos encontrar una información más extensa en: [Hou, 1986], [Basagni, 1998], [Vaidya, 2000], [Karp, 2000], [Lochert, 2003], [Hannes, 2004], [Liu, 2004], [Biswas, 2005], [LeBrun, 2005], [Lochert, 2005], [Naumov, 2006], [Liu, 2006], [Jerbi, 2007], [Lee, 2007], [Leontiadis, 2007], [Lee, 2008], [Cheng, 2008], [Schnauffer, 2008], [Koubek, 2008], [Nzouonta, 2008], [Lee, 2009] y [Oka, 2010].

Por último dentro de este capítulo hablaremos de los protocolos híbridos. Fundamentalmente aquí se han catalogado a los protocolos que utilizaban una estrategia reactiva bajo unas condiciones y una estrategia proactiva bajo otras condiciones. La información relativa a estos últimos la encontraremos en: [Pearlman, 1997], [Strutt, 2006], [Pandey, 2006] y [Lee, 2006].

Las aplicaciones fundamentales de estos protocolos están orientadas a comunicaciones end-to-end (vehicle-to-vehicle communications) bien sea entre dos nodos vehiculares en movimiento dispuestos a compartir información o bien entre un nodo vehicular y un elemento de la infraestructura vial situado cerca de la carretera, y que puede estar orientado a dar servicio de acceso a Internet o bien servicios informativos sobre la propia carretera, puntos peligrosos, radares., etc.

Parece importante reseñar que las clasificaciones que se han hecho son en base a una serie de criterios, y sobre todo para facilitar la asociación de cada protocolo a su categoría tratando de relacionarlos con los similares que existen. Pero bien es cierto que a medida que aumenta la complejidad del los protocolos, estos van incluyendo más funcionalidades para hacerlos más eficientes y eficaces, y que los propios diseñadores de protocolos más recientes, cogen ideas de

algunos algoritmos ya implementados, resultando al final en una difícil clasificación si tratamos de aislar unos protocolos de otros, ya que muchos tienen características comunes. Aún así y como se ha comentado anteriormente, se ha intentado encasillar a cada protocolo con los que pueda guardar una mayor relación. A partir de ahora se comenzará con la descripción por categorías de los algoritmos del primer capítulo, algoritmos unicast.

2.1 Protocolos Reactivos

Estos métodos de enrutamiento provienen fundamentalmente del algoritmo de Bellman-Ford y en su mayoría se fundamentan en él y en su *vector de distancias*. Tratan de conocer la topología de la red, para después buscar la ruta de menor coste mediante el método de búsqueda indirecta en el que el vector de distancias asociado a un nodo de una red, es un paquete de control que mantiene la distancia a los nodos de la red conocidos hasta el momento.

Cada nodo envía a sus vecinos las distancias que conoce y que le separan de sus otros vecinos, a través de este paquete de control. Los nodos vecinos examinan esta información y la comparan con la que ya tienen, actualizando su tabla de encaminamiento.

Su característica fundamental es que se ejecutan únicamente después de que se solicite la ruta por parte del emisor del paquete, reaccionando a la solicitud.

Como ventaja principal, no se produce ninguna sobrecarga en la red hasta que no se cursa la solicitud de ruta y se inicia el proceso de búsqueda, pero el problema fundamental es que cuando se solicita la ruta es porque ya se quiere enviar un paquete, de manera que hasta que no se determine la mejor ruta, habrá un retardo de tiempo para el envío del paquete.

Existen dos ramas de protocolos reactivos, los basados en AODV y los basados en DSR, que son a su vez dos protocolos que analizaremos a continuación. Primero nos centraremos en AODV y sus evoluciones y después nos centraremos en DSR y los posteriores desarrollos que se hicieron basándose en él.

Por un lado nos encontramos con los protocolos descendientes de AODV. Estos realizan una primera fase de descubrimiento y establecimiento de ruta, mediante la cual se almacena en el nodo origen y en los nodos intermedios el siguiente nodo hacia donde hay que reenviar para avanzar un salto en el camino hacia el destino. Durante la transmisión se realiza una consulta salto a salto en cada nodo intermedio para saber hacia dónde se dirige el paquete. Por otro lado se encuentran los que provienen de DSR. Al igual que AODV, primeramente se realiza una fase de descubrimiento y establecimiento de ruta, pero que solo en el caso de DSR y sus descendientes, la información de todos los nodos que hay que atravesar para alcanzar el destino viaja dentro del paquete, por lo que no hay que consultar en cada nodo hacia donde habrá que reenviar. De un primer vistazo ya se puede adivinar que los protocolos AODV tienen la pega de que en los nodos intermedios se necesita almacenar tantos enlaces entre nodos como rutas pasen por ese mismo nodo, y que en el caso de

DSR, como la información de la ruta viaja con el paquete, el tamaño del paquete tendrá que ser mayor y se perderá eficiencia en la transmisión del propio paquete. En común, tienen que ambas ramas han de restablecer su ruta de encaminamiento de nuevo si alguno de los enlaces desaparece.

2.1.1. AODV (Ad -hoc On-demand Distance Vector)

Para comenzar analizaremos este protocolo. Su autor e información avanzada la podremos encontrar siguiendo la referencia [Perkins, 2003]. A nivel general podremos decir que este algoritmo está basado en la topología de la red y que a su vez es reactivo. Además podemos decir que está diseñado para dar servicios unicast.

Este protocolo almacena en la fuente y los nodos intermedios, en una fase inicial de establecimiento de ruta, el siguiente salto hacia donde debe dirigirse un paquete de un flujo de datos concreto. La diferencia de este protocolo con respecto a otros “protocolos bajo demanda” (reactivos) es que AODV usa un número de secuencia de destino para determinar que el camino está actualizado. Con este número de secuencia se actualizarán las tablas de encaminamiento en los nodos intermedios dependiendo de si el número de secuencia es mayor al que tiene registrado el nodo. La ruta a seguir finalmente y como característica de AODV se irá consultando en las tablas de encaminamiento de cada router intermedio.

Evaluación

Una clara ventaja de este método es que no sobrecarga el circuito una vez que se ha establecido la ruta por no transportar información extra en los paquetes, la información de enrutamiento está ya en los nodos. Es un método sencillo pero eficaz para aprovechar el caudal eficaz de datos.

Por contra presenta varios problemas:

- El tiempo de establecimiento de ruta puede llegar a ser largo en función del tamaño de la red y una red VANET con continuos cambios topológicos implica necesidad de establecimientos rápidos.

-Los números de secuencia pueden dar lugar a rutas inconsistentes en algunos casos con redes de gran tamaño.

2.1.2. PRAODV y PRAODV-M

De este protocolo analizado a continuación diremos que se puede encontrar más información en [Namboodiri, 2004]. Sobre su tipología diremos que su funcionalidad se basa en la topología de la red, que es reactivo y está orientado a comunicaciones unicast valiéndose de la información de posición y velocidad de los nodos vecinos.

Entre sus características diremos que está basado en AODV [Perkins, 2003], Ad -hoc On-demand Distance Vector, anteriormente analizado. Es un protocolo diseñado para redes ad-hoc móviles con múltiples propósitos, en el cuál no se mantiene almacenada una ruta a menos que sea necesario. Esto ayuda a reducir sobrecargas, memoria almacenada sin uso y resulta útil en escenarios con poca afluencia de nodos. Para adaptarse al alto dinamismo de las VANET se realizan las dos modificaciones del protocolo. Namboodiri usó la velocidad y localización de los nodos para predecir el tiempo de vida del enlace. A partir de ahí PRAODV construye una ruta alternativa nueva antes de que se acabe el tiempo estimado.

PRAODV-M presenta una modificación más, y es que selecciona el camino con una predicción de tiempo de vida mayor en vez de seleccionar el camino más corto como hacían AODV y PRAODV. Sus simulaciones mostraron leves mejorías en cuanto al número de envío de paquetes.

Evaluación

PRAODV encuentra una ruta nueva antes de agotar el tiempo de vida del enlace mientras que AODV sigue utilizando el enlace hasta que ocurre un fallo. Es uno de los primeros protocolos en utilizar la posición y movimiento de los nodos para establecer el útil *tiempo de vida del enlace*.

PRAODV-M selecciona el camino con un tiempo de vida (según predicción) mayor, teniendo así un periodo mayor en el que recalcular la ruta en caso de fallo, y también más tiempo para transmitir datos con el enlace activo.

El concepto del PRAODV-M es muy interesante, pero ciertamente depende su eficacia

fuertemente de la exactitud del método de predicción. En un enrutamiento multisalto en el que intervienen varios vehículos, PRAODV estima la duración de los enlaces, pero el movimiento aleatorio de los coches según las decisiones de los conductores, la situación del tráfico y otros elementos pueden hacer que los *tiempos de vida de los enlaces* pierdan validez en un instante y por tanto el algoritmo pierda utilidad. Se podría combinar con un sistema de navegación que indicara, dependiendo de su destino, si la ruta que se va a seguir es la actual o si por el contrario el vehículo se va a desviar y además de algún parámetro que recogiera el navegador que indicara la tendencia del conductor a desviarse de la ruta indicada por el propio sistema de navegación. Estos elementos combinados pueden hacer que el *tiempo de vida del enlace* sea mucho más fiable.

Por ejemplo, PRAODV puede perder eficacia al encontrarnos un escenario con muchos nodos próximos (donde se seleccionará la ruta más corta) pero en el que los tiempos de vida de los enlaces sean pequeños por circular en sentidos opuestos los nodos.

2.1.3. AODV + PGB (Preferred Group Broadcasting)

Datos referentes a su autor e información más avanzada puede ser consultada siguiendo la referencia [Naumov, 2006]. En resumen, de él podemos decir que está clasificados dentro de los protocolos que trabajan basándose en la topología de la red y que está orientado comunicación unicast.

PGB es un mecanismo de broadcasting empleado para descubrimiento de rutas que permite reducir el número de mensajes que producirían sobrecarga, eliminando las transmisiones redundantes y obteniendo rutas estables con la habilidad de auto corrección.

Intenta corregir los problemas fundamentales de AODV: número de saltos elevado en distancias cortas y pérdidas de conexiones cuando la distancia de salto está próxima al rango alcanzable de transmisión.

Solo permite que ciertos nodos hagan rebroadcast de un “route request”. Esta restricción limita significativamente el número de posibles nodos intermedios y por lo tanto reduce la carga de enrutamiento. Cada nodo que recibe el broadcast se clasifica en 3 posibles grupos:

- PG (Preferred Group) - nodos preferidos
- IN group - nodos con un nivel de señal más alto que PG
- OUT group - nodos con un nivel de señal más débil que PG

En función de la señal con que le llega a un nodo el paquete se clasifica y toma un tiempo para decidir si retransmite o no. La estrategia a seguir para hacer el reenvío depende del grupo al que pertenezca. Finalmente el “route request” se transmite hasta el destino y la ruta se establece.

Evaluación

Como un aspecto positivo, en las pruebas realizadas [Naumov, 2006] consiguió que llegara la información a 8 veces más nodos que sin emplear PGB, lo cual es un cambio sustancial aún sin ser una simulación VANET.

PGB puede ser integrado en cualquier algoritmo de enrutamiento y está basado en broadcasting, por lo que hay que partir de que la sobrecarga inicial en el proceso de descubrimiento es alta.

En entornos VANET el número de nodos alcanzados está en torno a un 50% lo cual aún con PGB resulta una cifra muy pequeña para poder ofrecer servicios vehiculares.

2.1.4. CAR (Connectivity-Aware Routing in VANETs)

De nuevo hablaremos del mismo autor que en el anterior protocolo [Naumov, 2007] y siguiendo la referencia podemos encontrar más información extendida.

Dentro de su tipología diremos que utiliza el posicionamiento geográfico y que está orientado a unicast siendo de tipo reactivo y implementando a su vez AGB y PGB, heredado de AODV + PGB [Naumov, 2006].

CAR es un protocolo orientado a entornos urbanos e interurbanos, y una propiedad distintiva es

que el protocolo además de localizar la posición del destino, también encuentra caminos conectados entre la fuente y el destino. Estos caminos son autoajustados durante el envío del mensaje entre los distintos nodos sin un nuevo proceso de descubrimiento de ruta. Los denominados por el protocolo “guardas”, ayudan a dirigir el paquete a la actual posición del destino incluso si este se ha desplazado una distancia significativa desde su localización inicial.

Se divide en cuatro partes principales:

- Localización del destino y descubrimiento de ruta. Para ello se recurre a un “beaconing” adaptativo en función del inverso del número de nodos que haya. Además el protocolo introduce el “beaconing implícito”, según el cual se porta la información de los *beacon* dentro de algunos paquetes de datos. El número de paquetes en los que se introduce el *beacon* depende de la tasa de reenvío de datos que esté teniendo el nodo y siempre se intentará mantener una tasa de *beacon-implícitos* similar a la tasa normal de *beacons* que mantendría un vehículo. Por último, el descubrimiento de ruta, que se realiza gracias a la adaptación de PGB a CAR [Naumov, 2006] [AODV+PGB].
- Reenvío de paquetes por la ruta hallada.
- Mantenimiento del camino con ayuda de los denominados “guardas”. Consiste en un mecanismo de coordinación entre nodos, de manera que un nodo X que cambia de dirección informa a los nodos vecinos y así estos, cuando reciben un paquete dirigido a X pueden redirigir el paquete hacia una posición más actualizada, siendo esta una solución temporal, hasta que el nodo fuente reciba datos actualizados del destino
- Recuperación de errores. Si el algoritmo AGF que también implementa CAR falla en la búsqueda de la posición estimada del destino o no se puede encontrar el siguiente nodo hacia el destino, el nodo que detecta el problema informa a la fuente del error y empieza un proceso de descubrimiento de la localización del destino

Evaluación

El *beaconing* adaptativo reduce la sobrecarga sobretodo en áreas densamente pobladas al

mismo tiempo que no reduce la eficiencia en el enrutamiento. Buen concepto para redes VANET en entorno urbano.

Introduce el *beaconing implícito*, añadiendo a los paquetes de datos la información normal que se envía en los “HELLO beacons”, lo cual reduce el número de paquetes totales.

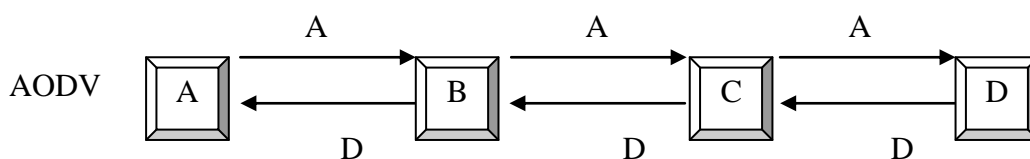
A pesar de la sobrecarga creada en la fase de descubrimiento por PGB [Naumov, 2006] las simulaciones realizadas por sus creadores demostraron que la tasa de paquetes que llegan al destino y el retardo medio mejoraron en ambos casos.

En situaciones de poca densidad de nodos, en la que los pocos guardas generados por el nodo destino (que cambió su dirección de desplazamiento) pueden irse de la zona por donde pasa el paquete y perdería entonces la efectividad del método de adaptación sobre la marcha del camino seguido por el paquete requiriendo entonces de una estrategia de recuperación nueva.

2.1.5. DYMO (DYnamic Manet On-demand protocol)

Para comenzar diremos, que se puede encontrar más información en la referencia siguiente [IETF’s MANET working group, 2010]. A nivel general se puede decir que está basado en la topología de la red y que está orientado comunicación unicast.

Basado en AODV [Perkins, 2003], en DYMO un nodo no recibe solamente información sobre un objetivo solicitado o un origen solicitante, sino que también recibirá información sobre todos los nodos intermedios del nuevo camino descubierto. Ahí reside la mayor diferencia entre los dos, en el almacenamiento de las rutas a cada nodo intermedio (Fig.1)



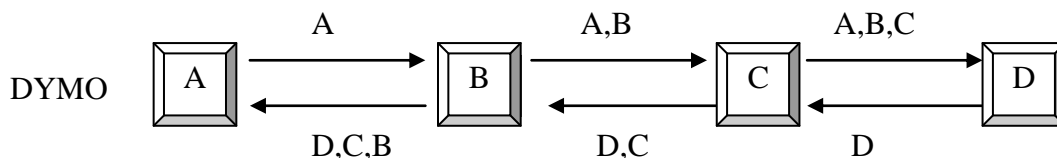


Fig.1 Diseminación de la información de enrutamiento en AODV y DYMO

DYMO básicamente realiza dos operaciones: descubrimiento de ruta y mantenimiento. Almacena solo la información de nodos activos, tanto fuente como destino. DYMO solamente utiliza enlaces bidireccionales.

Las simulaciones [Sommer, 2010] animan a pensar que una mejora importante podría consistir en una capa reactiva entre el nivel de red y de aplicación, que reaccionara al estado de la red y que de una forma sensible a los requerimientos de las aplicaciones de capas superiores se adaptaran a dicha situación de la red.

Evaluación

[Sommer, 2010] demostró mediante simulaciones que podía ser aplicable a VANETs con poca carga útil transportada, con una infraestructura fija en la vía, y que se mantenía de manera estable en el tiempo. Nos encontramos ante la evolución más moderna de AODV y que ha dado unos resultados aceptables.

Incluso con baja densidad de nodos fijos en la vía (puntos de acceso web), era suficiente para soportar pequeñas aplicaciones como la consulta de correo vía POP3.

Situaciones de alta densidad de nodos, por ejemplo micro-atascos, condujeron a un drástico aumento de la carga de la red. Cuando se alcanza esta situación y no se pueden establecer nuevas conexiones, los mecanismos de reintento simplemente congestionan aún más la red.

Las simulaciones de conducta del protocolo muestran como la “simple” inundación de mensajes a través de la VANET y la selección de rutas sin tener en cuenta la posición y el movimiento de los nodos parecen ser un derroche de recursos.

2.1.6. DSR (Dynamic Source Routing)

Siguiendo las referencias [Maltz, 1996] [Maltz, 1998] podemos encontrar más datos relativos al protocolo y a sus autores. Sobre el algoritmo diremos que está basado en la topología de la red y que a su vez es reactivo. Además está orientado a unicast y es uno de los protocolos precursores en redes móviles.

Similar a AODV [Perkins, 2003], en cuanto a que es reactivo, y construye la ruta bajo demanda, sin embargo se usa una ruta que se busca desde el nodo inicial que envía el paquete, durante una fase de establecimiento, en lugar de consultar a todos los nodos intermedios en su correspondiente tabla de encaminamiento.

Para determinar las rutas desde la fuente se van acumulando las direcciones de cada dispositivo entre la fuente y el destino. La información acumulada del camino encontrado se utiliza para enrutar los paquetes. Los paquetes llevan la dirección de cada nodo que atraviesan. Esto último provoca una alta sobrecarga, sobre todo con direcciones largas (IPv6). Existe una configuración de DSR que permite el enrutamiento de paquetes salto a salto evitando así almacenar las direcciones.

Evaluación

Un aspecto positivo es que es un protocolo básico y simple, útil para hardware básico con el requerimiento de memoria de almacenamiento de ruta en el nodo inicial pero no en los nodos intermedios en contraposición a AODV.

Es uno de los primeros protocolos, y utiliza un algoritmo muy sencillo, aunque luego se han hecho múltiples evoluciones (DSRFLOW) con un mejor rendimiento.

La simplicidad del protocolo implica una gran sobrecarga en cada paquete de datos de enrutamiento ya que han de portar la ruta completa, disminuyendo así la eficiencia de los datos transmitidos. Es evitable con la configuración antes comentada en la descripción del protocolo.

Finalmente por su simplicidad y poca adaptación, nos es de poca utilidad para redes VANET porque al ser reactivo y tener que hallar un nuevo camino cada vez que la red se modifica topológicamente, estaríamos ante constantes restablecimientos de ruta cuando el camino sea medianamente largo.

2.1.7. DNVR (Dynamic Nix-Vector Routing)

La siguiente referencia [Lee, 2005], contiene información avanzada sobre el protocolo en cuestión. Además podemos decir a modo de resumen que DNVR es un protocolo reactivo, que realiza un enrutamiento basado en la topología de la red y que está orientado a comunicación unicast, con origen en DSR.

Se basa en el concepto *Nix-Vector* [Riley, 2001] que originalmente fue desarrollado para redes cableadas. Define el NV, una secuencia de valores Nix de 4bit y un campo con un índice de vecinos de longitud variable.

DNVR valida las rutas almacenadas además de que también detecta una topología de red actualizada durante la fase de descubrimiento mediante el envío de un paquete unicast sonda. Para dar cabida a redes de alta movilidad los estados de enrutamiento se eliminan y se adopta un descubrimiento de rutas conservador de manera que se suprimen solicitudes de ruta en algunos casos y así solo se mantienen unas pocas rutas por destino. Además se persigue la eficiencia del ancho de banda y para ello se usa un *índice de vecino (Neighbour index o Nix)* y direcciones MAC para enrutamiento de manera que se elimine la necesidad de protocolos de resolución de direcciones. Los encabezamientos compactos de los paquetes NV dan lugar a una reducción en la sobrecarga debido al enrutamiento desde la fuente. DNVR alcanza rutas libres de bucles y las mantiene según necesidades.

Evaluación

Las simulaciones se realizaron con movilidad de nodos de entre 1 y 20 m/s, lo cual es una medida bastante aceptable para las simulaciones que se suelen realizar y se puede considerar un buen rendimiento.

Gracias a los *Nix* se reduce la sobrecarga de enrutamiento producida en otros protocolos (DSR) por almacenar todas las direcciones completas de los nodos intermedios en el encabezamiento del paquete, siendo almacenado en DNVR únicamente los Nix y mejorando la eficiencia del ancho de banda empleado.

Aún así, los resultados ofrecidos por los autores [Lee, 2005] se han comparado porcentualmente con DSR, un protocolo bastante antiguo. Para evaluar su rendimiento real habría

que compararlo con alguno más actual, ya que tenemos que tener en cuenta que el tiempo de reacción es superior a otros protocolos reactivos porque después de que descubre la ruta de manera reactiva, la confirma antes de usarla.

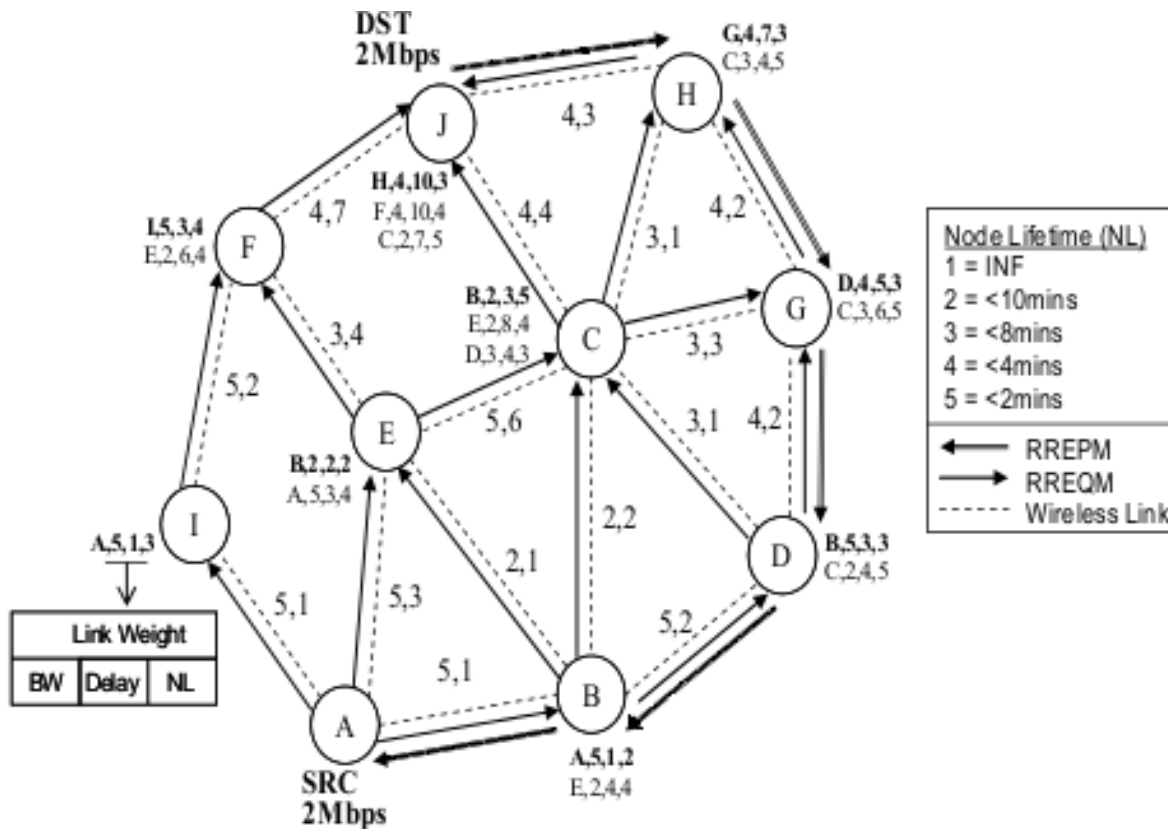
Se validan las rutas encontradas antes de utilizarlas, lo que en conclusión resulta positivo de cara a la eficacia del enrutamiento pero genera retardos. Esos retardos en parte se pueden compensar porque los autores proponen utilizar direcciones MAC directamente para las tablas de encaminamiento, de manera que se eliminan los protocolos de resolución de direcciones.

2.1.8. OLDW (On-Demand Link Weight protocol)

En este caso decimos que el protocolo es de tipo reactivo, y que elige la ruta dependiendo de la calidad de los enlaces. Además está orientado a unicast. Para información más avanzada de la que a continuación se dará podemos buscar en la siguiente referencia [Khwildi, 2007]

OLDW es un protocolo que funciona bajo demanda y selecciona el mejor camino basándose en parámetros del peso de los enlaces (ancho de banda disponible, retardo, tiempo de vida del nodo...). En él se encuentra la mejor ruta con un cierto nivel de QoS (calidad de servicio) mediante un mensaje de solicitud de ruta y su correspondiente mensaje de respuesta.

Los mensajes de solicitud de ruta solo se reenvían a los nodos que cumplan las características de QoS. En los mensajes se incluye la información de QoS solicitada para que todos los nodos intermedios la conozcan. Se pretende que sirva de utilidad en futuras redes 4G y dé soporte a servicios multimedia en tiempo real que requieren unas características mínimas en todo momento.



Evaluación

La utilidad que se le quiere dar al protocolo para futuras aplicaciones de tiempo real es un objetivo ambicioso, pero a su vez su necesidad es palpable y real hoy en día.

Las simulaciones con respecto a DSR y OLSR muestran mejoras en los retardos totales de envío y reducciones en el número de paquetes perdidos.

También hay que añadir que estas mismas simulaciones realizadas son muy pobres y se han tomado nodos con movilidad nula, lo cual desestima la posibilidad de ver a ODLW como un protocolo útil hasta que no podamos evaluar la movilidad al menos reducida de los nodos.

Otro motivo que da importancia a la velocidad en la simulación, sería evaluar si la QoS (principal argumento del protocolo) se mantiene válida con la constante reestructuración de la red y evaluar el impacto a distintas velocidades.

2.1.9. RSRP (Robust Secure Routing Protocol)

Para encontrar información adicional a la que se expondrá a continuación, se puede acudir a la referencia siguiente, [Afzal, 2008]. Brevemente diremos de él, que es un protocolo que enruta basándose en la topología de la red y que está encasillado dentro de los de tipo reactivo.

El presente es un protocolo basado en DSR [Maltz, 1996] [Maltz, 1998] y que a su vez también es. RSRP intenta lidiar con el problema de que la eficiencia de los protocolos reactivos depende fuertemente de la inocencia de los nodos participantes y la posibilidad de que existan nodos maliciosos no se debe obviar.

A diferencia de otros protocolos seguros basados en DSR como “Ariadne”, no requiere autenticación mediante firma digital (TESLA [Perrig, 2001]) sino autenticación por broadcast mediante PARM [Lin, 2006], el cual permite a los nodos intermedios autenticar instantáneamente a la fuente de un mensaje que se está enviando por broadcast. PARM es un método de autenticación ligero resistente a los “pollution attack” y que está diseñado para evitar ataques de DoS, además de que evita el retardo inherente en el método TESLA que se produce durante la revelación de claves.

Evaluación

Aporta un nivel de seguridad para prevenir problemas que la mayoría de protocolos ni siquiera tiene en cuenta, aunque a nivel de enrutamiento no incorpora mejoras.

Para el principal argumento del protocolo, la seguridad, se asume que todos los nodos se comunican bidireccionalmente entre ellos, lo cual no sería posible en redes VANET, debido a la lejanía que va a existir entre nodos y a la gran cantidad de nodos existentes.

Además se asume que existe un único elemento instalado que predistribuye claves para cada par de nodos en la red. A priori, tampoco sería viable en VANET por la ingente cantidad de claves necesarias.

Faltan resultados de simulación aportados por los autores para comprobar resultados de rendimiento ya que básicamente está basado en DSR, el cuál es un protocolo antiguo.

CONCLUSIONES

Para terminar con los protocolos reactivos y aunque al final del documento los analizaremos en conjunto y destacaremos aspectos importantes, individuales y en mayor profundidad de los algoritmos destacados, diremos que en conjunto es el segundo grupo de protocolos que al parecer arroja unos mejores resultados por detrás del grupo de los *basados en localización geográfica*. La cualidad reactiva que les hace reaccionar a una solicitud de ruta “bajo demanda” parece ser bastante más eficiente que la de sus rivales directos, los protocolos proactivos, ya que una característica innata y muy determinante de estos últimos es que mantienen una constante sobrecarga de la red aún cuando no se está transmitiendo. Este factor resulta ser muy determinante en una red tan cambiante como la vehicular, en la que la sobrecarga proactiva termina siendo un lastre.

Los protocolos se han analizado en dos ramas, los que descienden de AODV y los que descienden de DSR. De la primera rama destacaremos a PRAODV y PRAODV-M, CAR y DYMO, y de la segunda rama a DNVR.

En PRAODV y PRAODV-M los nodos informan a los vecinos de su velocidad de desplazamiento y esta información se utiliza en los vecinos para hallar el tiempo estimado de vida del enlace. Esa información es muy útil a la hora de elegir el mejor enlace de comunicación hacia un destino que aporte un mayor tiempo de validez y minimice así la sobrecarga de control y establecimiento de nuevos enlaces. Esta mejora se trata de un paquete “beacon mejorado”, a la que se podría sumar la aportación de CAR, realizando un *beaconing adaptativo* en el que la frecuencia de envío de estos paquetes “beacon” es inversamente proporcional al número de nodos existentes alrededor del nodo que está haciendo el *beaconing adaptativo*.

Por último y con respecto a DYMO decir que en los nodos intermedios de una ruta, también se almacena la propia ruta, de forma que se establece un camino bidireccional. De esta forma y mediante únicamente un recurso como es el almacenamiento (es uno de los recursos más económicos que existen), conseguimos que la ruta pase a ser bidireccional, evitándonos una posterior búsqueda de ruta para el sentido contrario, siendo el caso de muchas comunicaciones actuales el de la transmisión bidireccional.

En la otra rama que señalábamos queríamos dejar constancia de DNVR. En él se asigna a cada nodo un identificador de longitud variable, pero en cualquier caso una longitud pequeña. A

partir de ahí a cada paquete se le puede asignar su ruta mediante un “vector de identificadores”, con el objetivo de aumentar la eficiencia de la información transmitida, reduciendo la cantidad de datos de control enviados. Esta mejora no es aplicable a los protocolos que descienden de AODV ya que en ellos, no se porta la información de ruta en los paquetes, sino que se almacena salto a salto en cada nodo intermedio.

Señalar también, que todo lo que se ha probado con simulación, ha sido en redes relativamente pequeñas, por lo que cabe pensar que para abarcar zonas más extensas se requiera de la ayuda de una infraestructura hardware vial que sirviera de interconexión entre distintas áreas, ya que por sí solos, los reactivos tienen por el momento sus limitaciones.

2.2 Protocolos Proactivos

Su característica fundamental es que se ejecutan continuamente (de manera proactiva) realizando constantes actualizaciones de los datos de enrutamiento en cada nodo para así poder conocer la topología general de la red y los costes asociados a los distintos enlaces y que a partir de estos datos, se pueda obtener el árbol y la tabla de encaminamiento tras aplicar el algoritmo de coste mínimo (algoritmo de Dijkstra) al grafo de la red.

Como ventaja al estar realizando un trabajo proactivo, cuando se solicita una ruta de encaminamiento desde un nodo origen, se obtiene casi de inmediato el resultado, pudiendo transmitir con muy poco retardo, pero por contraposición la red sufre una constante sobrecarga para actualizar la información de los nodos y enlaces constantemente cambiantes, aún cuando no se esté utilizando la red.

TORA [Clausen, 2003], TBRPF [Ogier, 2004] y OLSR [Park, 1997] son los tres primeros algoritmos estudiados. Algoritmos que dependen fuertemente del algoritmo de Dijkstra y de que la valoración del peso de los enlaces entre dos nodos sea la mejor posible.

A partir de estos los esfuerzos por los protocolos se centran en reducir la sobrecarga introducida en la red por el algoritmo que por su naturaleza proactiva se encuentra constantemente

tratando de mantener una red estable que cambia continuamente.

Por un lado analizamos el protocolo ATR [Caleffi, 2007] que centra sus esfuerzos en simplificar la topología de la red con estructuras en árbol arraigadas desde cada nodo, es decir grafos acíclicos (sin bucles) y con el propio nodo como nodo raíz.

LOUVRE [Lee, 2008, 2] es el protocolo que aporta una idea más novedosa dentro de los proactivos y que también se usa como concepto en protocolos basados en localización geográfica. La idea fundamental es crear en un entorno urbano una red superpuesta a la red real vehicular, de manera que si la densidad de los nodos vehiculares lo permite, se crean enlaces superpuestos a los reales entre los propios vehículos. Los nodos de esta red superpuesta serían llamados hitos y se sitúan en los cruces de vías urbanas. Este concepto de situar nodos de la red “virtual” que permanecen fijos a lo largo del tiempo (por estar asociados a un cruce, que es constante) es el que se emplea también en el georouting.

Así pues pasaremos a analizar los algoritmos encasillados como de tipo proactivo.

2.2.1. OLSR (Optimized Link State Routing)

Sobre el protocolo comentaremos brevemente que el algoritmo es proactivo y que está orientado a comunicaciones unicast. Para encontrar más información, consultar [Clausen, 2003].

Encaja bien en redes extensas y densamente pobladas por nodos móviles. Cuanto más grande y densa es la red, más optimización se puede alcanzar comparándola con el algoritmo clásico de los estados de los enlaces (OSPF, basado en Dijkstra).

OLSR usa un enrutamiento salto a salto en el que cada nodo usa su información local para enrutar paquetes, es decir las decisiones de encaminamiento se toman en cada nodo intermedio. Además encaja bien en redes donde el tráfico es arbitrario y esporádico entre una gran cantidad de nodos, en vez de redes con grupos exclusivos con pocos nodos.

La principal ventaja frente a los algoritmos proactivos clásicos (de estado de enlace) es que a pesar de heredar la estabilidad de estos y tener las rutas necesarias inmediatamente gracias a su naturaleza proactiva, reduce significativamente la sobrecarga producida por los mensajes de control

ya que estos mensajes solo se enviarán desde un número concreto de nodos llamados MPRs. Esta reducción se debe a que únicamente los MPRs enviarán la información del estado de los enlaces a los nodos que elijan dicho MPR, en lugar de intercambiarse toda la información entre todos los nodos.

Evaluación

Según las simulaciones realizadas se reduce la sobrecarga en gran medida con respecto a los protocolos proactivos clásicos en redes densas y extensas. En redes con pocos nodos el rendimiento se asemeja a redes proactivas clásicas.

El encaminamiento salto a salto se produce con la información previamente recolectada por el nodo.

Como suele pasar en cualquier red, al centralizar la información en un punto para descongestionar a los demás nodos, sucede que los MPRs pueden llegar a ser un “cuello de botella” en situaciones de alta densidad de nodos y frecuentes desconexiones de enlaces, ya que en ellos se maneja mucha información de control para establecer y restablecer rutas estables, lo que podría llevar por lo menos a retardos en el establecimiento de rutas.

2.2.2. TBRPF (Topology dissemination Based on Reverse Path Forwarding)

Para obtener más datos sobre sus autores e información más avanzada que la expuesta a continuación se puede consultar la siguiente referencia [Ogier, 2004]. De la tipología del protocolo diremos brevemente que es un algoritmo proactivo, basado en los protocolos de estado de enlace.

Entre sus características diremos que proporciona un enrutamiento salto a salto a través del camino más corto a cada destino. Cada nodo en el que corre TBRPF genera un árbol fuente (aportando caminos a todos los nodos alcanzables) basándose en información topológica parcial almacenada en su tabla de topología, usando una modificación del algoritmo de Dijkstra. Para minimizar la sobrecarga, cada nodo informa a los demás nodos vecinos de una parte de su árbol

fuente. TBRPF usa una combinación de actualizaciones periódicas y diferenciales para mantener a todos los vecinos informados de la parte que se modifica de su árbol fuente. Cada nodo también tiene la opción de mostrar información topológica adicional (hasta toda la existente) para proporcionar una robustez mejorada en redes con una alta movilidad.

TBRPF ejecuta el descubrimiento de sus vecinos usando mensajes “hello” diferenciales los cuales informan solo de cambios en el estado de los vecinos. Esto resulta al final en que los mensajes “hello” son mucho más pequeños que otros mensajes de otros protocolos de enrutamiento de estado de enlace como OSPF.

Evaluación

Se reduce de forma significativa la cantidad de información enviada de manera proactiva con respecto a algoritmos clásicos, pero la opción que ofrece de mostrar información topológica adicional para proporcionar robustez en redes con alta movilidad implica perder las mejoras obtenidas con la parte diferencial del algoritmo. Es decir, la gran idea de mostrar información topológica a los nodos vecinos de manera diferencial no sirve de nada si para redes que tienen gran movilidad como las VANET, al final enviamos toda la información topológica a los vecinos olvidándonos de la forma diferencial.

El almacenamiento de los caminos a todos los nodos alcanzables en un entorno densamente poblado puede necesitar de una buena capacidad de almacenamiento, aunque bien es cierto que cada vez es un problema menor por la disminución de la relación “precio/byte de memoria.”

Un nodo que llega a una zona con multitud de nodos tiene que intercambiar información con todos ellos, ya que aunque sea información diferencial, previamente no conocía nada de ellos, produciéndose un periodo en el que hay mucho tráfico de paquetes de control. El método diferencial hace efecto una vez que se alcanza cierta estabilidad y los cambios son menores.

2.2.3. TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm)

Comentaremos rápidamente sobre la tipología del protocolo que el enrutamiento que se realiza está basado en la topología de la red y es orientado a unicast. Se considera proactivo, grupo en el que lo hemos clasificado. Para buscar información avanzada sobre el protocolo y sus autores consultar la siguiente referencia, [Park, 1997].

Pertenece a la familia de algoritmos de enrutamiento, que funciona según el estado de los enlaces, yendo hacia atrás y donde un grafo dirigido hacia el destino y acíclico (DAG) construirá después en cada nodo, un árbol arraigado desde sí mismo (árbol simple, sin bucles) basándose en la altura del grafo acíclico dirigido. El DAG maneja el flujo de paquetes y se asegura de la alcanzabilidad de todos los nodos. Cuando un nodo tiene que mandar un paquete, hace broadcast del paquete. Su vecino solo lo reenviará mediante broadcast si él es el siguiente nodo del grafo DAG.

Un nodo construirá su grafo dirigido haciendo broadcast de un paquete de solicitud *query packet*. El nodo que recibe uno de estos paquetes, hará broadcast de un paquete de respuesta *reply packet* si tiene un enlace directo con el destino según su grafo y si no simplemente tirará el *query packet*. Cuando un nodo recibe el *reply packet* actualizará su altura solo si la altura del *reply packet* es la menor de todas las alturas de todos los *reply packets* que haya recibido desde esa distancia.

Evaluación

La ejecución del algoritmo da una ruta a todos los nodos de la red, permitiendo una conectividad total. Además tiene un reducido número de mensajes de control de largo alcance a nodos colindantes cuando la red es pequeña, ya que únicamente los nodos que se encuentren en el árbol simple, harán caso a los *query packet*.

Combina una pequeña búsqueda de rutas proactiva, con un envío de paquetes posterior según un “broadcast selectivo” en el que las retransmisiones se hacen o no, según si el nodo que recibe el paquete y tiene capacidad de reenviar tiene en su DAG al nodo previo o no.

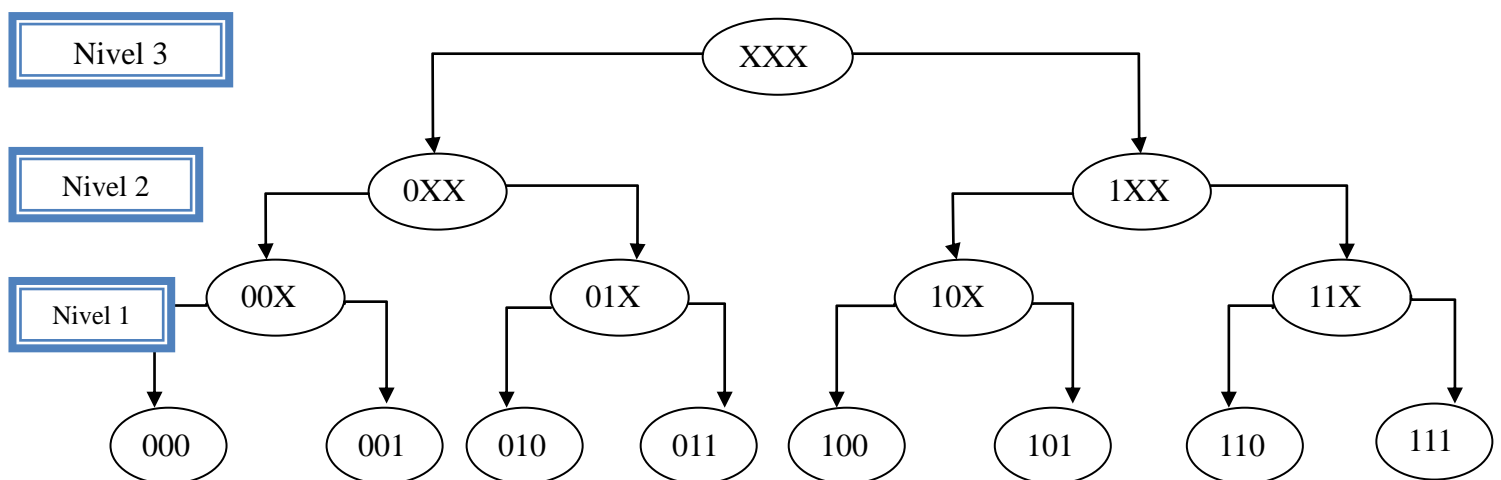
Como provee rutas a todos los nodos de la red, el mantenimiento de estas rutas puede ser muy pesado para la red, sobretodo en redes especialmente dinámicas como las VANETs.

2.2.4. ATR (Augmented Tree-based Routing Protocol for Scalable AdHoc Networks)

Dejaremos como referencia inicial [Caleffi, 2007], para búsqueda de información adicional sobre el protocolo, además de información sobre el autor. De forma breve y básica comentaremos que el protocolo es de tipo proactivo y orientado a unicast.

ATR fue diseñado como un protocolo cuya principal característica es la escalabilidad y para ello se diseña una estructura en forma de árbol que además aporta resistencia frente a fallos por movilidad, congestión e inestabilidad de la red. ATR no utiliza la idea (habitual en muchos protocolos) de que la identidad del nodo es igual a la dirección del nodo, desacoplando esas ideas de identificación y de localización mediante las “Distributed Hash Tables” (DHT's) que son usadas para distribuir la información de localización por toda la red. La información almacenada en las tablas refleja la posición del nodo dentro de la red, pero ATR aumenta la información almacenada en las tablas con datos obtenidos del “proceso de descubrimiento de vecinos” subyacente, y así, el rico conocimiento de la topología permite recurrir al enrutamiento multicamino, ya que la información extra almacenada consiste en todas las rutas alternativas disponibles que se pudieron encontrar durante el proceso proactivo de descubrimiento de rutas.

La estructura propuesta toma su origen del protocolo DART [Eriksson, 2007], y esa estructura del espacio de direccionamiento puede ser representada como un árbol binario de $x+1$ niveles, siendo x el número de bits utilizados para direccionar. Según la estructura propuesta, los nodos cuyos prefijos de las direcciones se compartan con otros nodos, estarán formando un subgrafo conectado. En concreto cuanto más prefijo compartan dos nodos, más cerca estarán topológicamente.



Hay 4 procesos primarios en ATR. El *address allocation process* se encarga de seleccionar una dirección de red que refleje la posición topológica del nodo dentro de la red, y el *address lookup process* que proporciona el mapeado entre los identificadores únicos de nodo, usados por los capas superiores y la dirección transitoria de red usada por los procesos *path discovery* y *packet forwarding*. Este ultimo usa los paquetes emitidos mediante broadcast “hello packets” para construir y actualizar las tablas de encaminamiento.

Evaluación

Al tener almacenados varios caminos en los nodos intermedios, si uno de ellos falla, rápidamente se acude a otro camino de los almacenados para reintentar el reenvío del paquete.

Consigue solventar su principal objetivo, la escalabilidad, mejorando a protocolos anteriores proactivos como DART [Eriksson, 2007]

Las simulaciones realizadas no sirven de referencia para saber si serán útiles en redes VANET, ya que utiliza un modelo de velocidad de nodos de entre 0.5 y 5 m/s de velocidad, lo cual no refleja en absoluto movilidad vehicular y siendo un protocolo proactivo la importancia de la velocidad y la sobrecarga de la red asociada a esa velocidad es muy importante.

Según crece la cantidad de nodos, aumentan de manera importante los requerimientos de memoria aunque el almacenamiento es cada vez menos un problema por la constante disminución del coste.

Debido a su naturaleza proactiva y a que no aborda en absoluto los problemas en entornos urbanos como existencia de obstáculos, es muy probable que en VANETs dentro de una ciudad tenga un mal rendimiento.

2.2.5. LOUVRE (Landmark Overlays for Urban Vehicular Routing Environments)

De forma sintetizada comenzaremos diciendo que para obtener más información sobre el protocolo podemos acudir a su referencia, [Lee, 2008, 2], donde también encontraremos información sobre sus autores. Como características generales diremos que el protocolo está basado en enrutamiento geográfico de tipo proactivo.

LOUVRE crea una red de hitos superpuestos sobre una topología urbana determinada. Los cruces urbanos se definen como nodos superpuestos y se crea un enlace superpuesto entre dos de estos nodos, sí y solo sí la densidad de tráfico de la red situada por debajo garantiza el enrutamiento vehicular multisalto entre dos nodos superpuestos (cruces). Louvre contiene un esquema distribuido de estimación de la densidad de tráfico que se usa para evaluar la posible existencia de uno de los enlaces superpuestos.

El argumento principal de LOUVRE es que utiliza como base una red superpuesta y estable con un número de nodos menor que el número de vehículos, por lo que hace más factible un protocolo proactivo ya que requeriría menos sobrecarga para mantener actualizados los nodos superpuestos. Además al ser estable, los enlaces superpuestos permanecen conectados a pesar de la distribución espacio-temporal de los vehículos en el enlace.

Las características principales son: los hitos se colocan en la intersecciones; la densidad vehicular entre hitos se estima de manera distribuida; basándose en la estimación del tráfico se crea la red superpuesta; los mejores caminos desde y hasta cualquier hito situado en la misma celda de la red se mantienen para enrutamiento local; para enrutamiento remoto los paquetes son enrutados hacia la celda vecina más apropiada. Un vehículo accede a su tabla de enrutamiento y sigue los hitos a través de caminos conectados entre intersecciones hasta el destino. Como los enlaces superpuestos existen solo si el tráfico es suficiente para un enrutamiento “greedy” [Karp, 2000] hasta el siguiente hito, se reducen las posibilidades de caer en un *local maximum*.

La estimación del tráfico se calcula y distribuye con un protocolo P2P en el que cada nodo hace broadcasting de los identificadores de sus vecinos y de la densidad de tráfico en todas las carreteras que tenga al alcance, basándose en el número de vecinos que detecte en cada calzada.

Para localizar a un nodo destino se usa el Location Service. El algoritmo usado para este protocolo

proactivo es Dijkstra, en el que cada elemento que se usa para calcular la ruta es un segmento de carretera entre dos cruces, en vez de un enlace directo entre coches. Esto se hace para ganar en escalabilidad. Aún así cuando se trata de un mapa urbano grande el número de carreteras crece por lo que se divide la red en celdas y la comunicación entre ellas se realiza a través de nodos frontera que almacenan los enlaces superpuestos de las dos celdas entre las que se encuentra.

Evaluación

La estimación del tráfico y la colocación de hitos superpuestos en función de la densidad de ese tráfico estimado son nuevos datos que incorpora como innovación este protocolo y que si se estiman de forma adecuada pueden ser muy útiles para el enrutamiento. Además la división en celdas del entorno urbano favorece la escalabilidad y la simplicidad de la red dividiendo las comunicaciones en dos: internas a la celda y externas.

El sistema de navegación puede proporcionar la topología de la calzada a cualquier nodo dando su localización y LOUVRE se aprovecha de esta información de las calles para la gestión de la red superpuesta. Se disminuye en gran medida la sobrecarga de control en cada nodo pero se genera una sobrecarga para controlar la red superpuesta y que los nodos conozcan su estado.

LOUVRE asume que todos los nodos conocen constantemente su posición y la hora global gracias a un GPS así que en largos túneles podría no funcionar salvo que cuando se pierda la señal se mantenga por algún algoritmo que tuviera en cuenta el desplazamiento del vehículo y recalculase la posición GPS.

CONCLUSIONES

Para terminar con los protocolos proactivos y aunque luego se tratarán de nuevo en las conclusiones finales, decir que son los protocolos menos esperanzadores. Sus características innatas chocan con las de las redes VANET. El principal aspecto en este disyuntiva es el de la sobrecarga proactiva que arrojan a la red constantemente estos protocolos, que choca con la alta movilidad vehicular, el continuo restablecimiento de rutas y que el tráfico de control ha de estar sumamente restringido, y un protocolo proactivo incluso sin intención de transmitir inyecta una sobrecarga de control a la red. Entre las soluciones interesantes aportadas por estos protocolos se encuentra la de la difusión de información de control a los vecinos de manera diferencial TBRPF [Ogier, 2004],

evitando enviar los mismos datos repetidamente cuando no sea necesario. Otros protocolos como LOUVRE tratan de reducir la información de control, simplificando la complejidad topológica de la red. Para ello implementan una red superpuesta a la real y simplificada (con un subconjunto de nodos) dentro de la que se realizan la mayoría del tráfico de control. Es en esta red en la que se apoya la red real para transmitir posteriormente.

En conjunto creo que la utilidad de estos algoritmos se ve reducida a redes sumamente pequeñas que generen poco tráfico de control que a su vez resulte eficiente y que la propia red lo pueda soportar y actualizar constantemente. Pero este tamaño de red no se va a dar en entornos VANET reales como tal (vehículos circulando por vías urbanas e interurbanas). Como idea de entornos en los que creo que podría ser útil el “pro activismo”, en primer lugar, en el interior de garajes de centros comerciales, donde solo un pequeño porcentaje de los vehículos está en marcha, en movimiento y a una velocidad reducida. En segundo lugar diría que los protocolos proactivos podrían establecer las comunicaciones internas dentro de una celda (no las externas con otras celdas) en protocolos como los que siguen a continuación, los basados en clusterización.

2.3 Protocolos basados en clusterización.

Estos algoritmos tratan de disminuir la información que tiene que conocer cada nodo de toda la red. Para ello se divide el espacio geográfico en zonas, sectores o *clusters* y en cada uno de ellos se nombra un “representante” del *cluster*.

El representante del *cluster* realiza algunas de las funciones de los demás nodos de su *cluster* como por ejemplo la comunicación con el exterior del *cluster*, centralizando la información en ellos, de manera que solo sean estos representantes los que deban conocer la topología global de la red reduciendo en gran medida la sobrecarga que introducían los demás nodos y que ahora no deben saber de topología global, y en su mayoría solo se dedican a comunicaciones dentro del *cluster*.

Los representantes del *cluster* son a su vez los encargados de formar las celdas, designando a sus miembros, realizando los handover de sus integrantes entre celdas comunicándose con otros representantes y en última instancia tratando de maximizar el tiempo de vida de la celda para minimizar la sobrecarga de control necesaria para establecer y mantener la celda. De ahí la importancia del protocolo de enrutamiento empleado y de la metodología que emplee este.

El primer protocolo que tomaremos como referencia se trata de COIN y podemos encontrar información más detallada en [Blum, 2003]. Después pasaremos a analizar LORA_CBF [Santos, 2005].

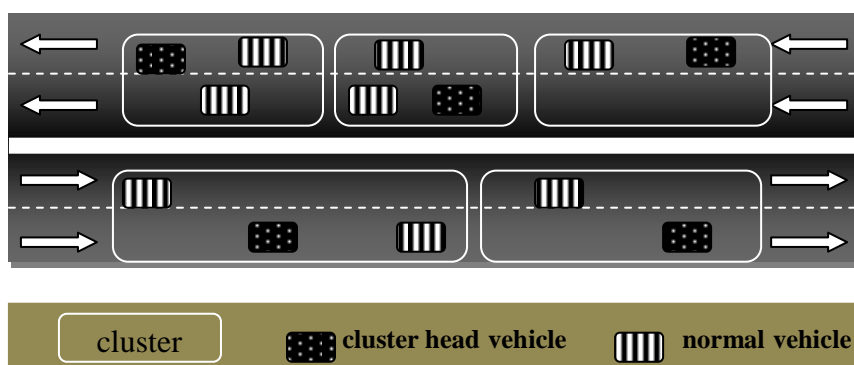
Entre las conclusiones que sacamos desde un principio, podemos decir que el número de protocolos existentes en este campo es menor al de los demás. Por un lado puede ser consecuencia directa de que los ya implementados no consiguen buenos resultados en simulaciones reales, ya que los representantes de cada celda acaban siendo cuellos de botella de la red, para mantener activas las celdas y el alto dinamismo del entorno VANET y el movimiento vehicular que oscila de manera natural, son contrarios por naturaleza a esa estructuración fija y jerárquica.

2.3.1. COIN (Clustering for Open IVC Networks)

A modo resumen y como características generales diremos del protocolo que está basado en la clusterización de la red y está orientado a unicast. Además diremos que COIN busca la ruta adecuada de manera reactiva. Para información más avanzada que la que se expondrá a continuación se puede acudir a la siguiente referencia [Blum, 2003].

Cada *cluster* tiene un representante *cluster head* que es responsable de la coordinación intra e inter-*clusters* y de la administración de las funciones de la red con los demás representantes. Los nodos de un *cluster* se comunican entre sí, pero para la comunicación entre nodos de distintos *cluster* se tiene que recurrir al representante del *cluster*.

La elección del representante se basa en el dinamismo de los vehículos y las intenciones de los conductores, en vez de basarse en la movilidad relativa como ocurre en los métodos clásicos de *clusters*, en los que se observa un menor tiempo de vida en cada *cluster*. Este algoritmo también actúa acomodando la oscilación natural de distancias entre vehículos.



Evaluación

Se demostró mediante simulaciones [Blum, 2003] que COIN produce estructuras estables en redes VANET. Los representantes buscan la ruta adecuada de manera reactiva.

Se incrementa en un 192% el tiempo de vida de los *clusters* frente a antiguos métodos de clusterización no pensados para movilidad y se reduce el cambio de usuarios de *cluster* en un 46% con respecto a algoritmos clásicos.

Se introduce una pequeña sobrecarga adicional por su mayor complejidad para poder aumentar los tiempos de vida de los *clusters* y además en circunstancias en las que todos los nodos

del *cluster* quieran una alta velocidad efectiva, el representante puede ser un “cuello de botella” para la información.

2.3.2. LORA_CBF (LOCATION ROUTING ALGORITHM WITH CLUSTER-BASED FLOODING)

Dejaremos presente como referencia relativa a LORA_CBF, [Santos, 2005]. Brevemente comentaremos como características generales que el protocolo está orientado a unicast, su enrutamiento se basa en la inundación de la red dividiéndola en *clústeres* y usando la información de posicionamiento geográfico, siendo un algoritmo reactivo y jerárquico.

En este algoritmo cada nodo puede ser un *clúster-head*, un *gateway* o un miembro normal del *cluster*. Si un nodo está conectado a más de un *cluster* se denomina *gateway*. El *clúster-head* mantiene información sobre sus miembros y gateways. Los paquetes son enviados con un mecanismo similar al “greedy” [Karp, 2000]. Si no se localiza el destino, se envía un paquete denominado *location request* (LREQ), de manera similar a la fase de descubrimiento de ruta AODV, pero solo los *cluster-head* y los *gateways* diseminarán los LREQ (*location request*) y LREP (*location reply*).

Para evitar la sincronización de transmisiones y su consecuente colisión de paquetes, el reenvío de paquetes se retarda aleatoriamente [Jacquet, 2002][Floyd, 1994].

Con la ayuda de su algoritmo de predicción puede estimar la posición de un vehículo basado en las posiciones anteriores [Vilalta, 2002]. Después de estimar la posición de todos sus vehículos vecinos, el protocolo envía el paquete de datos al vehículo vecino que se encuentra en la posición más óptima (MFR, Most Forward within Radius), y continuamente fuente y destino van actualizando sus posiciones en los paquetes de datos y *ACKs* respectivamente.

Evaluación

Los rendimientos de LORA_CBF son comparados tras la simulación de los autores con

AODV [Perkins, 2003] y DSR [Maltz, 1996] [Maltz, 1998] en escenarios típicos urbanos y carreteras abiertas y demuestran en ambos entornos que la movilidad de la red y el tamaño afectan al rendimiento mucho más en AODV y DSR.

Una de las ventajas que aporta es que presenta facilidad de escalabilidad como es habitual en algoritmos basados en *clusters*.

El problema de los *cluster* es que introducen una sobrecarga y un retardo adicional empleado en formar y mantener los *clusters* y las asignación de funciones en cada nodo. Con respecto a COIN [Blum, 2003] presenta una mayor complejidad global del protocolo buscando una mayor estabilidad.

CONCLUSIONES

De los protocolos basados en la división del espacio en celdas y aunque al final del documento se volverá a hablar sobre este apartado, diremos que aunque parecen tener una solución de compromiso entre los protocolos reactivos y los proactivos y que podría funcionar (de manera similar a los protocolos híbridos), no se han invertido recursos en la misma medida que en otros tipos de protocolos, de manera que estos no han evolucionado de la misma forma y realmente se encuentra una muy pequeña variedad de protocolos de este tipo.

El mayor problema que parecen presentar este tipo de protocolos es que al concentrar el tráfico en nodos determinados de cada celda, estos se acaban convirtiendo en cuellos de botella y se pierde lo que puede ser un gran aliado en redes con tal multitud de nodos, el procesamiento distribuido de las pesadas tareas de control en las dinámicas redes VANET.

2.4 Protocolos basados en Georouting

También conocido como enrutamiento basado en localización geográfica. Utiliza la información que le aporta la posición geográfica del propio nodo y de los demás para avanzar hacia el destino, en el que en ocasiones solo se conoce dicha posición geográfica. Analizaremos distintos protocolos que de una u otra forma utilizan la información que les aporta la señal GPS y otros dispositivos de localización para alcanzar el destino.

La ventaja es que los tiempos de respuesta son menores ya que normalmente en cuanto se solicita el envío de un paquete se distribuye hacia nodos situados en la dirección del destino final e intentando alcanzar los mayores avances posibles salto a salto. Como inconveniente requieren que haya una densidad de nodos suficiente en la dirección de envío del paquete o por el contrario, estrategias de recuperación a la hora de encontrar un camino para casos en los que esa estrategia básica no es suficiente.

Por la importancia que el concepto “greedy” (codicioso) adquiere en este apartado y la cantidad de veces que se menciona en muchos de los protocolos diremos que se trata de una estrategia que consiste en un método de avance en este tipo de redes multisalto, tratando de minimizar el número de saltos entre nodos, de manera que cada nodo intenta transmitir al nodo más alejado dentro de su alcance y en dirección hacia el destino. Así se consigue minimizar el retardo, el número de retransmisiones y los nodos implicados en la transmisión.

Para introducirnos en estos protocolos analizaremos una serie de estrategias que aún siendo del año 1986, resultan básicas para estrategias futuras empleadas en los protocolos [Hou, 1986].

A partir de ahí comenzaremos a analizar los protocolos basados en localización geográfica, que tienen como característica común el hecho de que cada nodo envía de manera proactiva su localización a los nodos cercanos para mantenerles informados, y una vez que se transmite, de manera reactiva se establece la ruta consultando nodo a nodo hacia donde reenviar. DREAM [Basagni, 1998], GPSR [Karp, 2000], GSR [Lochert, 2003] o CBF [Hannes, 2004] son ejemplos de este tipo de protocolos. Por otro lado encontramos LAR [Vaidya, 2000] que utiliza algoritmos que provienen de DSR [Maltz, 1996] [Maltz, 1998] y a su vez lo mejora en rendimiento ya que utiliza la información geográfica GPS. También se tratarán después una serie de protocolos A-STAR [Liu, 2004], GPCR [Lochert, 2005], SMF [Liu, 2006], GyTAR [Jerbi, 2007], GpsrJ+ [Lee, 2007],

GeOpps [Leontiadis, 2007], GeoDTN + NAV [Cheng, 2008], RVBT [Nzouonta, 2008], SPANER [Oka, 2010] que utilizan una información adicional para el enrutamiento, mapas de carreteras, sobre todo para el entorno urbano, donde resultan especialmente útiles. Algunos de ellos tratan de usar información relativa al estado del tráfico, algunos dando por hecho que existirán elementos viales capaces de proporcionar esa información a los nodos vehiculares y otros protocolos que son ellos mismos con sus algoritmos, capaces de aproximar el estado del tráfico en las distintas direcciones desde su posición para tomar una decisión de enrutamiento con una mayor eficacia a priori. Algunos como A-STAR [Liu, 2004] dejan el cálculo del tráfico a elementos viales externos, mientras que otros como GyTAR [Jerbi, 2007] o RVBT [Nzouonta, 2008] prefieren realizar ese cálculo de manera distribuida entre los propios nodos vehiculares mediante paquetes de control. El empleo de los mapas urbanos y la información de tráfico resulta casi vital en entornos urbanos, ya que enviar paquetes en la dirección en la que exista una carretera implica no enviar el paquete hacia algún elemento que interrumpiera la transmisión, como pueda ser un edificio, y por otro lado si sabemos por qué vías se están desplazando un número suficiente de vehículos, conseguiremos realizar la transmisión evitando cortes ineficientes a lo largo del camino hacia nuestro destino.

También hay que comentar que un algoritmo que se emplea en estos protocolos y que mejora la eficiencia de enrutamiento, es asociar elementos viales que son fijos, por ejemplo un cruce de dos carreteras, con nodos o puntos determinados de nuestra red VANET, de manera que conseguimos que nuestra red que es extremadamente dinámica y cambiante gane en estabilidad. Algunos de estos protocolos son VCLCR [Lee, 2008], GRANT [Schnauffer, 2008] o RVBT [Nzouonta, 2008]. Un inconveniente que se plantea es que algunos de los protocolos que utilizan esta técnica requieren que exista un nodo en esa intersección y necesariamente tiene que ser un nodo a atravesar durante la ruta del paquete, mientras que las evoluciones posteriores de estos métodos son capaces de saltar estos nodos situados en los cruces si la dirección que se va a seguir es la misma por la que se ha llegado al cruce, ahorrando de esta manera saltos innecesarios.

2.4.1. Estrategias de control del rango de transmisión

Como resumen de estas estrategias diremos que el análisis trata de 3 estrategias básicas y diferentes de transmisión de un paquete a un destino y que resultarán fundamentales para futuros algoritmos que se han desarrollado. Para información avanzada sobre lo que a continuación se expondrá y sobre la autoría de las 3 estrategias dejaremos presente la siguiente referencia [Hou, 1986].

- MFR (Most Forward with Fixed Radius R): un nodo transmitirá al vecino más alejado en la dirección de transmisión. El objetivo es minimizar el número de saltos entre origen y destino.
- NFP (Nearest with Forward Progress): cada nodo retransmite a su vecino más cercano dentro de la dirección de progreso hacia el destino. Se ajustará la potencia de transmisión para ser la mínima necesaria para alcanzar el nodo. El objetivo es reducir los conflictos lo máximo posible.
- MVR (Most Forward with Variable Radius): similar a MFR excepto que el radio de transmisión se ajusta para ser igual a la distancia entre el emisor y el siguiente receptor de entre todos los nodos intermedios por los que pasará la información en la transmisión multisalto. Es un híbrido entre las dos estrategias anteriores tratando de coger lo mejor de cada una.

Evaluación

Son ideas simples y poco desarrolladas pero que servirán de base fundamental para futuras estrategias utilizadas en el presente en redes móviles.

Las simulaciones que realizaron demostraron que merecía la pena reducir la potencia de transmisión, aunque se utilizaran al final más saltos, para evitar colisiones y ganar fluidez en la transmisión.

Además se demostró que esta táctica permitía mantener el rendimiento de la red, aún con redes con muchos cambios topológicos.

2.4.2. DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility)

Dejaremos presente la siguiente referencia, [Basagni, 1998], para información avanzada sobre el protocolo que se va a tratar a continuación y diremos a nivel general y resumido que el algoritmo realiza un trabajo proactivo, que su método de actualización de información de localización de otros nodos, consiste en que periódicamente se envía la información de localización e identificación del mismo nodo a los vehículos próximos. Además está orientado a unicast.

Intentan eliminar las pesadas tablas de encaminamiento de los algoritmos proactivos y el retardo de descubrimiento de rutas de los algoritmos reactivos. Para ello cada nodo mantiene información de localización de los demás nodos y el momento de la última actualización de ese dato.

Cuando un nodo quiere mandar un mensaje a otro, usa su información de localización para obtener la “dirección hacia él”. Entonces se transmite el mensaje a todos los vecinos a un salto de distancia en la dirección obtenida. Cada vecino repite el mismo proceso hasta que si es posible se alcanza el objetivo. La ruta se ha descubierto de manera reactiva, pero no se ha esperado a que se calculara realizando una *pequeña inundación*.

La información individual se envía con tiempos de vida corto y largo. *Short lifetime*, para enviar la información con mucha frecuencia a los nodos cercanos y que permanezca actualizada en ellos, y *long lived packets*, con poca frecuencia y muchos saltos para que lleguen a nodos lejanos.

No es apropiado para redes grandes debido a aspectos relacionados con la escalabilidad [Mauve, 2001].

Evaluación

Es un protocolo que resulta eficiente en cuanto al ancho de banda empleado y en cuanto a la energía utilizada para realizar la transmisión.

En cada nodo de la red debe mantenerse la posición de todos los demás nodos, resultando un volumen grande de paquetes de localización a medida que crece el número de nodos. También se guarda el momento en el que fue actualizada es información de emplazamiento, lo que es útil para

poder descartar información que pueda estar desfasada.

Evidentemente si uno de sus problemas es su baja escalabilidad no podemos emplearlo para redes grandes, por ejemplo en las VANET.

2.4.3. LAR (Location Aided Routing)

Para información relativa a nuestro protocolo dejaremos constar la siguiente referencia [Vaidya, 2000]. Como resumen, el algoritmo a tratar a continuación está basado en inundación direccional y orientado a unicast. Utiliza métodos reactivos para los nodos intermedios que determinan zonas hacia donde reenviar en caso de que se solicite.

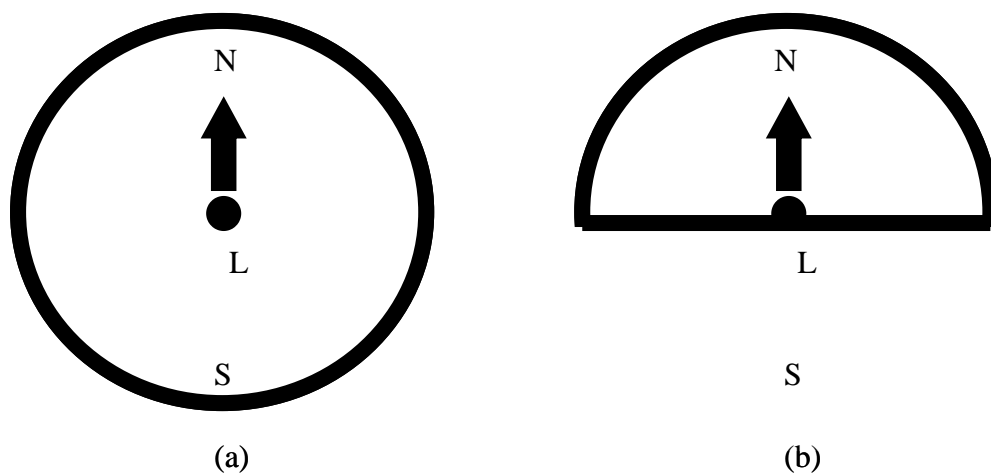
LAR usa un algoritmo similar al utilizado en DSR [Maltz, 1996] [Maltz, 1998] o AODV [Perkins, 2003], para hallar rutas de encaminamiento. Consiste en la inundación de los nodos que rodean al emisor del paquete, para que estos reenvíen a su vez la información para el establecimiento de ruta una única vez, usando unos números de identificación únicos para cada “intento de establecimiento de ruta” evitando así enviar más intentos repetidos de los necesarios y evitando una sobrecarga innecesaria.

La novedad que aporta LAR con respecto a los otros algoritmos es que pretende reducir la sobrecarga utilizando la señal de posicionamiento geográfico que aporta el vehículo (GPS) para reducir la zona de inundación. Se parte de que conocemos la localización geográfica del destino. A partir de ahí hay una zona en la que se supone estará en los instantes posteriores. Si además conocemos su vector desplazamiento podemos reducir el área donde suponemos que se encuentra el destino. En el ejemplo de la figura, el dibujo (a) la “zona esperada” es un círculo alrededor del destino (L), sin embargo usando LAR y conociendo la velocidad y sentido hacia donde se desplaza (L) en la figura (b) se observa cómo se limita la “zona esperada”.

También hay que hablar de lo que se define como “zona solicitada” en un nodo y para un destino.

Según un algoritmo (se definen dos posibles algoritmos en [Vaidya, 2000]) los nodos intermedios reenvían la información a los nodos siguientes si se encuentran dentro de la “zona solicitada” para el destino del paquete. La “zona esperada” (zona a donde esperamos que se haya

desplazado un nodo) siempre ha de estar dentro de la “zona solicitada” para que el paquete llegue al destino, y en caso de que se desconozca la posición del destino en un principio, la “zona esperada” será toda el área de la red.



Evaluación

Se reduce la zona de reenvío de forma significativa y los nodos en los que podemos generar interferencias y conflictos.

Las simulaciones muestran que usar la información de localización geográfica consigue reducir la sobrecarga de enrutamiento de manera significativa con respecto a otros algoritmos que no la usan.

Depende fuertemente su eficacia de disponer de datos como velocidad y posicionamiento geográfico del vehículo destino que podemos no conocer en determinados momentos, aunque si no se tienen dichos datos, el algoritmo transmite el mensaje en todas direcciones, posiblemente volviendo a una inundación básica de la red.

Aunque utiliza la información de localización con un objetivo, es el protocolo encasillado en este tipo que más se aleja de los demás, ya que LAR sigue bastante relacionado con AODV y DSR para obtener la topología de la red.

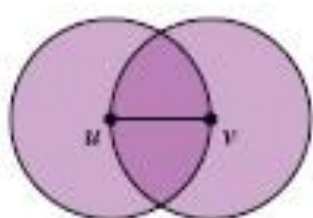
2.4.4. GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing)

De este protocolo diremos de forma resumida que está basado en el posicionamiento geográfico y orientado a unicast. Para información avanzada sobre nuestro protocolo y su autor se puede consultar la siguiente referencia [Karp, 2000].

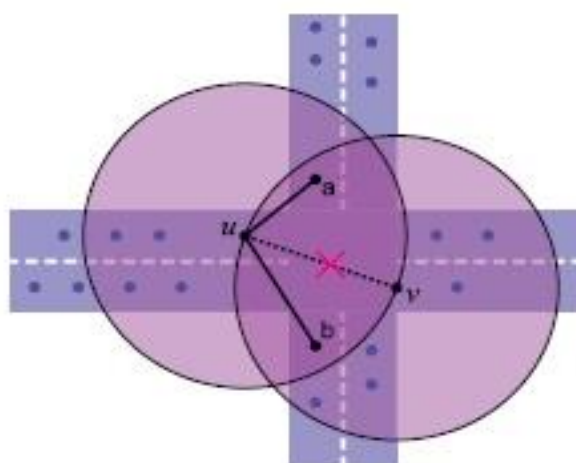
Combina el “greedy routing” (reenvío de paquete al nodo geográficamente más cerca del destino) con el “face routing” que ayuda a que el reenvío se produzca en caso de que ningún nodo esté más cerca del destino que la propia fuente.

Funciona mejor en escenarios abiertos con nodos distribuidos, ya que cuando se aplica a escenarios en ciudades para VANETs, “greedy routing” suele estar restringido porque las comunicaciones directas entre nodos pueden no existir por obstáculos como edificios y árboles.

RNG (Relative Neighborhood Graph) es un grafo de topología plano que usa GPSR y consiste en unir mediante enlaces a nodos vecinos de manera que en el área que existe entre ellos no haya más nodos (se denomina modo perimetral)(*figura a*). A partir de ahí se intenta realizar “greedy” o “face routing” entre ambos vecinos. Si se detecta algún nodo en el área intermedia cambian los enlaces entre ellos, pero al pasar al greedy routing pueden existir obstáculos propios del entorno como por ejemplo edificios. Esto produciría lo que se denomina GPSR failure (*figura b*) por lo que el reenvío (greedy forward) queda limitado.



(a) RNG



(b) UV se desconecta en RNG

Evaluación

Para espacios abiertos resulta claramente apropiado por su idea de enviar al nodo alcanzable más próximo al destino, que resulta simple pero efectiva.

Aún así no es tan simple el protocolo, ya que antes tiene que hacer el grafo plano RNG para después pasar al “greedy” o “face routing” en caso de que el primero falle, por lo que se genera un retardo empleado en realizar el grafo plano.

La solución para los “local maximum” al hacer el grafo plano de la red para evitar obstáculos, es algo compleja y los paquetes avanzan demasiado poco a poco en saltos pequeños.

2.4.5. GSR (Geographic Source Routing)

De nuestro protocolo diremos a modo resumen que está basado en el posicionamiento geográfico y orientado a unicast. En él se asume la ayuda de un mapa de calles en entornos urbanos. Además usa métodos reactivos, ya que reaccionan bajo demanda. Para información sobre los autores e información extendida sobre el protocolo dejaremos constancia de la siguiente referencia [Lochert, 2003].

Para comenzar a enrutar GSR usa un algoritmo llamado RLS (Reactive Location Service) para conseguir la posición del destino.

El algoritmo necesita del conocimiento global de la topología de la ciudad que es proporcionado por un mapa estático de calles. Con esta información, el emisor determina los enlaces que tienen que ser atravesados por el paquete enviado usando el algoritmo de Dijkstra para obtener el camino más corto. Combinando el enrutamiento geográfico y el conocimiento topológico de las calles GSR propone una estrategia de enrutamiento prometedora para VANETs en entornos urbanos. Los resultados de simulaciones demuestran que GSR tiene mejor tasa media de envío, menor ancho de banda consumido y latencia similar que DSR y AODV, también reactivos.

Evaluación

Es el primer protocolo analizado que introduce el mapa de la ciudad y extrae ventajas de él.

Para entornos urbanos es un protocolo efectivo y puede salvar los problemas de obstáculos urbanos.

Requiere del mapa de cada ciudad. Habría que realizar actualizaciones cada cierto tiempo de todos los mapas para no perder la consistencia entre el mapa y la realidad generadas por modificaciones en las carreteras. Es un problema menor, porque la topología vial no cambia frecuentemente.

2.4.6. CBF (Contention-Based Forwarding)

De este protocolo diremos brevemente que es de tipo reactivo y que el enrutamiento que realiza está basado en información de localización geográfica, además de que está orientado a unicast. En la siguiente referencia, [Hannes, 2004], podemos encontrar información avanzada sobre el protocolo y datos relativos a su autoría.

CBF es un algoritmo basado en la estrategia greedy [Karp, 2000]. Una de sus principales características es que CBF no requiere un continuo broadcast de mensajes “beacon” (información de nodo y localización) hacia los nodos vecinos. En lugar de eso se hace broadcast directo a todos los nodos vecinos y estos deciden si reenvían el paquete.

El nodo que va a reenviar el paquete se selecciona por un proceso basado en la distribución del tiempo en franjas, que permite que el nodo más adecuado reenvíe antes que otros nodos con posibilidades similares. Cuando un nodo recibe un paquete pone en marcha una cuenta atrás en la que el valor del tiempo de inicio depende del progreso que el nodo puede aportar hacia el destino. Si antes de terminarse el tiempo reciben un paquete igual, quiere decir que un nodo mejor situado ya ha reenviado el paquete, por lo que se descarta el paquete y ya no realiza el forwarding. Estas características parecen mejorar el rendimiento especialmente en redes con alta movilidad [Hannes, 2004] [Heissenbüttel, 2003].

Los mismos autores propusieron una mejora sin llegar a desarrollarla, que consistía en el uso de un mapa de calles para mejorar la eficiencia de reenvío y eliminar duplicación de paquetes.

Evaluación

Genera menos sobrecarga de forma reactiva y nada en modo proactivo en cuanto a mensajes de control que los protocolos clásicos basados en localización y que generalmente usan *beacons*.

CBF está basado en una idea fundamental que rinde satisfactoriamente comparándolo con otros protocolos de la misma clase, “greedy” ayudado de un método que reduce drásticamente las interferencias.

Futuras evoluciones de CBF pueden resultar muy apropiadas a VANETs. Parece que tiene bastante que mejorar en entornos urbanos y la mejora propuesta utilizando mapa de calles no está desarrollada.

2.4.7. A-STAR (Anchor-based Street and Traffic Aware Routing)

Relativo a este protocolo dejaremos su referencia, [Liu, 2004] para una información avanzada sobre el mismo, además de que podremos encontrar datos sobre sus autores. A modo resumen diremos que el protocolo está basado en el posicionamiento geográfico y orientado a unicast. Se asume la ayuda de un mapa de calles en entornos urbanos. Es de tipo reactivo ya que maneja información dinámica.

A-STAR ha sido propuesto para entornos urbanos, y usa el mapa urbano para procesar la secuencia de uniones a través de las cuales el paquete tiene que pasar para alcanzar el destino.

A diferencia de GSR [Lochert, 2003] y GPSR [Karp, 2000] este protocolo obtiene los caminos ayudándose del conocimiento del tráfico. Se usan mapas que bareman estáticamente el tráfico a partir del número de rutas de autobús en cada calle para identificar caminos fijos de máxima conectividad. También puede usar mapas dinámicos del tráfico manejando información reciente sobre la circulación.

Además se emplea una estrategia de recuperación mejor que “greedy” [Karp, 2000] en GSR y que el modo perimetral en GPSR. Consiste en marcar una calle vacía, o en la que hay algún problema en la comunicación, como fuera de servicio durante un tiempo “timeout”. Cuando vence el *timeout* vuelve a ser operacional y vuelve a entrar en el procesamiento para hallar rutas para reenvío de paquetes.

Evaluación

Se observa, cuando se cuenta con el conocimiento del tráfico, su máximo rendimiento comparado con GSR y GPSR. Hasta un rendimiento que supera en un 40% a GSR ya que puede seleccionar caminos con mayor conectividad para reparto de paquetes.

Esa mejora del rendimiento depende fuertemente de la veracidad de la información instantánea del tráfico y de su capacidad de actualización, y esto hoy en día sin disponer de buena infraestructura y coordinación entre medios, dejaría de ser una ayuda en la mayoría de las ocasiones.

2.4.8. ExOR

De este protocolo dejaremos la referencia correspondiente, [Biswas, 2005], consultándola encontraremos información extendida a la que a continuación se expondrá. Brevemente diremos que el protocolo utiliza la posición relativa a otros nodos con respecto al destino para acercarse al nodo objetivo.

ExOR consiste en una herramienta de enrutamiento y un protocolo MAC que aumenta la penetración en transferencias largas unicast en la que se utilizan multitud de saltos.

Un nodo transmite el paquete hacia el destino y un subgrupo de nodos intermedio lo recibe. Los nodos del subgrupo intermedio ejecutan un protocolo reducido para descubrir cuáles son los nodos pertenecientes al subgrupo. El nodo perteneciente al subgrupo y que se encuentra más cerca del destino hace un broadcast del paquete. Este progreso continúa hasta que se alcance el destino. El protocolo ejecutado por el subgrupo ha de ser mínimo para no introducir sobrecargas y ralentizar la retransmisión con respecto a anteriores algoritmos.

Evaluación

Los paquetes se retransmiten un número mínimo de veces intentando cubrir la distancia máxima en cada transmisión.

Los autores dicen que las variaciones en el tiempo de envío, conocida como *jitter*, es un cuarto de las de otros algoritmos, lo cual resulta muy útil para aplicaciones que necesiten un flujo continuo de datos.

No hay datos sobre simulación con nodos móviles y el movimiento relativo entre nodos durante el breve tiempo en el que se efectúa el protocolo puede hacer que vehículos que circulen en sentido contrario dejen de estar alcanzables

Con paquetes de datos pequeños pierde mucha eficiencia porque el protocolo entre los nodos intermedios se va a realizar independientemente del tamaño del paquete.

No tiene en cuenta muchos de los problemas usuales en VANET, problemas que protocolos antecesores a ExOR ya estaban teniendo en cuenta como los obstáculos urbanos intermedios que impiden la transmisión.

2.4.9. MoVe (Motion Vector)

Del protocolo diremos brevemente y a modo resumen que utiliza la velocidad e información topográfica para comunicaciones unicast. Para información extendida sobre la que se mostrará a continuación se puede consultar la siguiente referencia [LeBrun, 2005].

El esquema de *Motion Vector* aprovecha el conocimiento de las velocidades relativas de un nodo y sus vecinos para predecir la distancia más cercana a la que van a estar del destino, siguiendo sus actuales trayectorias en línea recta e identificando así el *punto más cercano al destino*.

Una variante propuesta es MoVe-Lookahead, un método que se asemeja mucho al modo

sencillo, pero con la diferencia de que cada nodo mira hacia adelante al lugar en el que su trayectoria cambia. Si un nodo cambia su dirección antes de que alcance el punto más cercano al destino según la línea recta del método anterior la distancia entre ese punto y el destino pasará a ser la distancia más cercana que estará del destino y se utilizará para futuras decisiones en fases de reenvío como el *punto más cercano al destino*. Ese punto que tratamos de averiguar con uno u otro método es el que se utiliza entre los nodos para comparar entre sí y obtener que nodo debe portar el paquete (el que tenga el *punto más cercano al destino*).

Evaluación

Introduce el *reenvío inteligente oportuno* empleando la velocidad como un valor auxiliar para tomar decisiones de reenvío, lo cual se traduce más en un dato aprovechado positivamente.

La predicción que se hace sobre un nodo del *punto más cercano al destino* que alcanzará, puede estar muy equivocada porque se calcula con el primer método según una línea recta que supuestamente seguirá el nodo. Con el segundo método al menos conseguimos que si el nodo se va a desviar antes, se tome de manera más correcta el *punto más cercano al destino*.

Se han utilizado unas velocidades de simulación de entre 5 y 10 m/s, lo cual son bajas velocidades incluso en entornos urbanos. Se necesitan simulaciones más exhaustivas y reales para comprobar eficacia.

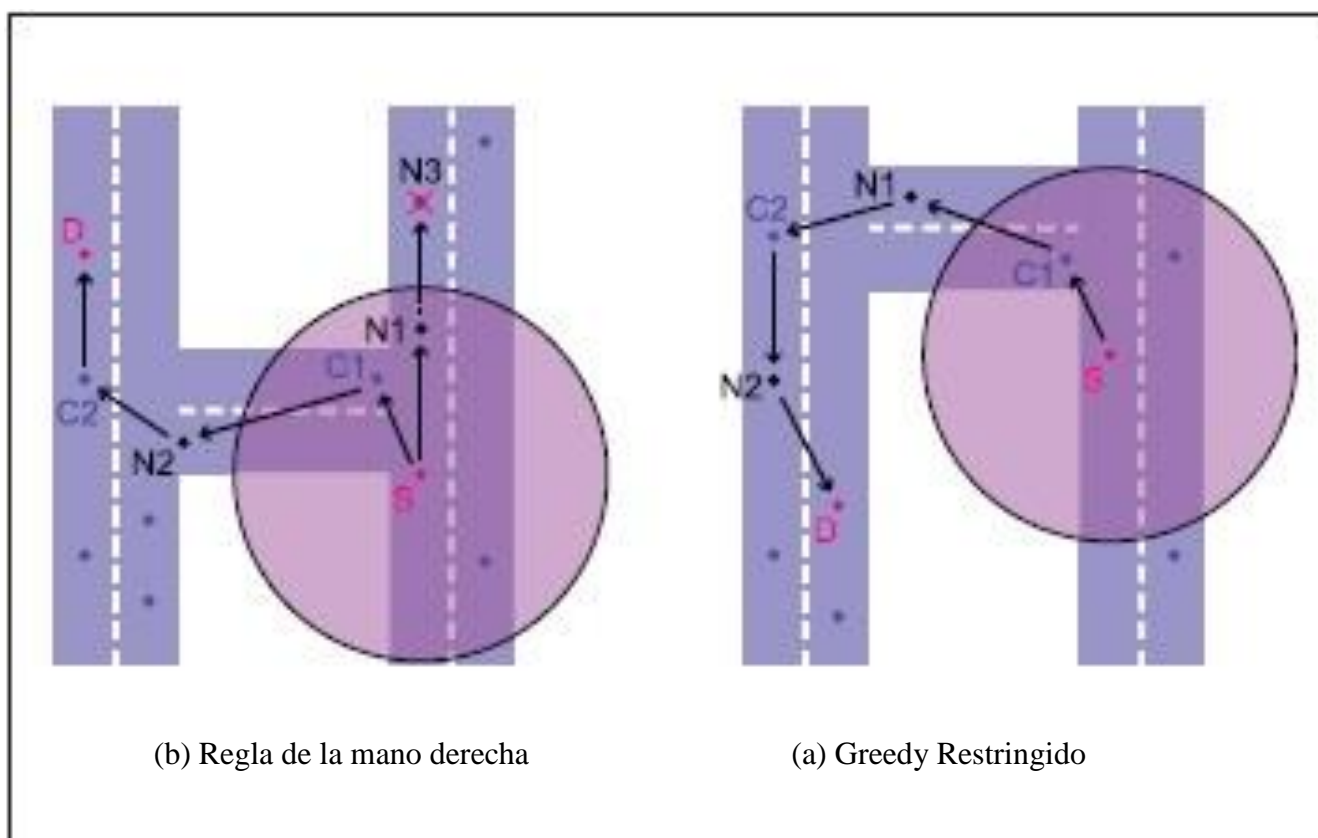
Aún así creo que el método se centra demasiado en mejorar la eficiencia, basándose en la ruta que va a seguir el vehículo. Lo que se pretende es que el coche que vaya a pasar más cerca del destino sea el portador del paquete, pero la velocidad de transmisión y avance de un paquete debe ser mucho mayor que la del avance físico de un vehículo, y se podría dar el caso con este método en el que un vehículo no haga reenvío hacia vehículos en la dirección del destino porque el propio vehículo va a pasar en un tiempo (que puede ser relativamente grande) cerca del destino, pero ese tiempo que tarda en llegar físicamente el vehículo es mucho mayor que el que se conseguiría con saltos hacia la dirección de destino por lo se produciría un mayor retardo. Por ello creo que la principal prioridad de los protocolos ha de ser la de avanzar en la dirección hacia el destino y posteriormente como complemento y en caso de no haber tráfico suficiente para avanzar en la dirección hacia el destino, el algoritmo de MoVe o MoVe-Lookahead, que puede asegurar un mayor avance de los paquetes.

Otro posible problema es que no se contempla la posibilidad de que en entornos urbanos existen objetos como bloques de edificios que se interponen a las comunicaciones entre nodos próximos.

2.4.10. GPCR (Greedy Perimeter Coordinator Routing)

A modo resumen de este protocolo diremos que el enrutamiento que realiza está basado en el posicionamiento geográfico y orientado a unicast. Diremos también que básicamente es de tipo reactivo. Para información extendida del protocolo e información sobre los autores dejaremos constancia de la siguiente referencia, [Lochert, 2005].

De los mismos creadores de GSR [Lochert, 2003], GPCR es una solución propuesta con posterioridad. No usa ni el enrutamiento calculado en la fuente ni necesita la disponibilidad del mapa de calles. Utiliza el hecho de que los enlaces entre nodos en la calle siguen un grafo plano. Así un algoritmo de tipo “greedy” (envío al nodo más lejano del nodo y que esté dentro de la zona de alcance) se puede seguir mientras los nodos circulan en las calles. Las decisiones de enrutamiento se toman en el coordinador que hay en cada cruce. Así los paquetes deberían ser reenviados con prioridad a esos coordinadores antes que ser reenviados entre distintos cruces. A



pesar de esta estrategia mejorada de “greedy” [Karp, 2000] (*figura a*) se usa una estrategia de recuperación para obtener el camino mínimo cuando la primera falle: “ningún nodo está más cerca del destino que el nodo intermedio entre ambos”. Esta estrategia decide en cada cruce qué calle será la siguiente por la que irá el paquete, siguiendo la regla de la mano derecha (*figura b*).

Evaluación

Las simulaciones con NS-2 muestran que GPCR tiene tasas de envío superiores a GPSR, demostrando que el coordinador empleado funciona adecuadamente.

También se observa en las simulaciones un pequeño aumento de la latencia y un número medio de saltos entre nodos mayor, lo cual es un empeoramiento con respecto a GPSR.

La limitación de GPCR es que asume que siempre existe un nodo en el cruce, lo cual no siempre será cierto y supondría una gran limitación para su funcionamiento.

2.4.11. GPSR + AGF (Advanced Greedy Forwarding)

A modo de resumen diremos que el protocolo está basado en el posicionamiento geográfico y orientado a unicast. Para encontrar información adicional sobre el protocolo y datos sobre los autores dejaremos constancia de la siguiente referencia, [Naumov, 2006].

Al igual que GPSR [Karp, 2000], AGF incorpora RLS (Reactive Location Service), con el que origen y destino se intercambian su posición y vector velocidad. Además esta información se envía en los *beacons* que envía cada nodo periódicamente. También se añade a cada paquete el tiempo que lleva de camino dicho paquete desde que se envió y se va sumando en cada nodo el tiempo de procesamiento correspondiente. Estos nodos intermedios reenvían en función de los vectores de velocidad de sus vecinos que se encuentran almacenados en sus tablas de encaminamiento.

Cuando un nodo recibe un paquete consulta en su tabla de encaminamiento el vector

correspondiente. Si tras comprobar el tiempo del paquete y el vector velocidad del destino se llega a la conclusión de que este se encuentra fuera del rango alcanzable, se reenvía a un nodo intermedio. Si no se envía directamente al destino.

Evaluación

El porcentaje de paquetes distribuidos que llegan a su destino es hasta 10 veces mejor en algunas simulaciones que sin AGF.

Aunque los autores se centraron en GPSR, AGF también puede ser usado para otros protocolos basados en greedy.

AGF ayuda a mejorar problemas de alcanzabilidad entre nodos. No utiliza mapas urbanos que podrían ayudar a enviar paquetes entre nodos según la dirección de las calles evitando objetos que se interpongan y dificulten la transmisión, pero el algoritmo que emplea parece resultar bastante efectivo y el cálculo que realiza con el *tiempo del paquete* y el *vector velocidad* previene de múltiples fallos de alcanzabilidad al estar el paquete próximo al nodo destino y su consecuente reintento de alcanzar el destino, mejorando a GPSR y resultando al final más eficiente.

2.4.12. SMF (Skewed Map Forwarding)

Para buscar información complementaria de la que a continuación se mostrará se deja constancia de la siguiente referencia [Liu, 2006]. Podemos decir además como resumen del tipo de enrutamiento que realiza, que está basado en el posicionamiento geográfico y orientado a unicast, se introduce una capa por debajo del nivel de red para mapear la información topológica de los nodos vecinos.

El protocolo altera y distorsiona la visión de la topología de la red por parte del protocolo, ya que mapea las coordenadas físicas de los nodos a coordenadas lógicas para que el protocolo trabaje

después con las últimas. Las rutas resultantes aparecen como si son cortadas de la ruta original, creando múltiples rutas dependiendo de cuanto se altere la vista de la topología real.

Los autores quieren que el protocolo sea multicamino para que sea posible el balanceo de carga por los distintos caminos. Para ello se requiere que los caminos sean disjuntos, es decir, que no compartan ningún nodo. Para conseguir los múltiples caminos se introduce una capa intermedia entre la capa de enlace y el protocolo de enrutamiento basado en localización, la capa SWF (figura a la derecha). En función

CAPAS SUPERIORES
ENRUTAMIENTO BASADO EN LOCALIZACIÓN
CAPA SWF
CAPAS DE ENLACE
CAPA FÍSICA

del valor de un parámetro α utilizado en esa capa, se aporta una visión u otra de la red a la capa superior y como consecuencia se utilizará un camino u otro según el método “greedy” [Karp, 2000]. Los nodos intermedios enrutan los paquetes según el valor del parámetro α que va en el encabezamiento del paquete, pero es responsabilidad de los nodos finales decidir el valor exacto de α para obtener el óptimo rendimiento multicamino. Mayores valores de α causan desviaciones mayores del camino más corto. El protocolo SMR (Split Multipath Routing) se encarga de dar el valor correcto a α .

Evaluación

El uso del parámetro α puede ser útil para distribuir la carga que circula por la red y la capa intermedia SMF puede incorporarse a distintos protocolos basados en localización para lograr ese propósito, poder balancear la carga por distintos caminos según se vayan necesitando, pudiendo ampliar el número de caminos disponibles variando el parámetro α .

Aparte de la “mejora multicamino” de la capa SWF, no se utiliza información topológica de mapas ni ninguna otra mejora de protocolos recientes. La simulación realizada es muy pobre, sin movimiento de nodos por lo que aunque se compara con GPSR, no tienen mucha utilidad los buenos resultados obtenidos para poder recomendarlo como útil para redes VANET.

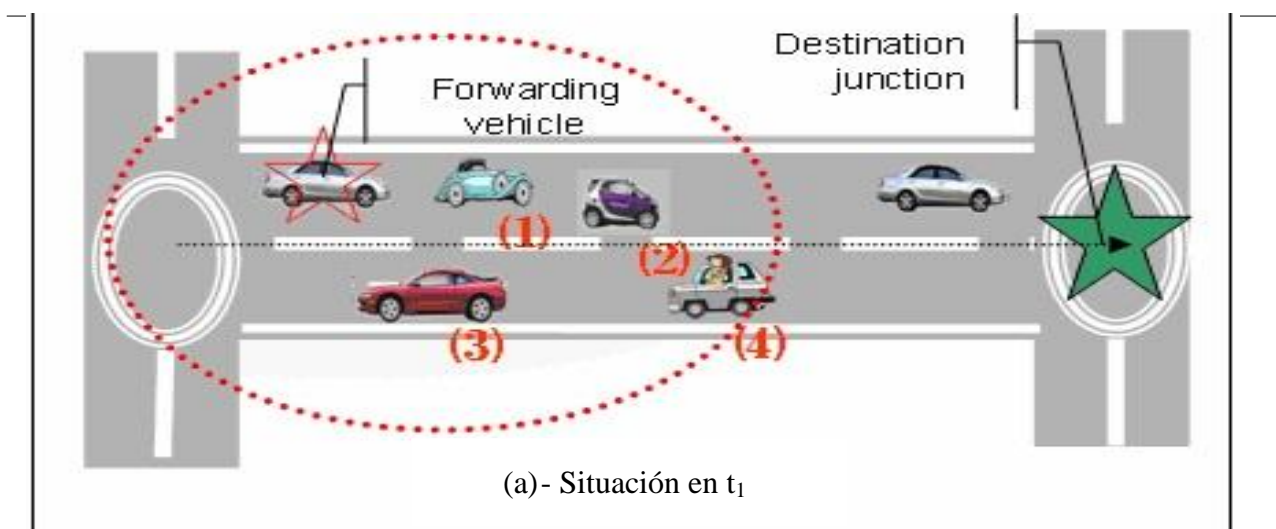
2.4.13. GyTAR (improved Greedy Traffic Aware Routing protocol)

De este protocolo dejaremos como referencia [Jerbi, 2007], para información adicional sobre el propio protocolo e información sobre los autores del protocolo. Diremos que el protocolo usa el posicionamiento geográfico para enrutar, que está orientado a entornos urbanos apoyándose en los cruces de las carreteras como elementos conocidos, y por otro lado que es de tipo unicast.

El protocolo fue propuesto como un algoritmo para encajar en entornos urbanos, con muchas vías e intersecciones próximas y con una velocidad de los nodos reducida. GyTAR se divide en dos módulos: selección dinámica de enlaces a través de los cuales un paquete se dirige hacia el destino y una estrategia “greedy” mejorada usada para reenviar paquetes entre nodos.

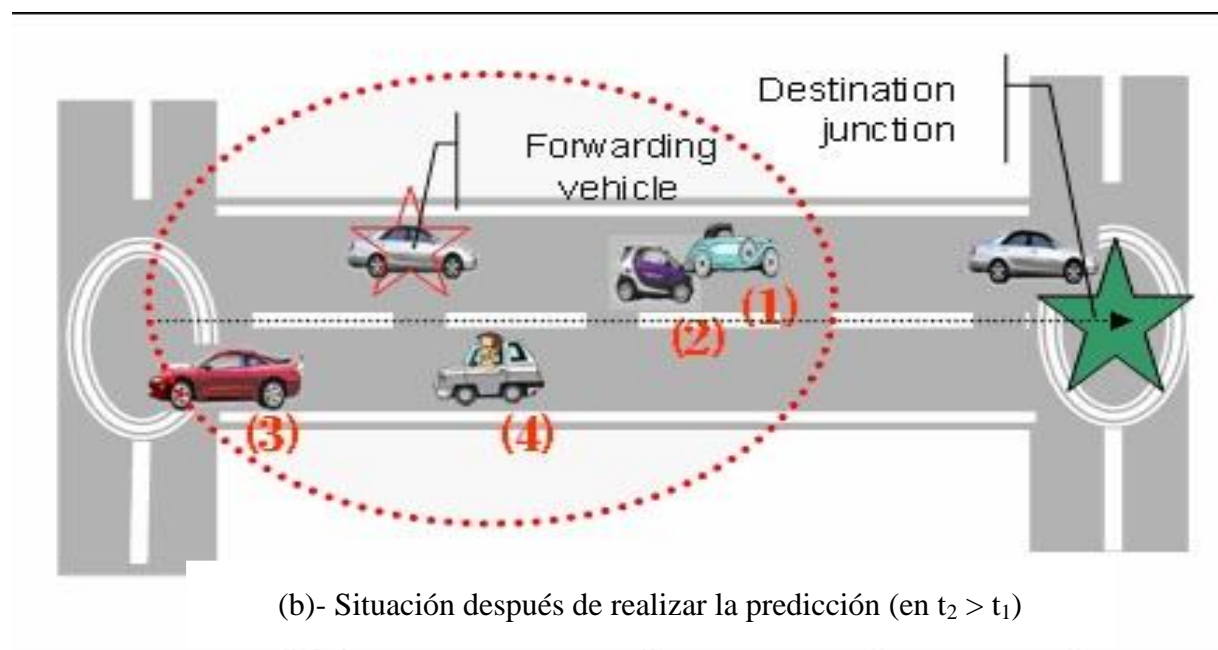
Está diseñado para ser usado en aplicaciones distribuidas, que no requieren de un único salto entre nodos (búsqueda web, chat, juegos, distribución de anuncios y advertencias de seguridad, espacio disponible en aparcamientos...). Se asume que se conoce la posición propia y del destino (mediante GLS –Grid Location Service [Li, 2000]). Además se considera que cada vehículo puede determinar la posición de los cruces cercanos gracias a mapas de calles precargados. También se asume que los nodos conocen la cantidad de tráfico entre el cruce anterior y el siguiente (dato proporcionado por sensores en los cruces, o por un sistema distribuido en los propios nodos).

El reenvío entre nodos se hace siguiendo los mapas de calles, pero a diferencia de GSR y A-STAR el emisor no procesa estáticamente la secuencia de cruces que el paquete atravesará, sino que se calcula dinámicamente en cada nodo, considerando el tráfico (cuanto mayor mejor) y la distancia al destino. Se asigna a cada cruce una nota en función de los dos parámetros y se reenvía en dirección hacia el cruce ganador. A partir de ahí para reenviar entre nodos se sigue una táctica greedy mejorada, en la que se marcan los paquetes incluyendo también el cruce hacia donde se dirige. Como cada nodo guarda una tabla de nodos vecinos (con posición, dirección y velocidad) con información periódicamente actualizada, cuando llega un paquete, el nodo predice la posición de sus nodos vecinos y selecciona el siguiente salto.



En el ejemplo ilustrado, el vehículo (1) (*forwarding vehicle*) que se mueve en la misma dirección que el emisor y con una velocidad superior al vehículo (2), recibirá el paquete a reenviar en t_2 , momento en el que (1) es el más cercano al siguiente cruce (*destination junction*).

Sin usar predicción, el *forwarding vehicle* habría elegido al vehículo (4) como el siguiente salto en vez del vehículo (1) ya que según la última actualización de posicionamiento entre vecinos en t_1 , era el más cercano al *destination junction*.



Aparte de lo anterior se tiene en cuenta la situación crítica de *local minimum* en la que el *forwarding vehicle* es el más cercano al destino y para salvar dicha situación se sigue una estrategia de recuperación llamada “carry and forward” [Li, 2000]. Para ello se dispone de una memoria para portar los paquetes que no se puede reenviar, hasta alcanzar el siguiente cruce o hasta que se

encuentre a otro nodo más cercano al cruce destino.

Evaluación

Por defecto está adaptado a entornos urbanos y la misma filosofía de valoración dinámica y comparación de los cruces en cada nodo es más difícil de emplear en entornos interurbanos porque generalmente la distancia entre distintos cruces será demasiado grande y probablemente no tendremos información en tiempo real de la densidad de tráfico en los cruces siguientes por estar fuera del alcance, por lo que compararlos puede ser tarea difícil y habría que probar el rendimiento del protocolo simulando el entorno y viendo qué tal se adapta a la falta de la información en tiempo real del tráfico en los cruces próximos pero lejanos. Probablemente no se haga uso de la parte del protocolo que se encarga de la selección dinámica de enlaces y sí emplee la estrategia greedy mejorada (más orientada a entornos interurbanos) con lo cual podría rendir bien, pero habría que probarlo. Existe una solución y es que la información de tráfico la calcule una infraestructura vial e informe a los nodos lejanos que pueden requerir la información, pero a día de hoy la solución más viable en VANETs pasa por un cálculo del tráfico de manera distribuida, o desde el propio nodo si está dentro del rango alcanzable porque la instalación de la infraestructura se traduce en un desembolso que alguien tiene que asumir.

El protocolo utiliza la mayoría de tácticas efectivas que existen en VANETs: greedy, GPS, GLS, utilización de planos urbanos, reenvío según dirección de calles... lo cual es buen punto a su favor. La estrategia greedy mejorada es similar a la que ya se estaba utilizando en algoritmos basados en localización, en la que se tiene en cuenta la velocidad de los nodos cercanos para hacer un correcto forwarding. Requiere de muchos datos, GPS, GLS, estado del tráfico... En caso de faltar estos perdería su eficacia, pero aún así mejora significativamente el rendimiento de los anteriores protocolos basados en localización para VANETs.

Como puntos negativos podemos destacar que el método para asignar nota y poder comparar los cruces no está muy desarrollado y con una evolución que permitiera un buen rendimiento (aún a falta de alguno de todos los datos que se necesitan) estaríamos ante un protocolo adecuado para VANETs.

El algoritmo requiere de una buena aplicación distribuida para determinar el estado del tráfico o en su defecto de una infraestructura vial de sensores, lo cual se traduce en el segunda caso en

costes de despliegue por toda la red vial, un punto negativo para esta alternativa como ya se ha comentado anteriormente. Como la eficacia del algoritmo depende fuertemente de la exactitud con la que se calcule la densidad de tráfico en entornos urbanos, concluimos que una buena solución para el cálculo de dicha densidad de manera distribuida haría del GyTAR un protocolo muy apropiado para VANETs.

2.4.14. GpsrJ+

De este protocolo diremos a modo de resumen que está basado en el posicionamiento geográfico y orientado a unicast. Diremos que es de tipo reactivo y que para encontrar información adicional podemos consultar la siguiente referencia, [Lee, 2007].

Consiste en una solución que mejora bastante la tasa de envío de paquetes de GPSR [Karp, 2000] y de su posterior mejora GPCR [Lochert, 2005]. Sobre todo se centra en mejorar el modo de recuperación “modo perimetral” cuando la táctica *greedy* [Karp, 2000] falla, para poder enviar los paquetes una vez alcanzada esa situación crítica y posteriormente seguir utilizando la táctica *greedy*.

GpsrJ+ usa mapas urbanos para determinar el entorno a su alrededor. Se diferencia de GPCR en unas mínimas modificaciones que predicen hacia donde reenviará el nodo situado en la intersección (junction node), de forma que ahora no será este el que decida hacia donde se reenvía. Para realizar

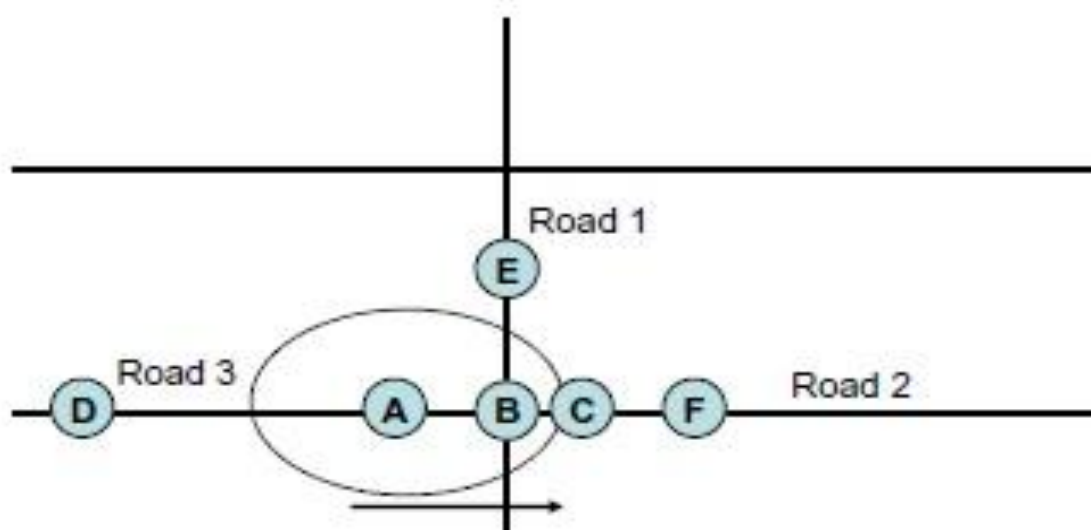


Fig. 7. Ejemplo de GpsrJ+: el nodo A reenviará al nodo C directamente

dichas predicciones es para lo que se incorporan los mencionados mapas de topología urbana. Así, quitando la “inteligencia” de los nodos situados en intersecciones, se consigue reducir el número de saltos antes de poder volver al modo normal (*greedy*) en un 200% comparándolo con GPSR.

Además usa una estrategia *greedy* distinta en la que si algún obstáculo bloquea las señales de radio, se hace un *greedy* hacia el vehículo más lejano alcanzable siguiendo la dirección de la calle por la que se circula y se comporta así hasta que alcanza la situación crítica de “local minimum” en la que recurre a la mencionada estrategia de recuperación. Este cambio en la estrategia de recuperación es debido a que la mayoría de las veces que se usaba la regla de la mano derecha para recuperación en GPCR, se seguía la dirección opuesta a la que el paquete iba a seguir antes de alcanzar la situación crítica, por lo que aumentaban el número de saltos de manera importante. Si cuando se predice en un nodo previo al situado en la intersección, que el siguiente segmento de carretera a seguir por el paquete coincide con la actual carretera por la que se circula, se salta el nodo de la intersección para ahorrar un salto como en la *figura 7* de la página siguiente. Por el contrario si hay que cambiar de carretera no se puede prescindir del nodo intersección. Para realizar la predicción se requiere de una modificación en los mensajes *beacon*, en los que según el protocolo se incluirá también los segmentos de carretera en los que cada nodo tiene vecinos. Esto sirve para informar a los nodos próximos de hacia dónde puede hacer forwarding cada nodo.

Evaluación

No requiere de un arduo proceso de realizar un grafo plano del entorno para formar el grafo con todos los nodos de la red que posteriormente hay que almacenar. En su lugar se usa el mapa urbano ahorrando recursos.

Utiliza una estrategia *greedy* [Karp, 2000] que viene siendo la estrategia más simple y efectiva. Tanto en situación normal como en situación de recuperación las tácticas empleadas son buenas, como el caso de recuperación de un *local minimum*, que con la nueva táctica se ahorran saltos que producía la “regla de la mano derecha” y el paso obligatorio por los *junction nodes*.

No está desarrollado para ser utilizado en entornos urbanos reales, ya que las predicciones de reenvío en los *junction nodes* y los segmentos de carretera se hacen y definen respectivamente con ecuaciones de rectas, lo cual podría distar de la realidad por las distintas formas que adoptan las carreteras.

2.4.15. GeOpps (Geographical Opportunistic Routing for Vehicular Networks)

Dejaremos como referencia, [Leontiadis, 2007] para encontrar información adicional sobre el protocolo y sobre el autor. Diremos a modo resumen que el enrutamiento lo realiza basándose en información de posicionamiento geográfico y orientado a unicast. Este protocolo está encasillado dentro de los de tipo reactivo.

GeOpps usa la disponibilidad de información de los sistemas de navegación para enrutar paquetes hacia una dirección concreta en el momento oportuno. GeOpps mantiene un estrecho lazo entre el sistema de navegación y el propio protocolo.

Para seleccionar el siguiente portador del mensaje, los vehículos vecinos que siguen la ruta sugerida hacia su destino, calculan el punto más cercano (NP) que alcanzarán hasta el destino del paquete. Después usan ese punto calculado y su mapa urbano que aporta el GPS, en una función que estima el mínimo tiempo que el paquete necesitará para alcanzar el destino (METD). El vehículo que pueda portar el paquete más rápido o más cerca del destino será el siguiente portador.

El algoritmo actúa así:

- Periódicamente los nodos informan a los vecinos por broadcast de su destino.
- Los vecinos calculan e informan de su tiempo mínimo para ese destino.
- Si el emisor tiene el tiempo mínimo conserva el paquete y si no lo reenvía al nodo que tenga el menor tiempo. El proceso se repite periódicamente hasta destino.

Evaluación

En entornos con tráfico denso y muchos vehículos en grupo que comparten el NP porque siguen la misma ruta, un paquete se reenvía al primer vehículo del grupo por tener el menor METD y se observó que el flujo de paquetes es más rápido que el de circulación por lo que tiene sentido hacer reenvíos. Habría que evaluar como calcula la función el METD y si merece la pena conservar el paquete en el primer vehículo del grupo o reenviar a nodos que se se desplacen en distintas direcciones pero que aún así, salto a salto permitan llegar al destino antes que con el propio desplazamiento del nodo líder del grupo conservando el paquete.

Cuando un vehículo ignora las desviaciones sugeridas por el sistema de navegación varias veces se reenvía el paquete a un nodo vecino, al igual que si el motor del vehículo se detiene. Para ello se hace una evaluación constante del comportamiento del conductor por el sistema de navegación. De nuevo, se confía más en el avance del paquete propiciado por el movimiento hacia el destino del vehículo que conserva el paquete, que en el avance que se pueda conseguir salto a salto entre nodos que circulen en distintas direcciones, pero que se encuentren más cerca del destino y permitan avances greedy.

Por otro lado no es necesario que todos los vehículos tengan su ruta calculada. El algoritmo puede seguir una táctica *greedy* [Karp, 2000] hasta que se contacte con un vehículo que tenga su ruta calculada.

Cuando un vehículo no sigue la ruta indicada por el sistema de navegación, la última información METD se conserva en los nodos vecinos pero incluye desviaciones que puede resultar negativas para futuros reenvíos.

Para concluir creo que debido a la diferencia de velocidad que puede existir entre el avance de un nodo y la propagación de un paquete, siendo muy superior la velocidad de propagación (sobre todo en entornos urbanos) me lleva a concluir que en principio sería más efectiva una táctica *greedy mejorada* [Jerbi, 2007] en la que se ganan metros hacia el destino, hasta alcanzar un *local maximum* y ahí es donde la táctica METD podría ser más efectiva, ya que al no existir nodos más cercanos al destino a través de los que ganar distancia hacia nuestro objetivo, nos apoyamos en el propio desplazamiento de los vehículos hacia el objetivo, que en resumen es lo que mide el parámetro METD.

2.4.16. VCLCR (VANET Cross Link Corrected Routing Protocol)

Como resumen del protocolo diremos que consiste en una solución basada en enrutamiento geográfico de tipo reactivo. Para encontrar información adicional sobre el protocolo y el autor se puede consultar la siguiente referencia [Lee, 2008].

VCLCR es un protocolo que mejora a GPCR [Lochert, 2005] eliminando los enlaces cruzados inducidos por el propio algoritmo perimetral GPCR. El concepto es usar el paquete que vuelve a un nodo del bucle como una prueba de detección de un enlace cruzado. Cuando un paquete es reenviado según un algoritmo perimetral (de recuperación ante un *local maximum*) el nodo emisor graba la información del camino a seguir en el paquete. Cuando un paquete es devuelto al punto de partida se comprueba el camino que atravesó el paquete y se puede observar si existe un bucle de enrutamiento y enlaces cruzados entre nodos.

Más específicamente cuando un nodo recibe un paquete y descubre que hay un bucle, comprueba si existen enlaces cruzados. Si no es así, quiere decir que no hay ningún camino disponible hacia el destino y el paquete será eliminado. En el otro caso los paquetes se volverán a reenviar según la regla de la mano derecha, suprimiendo uno de los enlaces vecinos en función de las veces que haya pasado por él, de manera que el grafo no quede inconexo y se elimine el enlace cruzado.

Cuando un paquete se reenvía en modo perimetral a un nodo que está más cerca del nodo destino que el nodo que empezó el modo perimetral, el paquete volverá de nuevo a seguir una estrategia “greedy”

Evaluación

VCLCR solventa el problema de GPCR en el que se asumía que siempre había un nodo en los cruces, y si no era así se originaban bucles en los caminos de reenvío (tras alcanzar un *local maximum*). VCLCR detecta bucles y borra enlaces cruzados cuando es posible, incrementando en gran medida la tasa de envío de paquetes con respecto a GPSR o GPCR.

VCLCR sufre con redes particionadas y desconexiones frecuentes entre enlaces, llegando a perder paquetes como si de una fuga se tratara lo cual denota que aún está por desarrollar.

La mejora de VCLCR se hace notar siempre que existan enlaces cruzados. De no haberlos VCLCR rinde igual que GPCR, por lo que se podría decir que VCLCR es únicamente una mejora del algoritmo de recuperación en *local maximum* de GPCR. Además cuando se detecta que no existe en el momento de reenviar un camino hacia el destino según el algoritmo de recuperación el paquete se desestima directamente en lugar de conservarlo durante un periodo de tiempo limitado, en el que podría aparecer algún camino hacia el destino por el propio movimiento de los nodos,

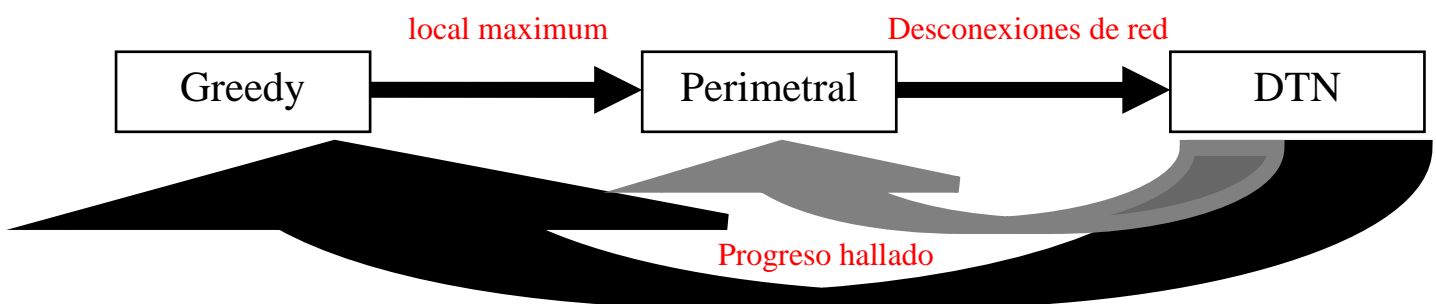
volviendo al algoritmo greedy pero habiendo desestimado ya el paquete.

2.4.17. GeoDTN + NAV (A Hybrid Geographic and DTN routing with Navigation Assistance in Urban Vehicular Networks)

El autor e información extendida sobre el protocolo se puede encontrar en la referencia siguiente, [Cheng, 2008]. Como información general sobre el protocolo comentaremos que el enrutamiento que realiza está basado en el posicionamiento geográfico y orientado a unicast. De tipo reactivo aplica métodos propios de redes DTN (Delay Tolerant Networks), e introduce y usa VNI (Intefaz Virtual de Navegación).

GeoDTN+Nav es un protocolo híbrido geográfico que explota la movilidad vehicular y los sistemas de navegación GPS. Este protocolo mejora a anteriores (GPCR, GPSR) ya que es capaz de estimar rupturas en la red y mejora el alcance de esas zonas de ruptura usando un procedimiento de *store-carry-forward* cuando es necesario.

Pretende ser un algoritmo híbrido entre métodos “greedy” [Karp, 2000], métodos perimetrales como GPSR y métodos propios de DTN (redes con cierta tolerancia al retardo). Introducen un método de detección de rupturas en la red para elegir cuál de los métodos anteriores se ha de aplicar en cada caso de reenvío. En primer lugar se intenta una táctica “greedy” hasta alcanzar un *local maximum*, momento en el que se pasaría a emplear el método perimetral para si es posible volver a recuperar el método “greedy”. Si se producen desconexiones y los anteriores métodos no son suficientes, se recurrirá al tercer método DTN, con el que se pueden distribuir paquetes incluso con redes fragmentadas con el ya mencionado método store-carry-forward.



Se propone una VNI para proporcionar información general de rutas para mejorar el retardo de reenvío. Esta interfaz permitiría integrar los diferentes tipos de navegadores y su información disponible. Se asume que se encuentra en todos los vehículos, siendo una interfaz poco pesada. Proporciona dos tipos de primitivas de información: ruta o destino y fiabilidad de dicha ruta. Un 0% significa que el vehículo se mueve al azar y un 100% significa que sigue estrictamente la ruta predefinida en el navegador. Los vehículos se dividen en grupos distintos, de manera que los autobuses por ejemplo, se encuentran en un grupo que sigue al 100% su ruta y dependiendo del grupo en el que se encuentre un vehículo concreto, hará broadcasting de las dos primitivas de información con valores adecuados al grupo.

Evaluación

Introduce un nuevo concepto interesante VNI, que es independiente tanto de GeoDTN+NAV, como de que el vehículo tenga uno u otro sistema de navegación incluido y por lo tanto la información que VNI proporciona, podría ser usado por otros protocolos para otros fines. En el caso de GeoDTN+NAV se utiliza para elegir el portador del paquete potencialmente mejor.

Dependiendo de qué tipo de vehículo sea un nodo concreto, tendrá unas necesidades (alcanzar un destino) y unas posibles variaciones en la ruta (en algunos vehículos la variación no es posible), y esto se utiliza como mejora en la información que se aporta a los vecinos para que tomen una mejor decisión en cuanto al siguiente nodo hacia donde reenviar. Tanto este algoritmo como los demás *greedy* y *store-carry-and-forward* son muy acertados para redes VANET. Como conclusión la evaluación del protocolo es muy positiva.

Los principales problemas podrían ser que asume que VNI estaría presente en todos los vehículos, independientemente del grupo de vehículos al que pertenezcan lo cual podría ser un problema hasta que llegara a estar totalmente extendido. Los autores propusieron, pero sin implementar, dos soluciones al problema de localización cambiante del destino, las cuales introducirían un mayor retardo y una mayor sobrecarga de red: *passive tracking* y *active predicting*. En la primera se envía hacia la localización del destino, conocida previamente y al alcanzar dicha localización, si se ha movido el nodo destino, se reenvía en la dirección en la que se movió. En la segunda solución, basándose en el identificador del nodo destino (contenido en el paquete), y en la

dirección y velocidad de movimiento del propio nodo destino, los nodos intermedios pueden predecir y recalibrar la localización del destino, además de participar en el reenvío de los paquetes. La diferencia fundamental con la primera es que los nodos intermedios tienen que realizar menos solicitudes de localización del destino, ya que en su lugar se predice la posición con la información de velocidad y dirección del destino que conocen.

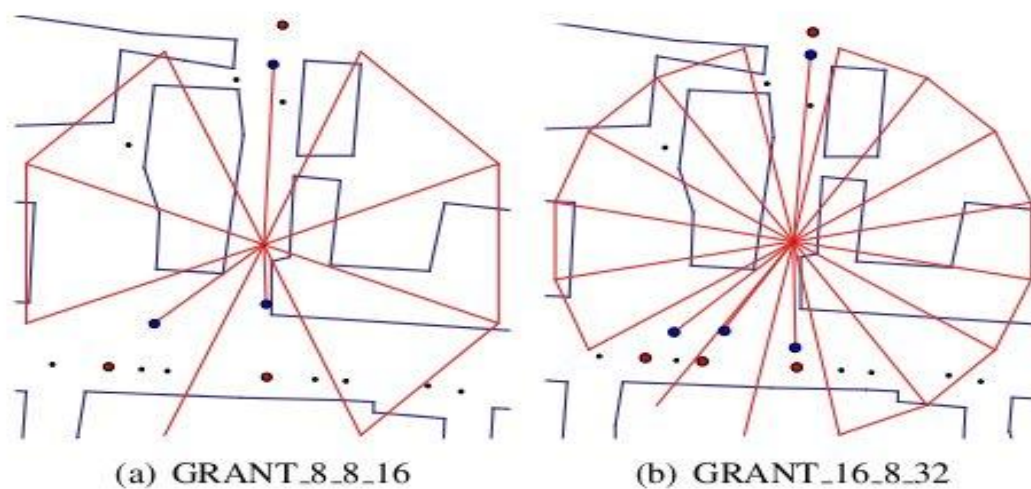
2.4.18. GRANT (Greedy Routing with an Abstract Neighbour Table)

Podemos encontrar información adicional a la que a continuación se expondrá en la siguiente referencia, [Schnauffer, 2008]. Brevemente podemos decir sobre el enrutamiento que realiza el protocolo que está basado en el posicionamiento geográfico y a su vez orientado a unicast. De tipo reactivo, su estrategia proviene de AODV así que también podría ser emplazado en los algoritmos que se desarrollaron a partir de este (reactivos descendientes de AODV).

GRANT es una combinación de una estrategia greedy basada en posicionamiento combinada con un algoritmo de tipo AODV para recuperación de un *local maximum*. Por defecto se empieza con un comportamiento “greedy” y al alcanzar el *local maximum* se cambia, y se usan los vectores de distancia de manera similar a AODV, haciendo broadcast de un paquete de solicitud, el cual incluye además de su posición y su *id* (identificador), los del destino. Los nodos intermedios reenvían o no según un algoritmo para al final obtener una ruta almacenada salto a salto por los nodos intermedios.

El núcleo de GRANT es la tabla de encaminamiento de vecinos abstracta (ANT), que separa el plano en x áreas con forma de sector circular e incluye solo un nodo representativo por cada área. El nodo correspondiente se almacena en la “tabla abstracta” en el lugar relativo a su área y se almacena como un vector. En el área en la cual no exista nodo se dejará vacío su lugar en la “tabla abstracta”. La ANT se añade a los beacon periódicos y en el nodo emisor se calcula un valor para cada uno de los vecinos a un solo salto y se elige el vecino que menor valor obtenga para ser el siguiente salto.

Variantes de GRANT: 8 y 16 celdas.



Evaluación

Introducir ANT en el beacon reduce la cantidad de información que se envía con respecto a anteriores algoritmos que incluían la tabla de encaminamiento completa. Ahora se comparte la tabla de encaminamiento “reducida” conteniendo la sobrecarga.

No necesita de mapas para averiguar si un nodo se encuentra en un cruce o no y la veracidad de esta información depende de que haya una densidad de tráfico suficiente. Si no hay nodos próximos y no se detecta que está en un cruce, no tiene importancia, porque el nodo habría perdido el valor como nodo de enrutamiento.

La estrategia de recuperación elegida AODV comparada con otros algoritmos perimetrales (GPCR[Lochert, 2005], GPSR[Karp, 2000]) tiene como inconveniente el que ha de realizar una inundación broadcast por la mayoría de nodos intermedios.

Las simulaciones realizadas por los autores dejan claro que GRANT se adapta muy bien a entornos de VANET urbanas.

2.4.19. VRR (Vehicular Reactive Routing algorithm)

Sobre este protocolo diremos a modo resumen que su enrutamiento está basado en el posicionamiento geográfico y orientado a unicast. Además actúa de forma reactiva aunque lo agruparemos con los basados en localización geográfica, ya que es un punto fuerte del protocolo. Podemos seguir la siguiente referencia para información adicional sobre el protocolo VRR, [Koubek, 2008].

Está especialmente diseñado para WAVE (Wireless Access for the Vehicular Environment) [IEEE 1609] y está integrado dentro de su pila de protocolos. Aprovecha el esquema multicanal de WAVE, usa el canal de control (CCH) para señalización y se apoya en uno de los múltiples canales de servicio (SCHs) para la distribución de la carga de datos útil. En los canales CCH se realiza el descubrimiento de ruta y el mantenimiento de dichas rutas.

VRR es un protocolo multicanal y usa el CCH para paquetes WSA (Windows Socket API) de petición y respuesta, y los datos de aplicación (paquetes IPv6) son enviados a través del canal SCH.

Para obtener una localización actual de los vecinos la trama WSA es utilizada para control y establecimiento de rutas, y se modifica para portar dicha información (4 bytes adicionales).

Para el descubrimiento de ruta se envían tramas RREQ (por el canal de control CCH) de petición haciendo *broadcast* mediante el algoritmo de *broadcasting* VRR que compara los vectores de movimiento, la velocidad de los nodos y la distancia desde la fuente. Se elige al nodo más lejano de la fuente, en la dirección y sentido conveniente para alcanzar al destino. Si el nodo elegido tiene una ruta hacia el destino, el nodo crea una trama RREP (por el canal de control también) hacia el origen y si por el contrario no tiene ruta hacia el destino, entonces hace una repetición *broadcast* de la petición RREQ hacia el destino empezando de cero el algoritmo y teniendo de nuevo en cuenta vectores de movimiento, velocidad y distancia desde la nueva fuente. Así hasta alcanzar un nodo con ruta hacia el destino. Al finalizar el algoritmo usa la ruta establecida salto a salto.

Evaluación

Está integrado en el estándar WAVE lo cual puede facilitar la estandarización del protocolo completo. Para el enrutamiento usa localización geográfica y la velocidad de los nodos, aspectos

que suelen resultar productivos en VANET, además utiliza una estrategia greedy también en la fase de descubrimiento de ruta. En conclusión usa unas cuantas medidas que a priori son efectivas en enrutamiento VANET. El problema es que la movilidad relativa entre nodos llevará a un nuevo establecimiento de ruta cada vez que se pierda el camino hasta el destino.

Proponen *límites en el broadcast, filtrado de paquetes de señalización* y algunas otras medidas que reducen en un 70% el retardo de descubrimiento de ruta, 90% menos de paquetes necesarios para descubrimiento de ruta, reducción de jitter 80% y reducción de tiempo de transmisión 85% con respecto a AODV.

Una limitación bastante importante encontrada en la simulación es que se han empleado el canal de control CCH y únicamente uno de los múltiples canales de servicios SCH definidos en WAVE. Habría que evaluar de qué manera afecta al rendimiento usar múltiples canales de servicios y si VRR aprovecha las posibilidades de incrementar los canales SCH empleados, lo cual es una de las ventajas que aporta WAVE.

La velocidad de simulación en desplazamiento de nodos de hasta 15m/s es válida para entornos urbanos y una prueba del protocolo a velocidades superiores resultaría interesante para poder comparar los resultados con los de carreteras más rápidas.

2.4.20. RVBT (Road-Based using Vehicular Traffic information routing)

En este caso dejaremos constancia del siguiente enlace, [Nzouonta, 2008] en el que podremos encontrar más información añadida a la que a continuación se mostrará sobre RVBT. Del tipo de enrutamiento que realiza diremos que está basado en el posicionamiento geográfico, usa la información de tráfico y está orientado a unicast. Además, y de manera similar a VRR [Koubek, 2008], el algoritmo tiene una parte reactiva que reacciona bajo demanda.

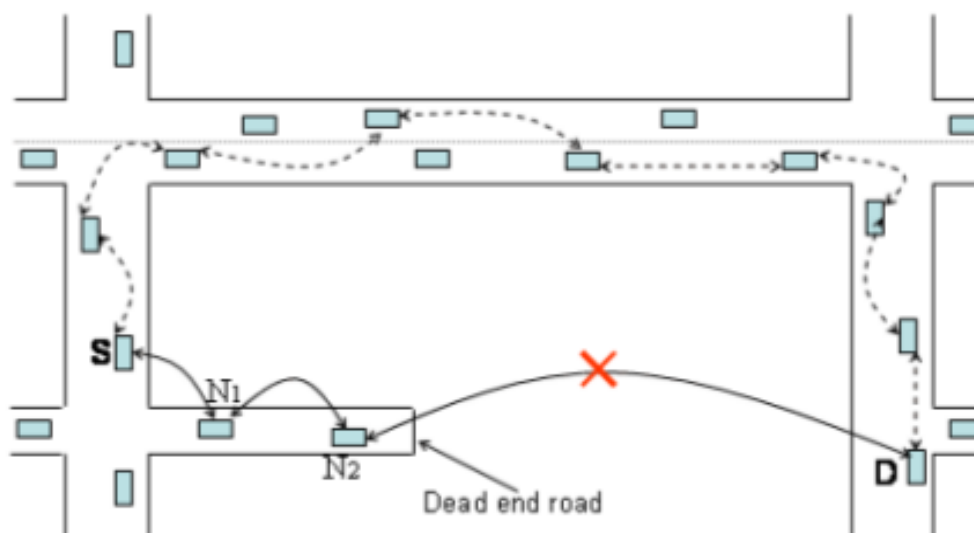
El protocolo RBVT aprovecha la información de tráfico vehicular en tiempo real para crear rutas basadas en carreteras, que consisten en sucesiones de intersecciones viales que tienen, con una alta probabilidad, conectividad de red a lo largo de dichas vías. A partir de ahí se utiliza un *forwarding* basado en posicionamiento para reenviar paquetes entre las intersecciones, siguiendo su orden en la ruta, reduciendo la sensibilidad del camino elegido al movimiento de los nodos individualmente.

Para redes densas con alta conectividad se ha optimizado el *forwarding* usando una elección distribuida en cada nodo intermedio, del próximo vehículo hacia el que reenviar, basándose para la elección en una función que prioriza en función de múltiples criterios y teniendo en cuenta radios de propagación no uniformes que dependen de la posición de cada nodo.

Se han diseñado dos versiones del protocolo una proactiva (RBVT-P) y otra reactiva (RBVT-R). Una vez que se establece la ruta idónea, todos los nodos pueden reenviar al nodo situado más cercano al destino y que se encuentre antes de la siguiente intersección.

La versión reactiva gana en cuanto a tasa media de envíos realizados satisfactoriamente y la proactiva en tiempo medio de retardo.

La topología de la red basada en las carreteras se construye mediante unos paquetes de conectividad (CPs) que atraviesan los segmentos de vías entre intersecciones almacenando donde terminan dichas vías y devolviendo la información. Estos paquetes se generan de manera periódica por algunos nodos seleccionados aleatoriamente. Cada nodo decide cuando generar un CP basándose en un número estimado de vehículos en la red, la información histórica de tráfico que está almacenada en el nodo y el tiempo desde que se recibió el último CP actualizado.



(b) El enrutamiento basado en localización, puede enrutar paquetes hacia puntos sin salida, causando una sobrecarga innecesaria en la red y retardos más largos en la transmisión de los paquetes. En vez de reenviar los datos por el camino punteado, el enrutamiento basado en localización básico envía los datos a N1 y N2 siguiendo el camino más corto entre S y D por una carretera sin salida.

Evaluación

RBVT-P obtiene tiempos de retardo un 85% menores que AODV y RVBT-R tiene éxito en un 40% más de envíos que AODV.

Utiliza una estrategia greedy [Karp, 2000] mejorada, muy interesante con alta movilidad y que elimina la sobrecarga innecesaria que se genera en el caso concreto de enrutamiento hacia carreteras sin salida, siendo estos casos un porcentaje mínimo sobre las necesidades generales de enrutamiento. Además el envío de paquetes a lo largo de calles previene de errores de envío por obstáculos intermedios como pueden ser los edificios situados entre carreteras.

Por otro lado el enrutamiento basado en intersecciones mejora otros modelos en cuanto a que las intersecciones son puntos fijos y al establecer una ruta a través de estas, la ruta permanecerá constante a lo largo del tiempo y mediante un avance *greedy* llegaremos al destino. Por ejemplo el caso anteriormente analizado (VRR) basa su enrutamiento en nodos (puntos móviles) y al cambiar la posición relativa entre ellos habrá hallar de nuevo una ruta adecuada.

Los autores realizaron simulaciones con movimiento de nodos de entre 40 y 88 kilómetros por

hora, las cuales representan cifras reales, por lo que sus buenas estadísticas se pueden tener en cuenta para que el protocolo obtenga una buena valoración.

La veracidad y la correcta y rápida actualización de la información histórica del tráfico y la consiguiente estimación correcta del tráfico actual, harán que la decisión de dirección de enrutamiento sea la correcta. Creo que es importante ponderar la importancia de las informaciones que el protocolo maneja y la veracidad de estas, de forma que las decisiones de enrutamiento finales no dependan en exceso de algo tan aleatorio como la variación del tráfico y la fiabilidad que tenga esa información, siendo otros datos como la posición de las intersecciones y la velocidad y dirección de los nodos vecinos, informaciones totalmente fiables y útiles para hallar rutas eficientes.

Un punto negativo es que no incorpora una mejora de greedy que ya se utilizaba en GpsrJ+ [Lee, 2007]. Si un paquete se dirige en un sentido de la carretera y atraviesa un cruce, con RBVT el paquete tiene que pasar necesariamente por un nodo situado en la intersección, mientras que en GpsrJ+ si el paquete seguía recto atravesando el cruce (no necesita redirección) podía saltarse el nodo de la intersección reduciendo en un salto por intersección el camino.

2.4.21. TO-GO (Topology-assist Geo-Opportunistic Routing in Urban Vehicular Grids)

A modo resumen diremos del protocolo que el enrutamiento que realiza lo hace basándose en el posicionamiento geográfico de los nodos, ayudado por información topológica auto-adquirida de la red y que además está orientado a unicast. Tiene su parte reactiva como los dos anteriores protocolos. Dejamos como anotación la referencia correspondiente [Lee, 2009] donde se puede encontrar información adicional a la que a continuación se va a presentar.

TO-GO pretende superar los problemas en entornos urbanos que tiene el reenvío “greedy” debidos al movimiento de nodos, las obstrucciones entre vehículos por objetos urbanos... Para ello se utiliza un conocimiento topológico adquirido mediante un beaconing de 2 saltos de distancia,

para seleccionar el mejor destino a través del que direccionar un paquete. Además para la selección del nodo a quién se reenvía se toma en cuenta la calidad del canal *Wireless* con cada nodo, lo que mejora de manera significativa el rendimiento en cuanto a errores y situaciones de interferencia.

Introduce el enrutamiento “oportunista” para solucionar el problema que ocurre al reenviar, con el método “greedy”, a nodos al límite del alcance, donde muchas veces se pierden los paquetes y hay una gran atenuación de señal. Para ello se busca un subgrupo local de vecinos, que se sitúen en una zona determinada y que maximicen el “avance esperado del paquete” (EPA). El método no garantiza el envío, pero intenta reducir el número de reenvíos intermedios. Es una evolución del beaconing de 2 saltos de distancia que se introdujo en GpsrJ+ [Lee, 2007]. Las diferencias radican en la zona determinada donde se eligen los nodos que maximicen el EPA. Esta zona se encuentra ubicada entre la fuente y un *nodo objetivo*, en lugar del nodo destino como en GpsrJ+.

Probaron que es suficiente con conocer los nodos más lejanos (y en diferentes carreteras) a un *nodo en un cruce*, para saber cuál es el mejor nodo hacia el que reenviar. Esto reduce la sobrecarga inherente a los beacons de 2 saltos, además de que imita el comportamiento de los *junction node's* en GPCR [Lochert, 2005].

Evaluación

Las intensivas simulaciones confirman que es un protocolo superior en cuanto a su robustez frente a errores y pérdidas de paquetes en comparación a anteriores protocolos basados en información topológica. Demuestra ser útil en entornos de VANET's urbanas y TO-GO cobra valor cuando el canal deja de ser óptimo ya que evalúa la calidad de la señal.

El método *beacon de 2 saltos* aporta información topológica pero introduce a su vez una importante sobrecarga con respecto al beacon simple. Al final se le dota de inteligencia y capacidad de decisión para enrutar a los nodos en las intersecciones (como en GPCR [Lochert, 2005]) y no es capaz de ahorrarse el salto del nodo situado en la intersección como se hacía en GpsrJ+ [Lee, 2007] cuando los paquetes atraviesan las intersecciones sin cambiar de dirección.

2.4.22. SPANER (wireless multihop communication in SParse vehicle ad-hoc Networks Routing)

Este nombre se lo hemos asignado al protocolo, que carecía de uno propio para referirnos a él de manera concreta. En la siguiente referencia, [Oka, 2010], se puede encontrar información adicional sobre el protocolo. De forma breve comentaremos que el algoritmo de enrutamiento del protocolo actúa basándose en el posicionamiento geográfico, ayudado por información topológica del GPS. Siendo de tipo reactivo como los protocolos anteriores analizados, está también orientado a unicast.

SPANER es una combinación de métodos de enrutamiento, por un lado mediante una determinación dinámica de nodos a través de los que avanzar y por otro lado utilizando una táctica *store-carry-forward* en los momentos en los que se circule por vías con nula densidad de nodos y redes inconexas.

Parte del concepto de aprovechar que la topología vial es fija, no como la de la red que por sus nodos en movimiento es variable. Introduce varias ideas como por ejemplo que la localización de un vehículo se da mediante el identificador de calle en el que se encuentra y la distancia que guarda con respecto a un punto de esa calle. Otra novedad basada en la misma idea es que una ruta de transmisión multisalto no se especifica como una secuencia de identificadores de nodos a atravesar, sino como una secuencia de identificadores de calles, a lo largo de las que se debe transmitir el paquete para llegar al destino. Otro concepto novedoso, es que el destino de un paquete se especifica por una localización, no por un identificador, por lo que el destino pueden ser uno o varios nodos fijos o móviles que se encuentren en una zona.

El enrutamiento se realiza salto a salto comprobando en cada nodo el vecino hacia el que se reenvía de manera que vaya siguiendo la *secuencia de calles* especificada en el paquete, y en caso de no tener ninguno vecino mejor que sí mismo, se conserva el paquete hasta encontrar un nodo adecuado que circule por la *secuencia de calles*.

Evaluación

No se requiere de ninguna sobrecarga para la detección de rutas gracias a los sistemas de

navegación que aportan dicha información.

Para comenzar la transmisión se requiere la localización de los vecinos, que se obtiene de manera reactiva mediante una solicitud y su correspondiente respuesta de todos los vecinos que han recibido dicha solicitud. No especifica como la localización del destino llega al origen, y los autores partían del supuesto de que el destino es fijo (puede ser un *nodo* o una *zona* que contenga nodos móviles), en el caso de que el destino sea un nodo único y móvil (que podría ser bastante habitual) seguramente habría que añadir alguna modificación al protocolo.

Un gran problema, que de estar solucionado hubiera servido para terminar de confirmar a este protocolo como idóneo, es que no se ha simulado para contrastar resultados. Aún así, la metodología del protocolo creo que es muy acertada y que obtendría buenos resultados en la simulación.

CONCLUSIONES

Como conclusión de los protocolos que utilizan la información geográfica para enrutar y aunque posteriormente al final del documento volveremos a insistir en conclusiones sobre el apartado, diremos brevemente que es el grupo en el que más recursos se están invirtiendo desde todos los frentes de investigación por todo el mundo, ya que a priori se trata de la metodología más eficiente y eficaz y como resultado es el grupo de protocolos en el que más se está evolucionando con diferencia y mayor número de protocolos se pueden encontrar.

Entre las estrategias fundamentales, destaca la “greedy” [Karp, 2000], que fundamenta el avance del paquete a transmitir recortando distancia hacia el destino salto a salto eligiendo como siguiente nodo hacia donde transmitir el que más avance represente de todos los vecinos. Este método por sí solo resulta poco efectivo en muchos casos, por lo que hay que complementarlo con otros para que la decisión de enrutamiento sea la mejor posible.

Muchas son las tácticas empleadas a posteriori para mejorar el enrutamiento, pero la mayoría de ellas tratan de aportar más información a los nodos para que decidan. Tan importante como valorar qué datos pueden aportar mejoras de decisión, es valorar qué métodos se emplearán para conocer esos datos. La estimación del tráfico según carreteras es un valor que podría aportar

muchísima precisión al enrutamiento, pero ¿cómo calcular esa estimación? Hay dos posibilidades: instalación de sensores por todas las vías capaces de transmitir el tráfico a los nodos, o un cálculo distribuido realizado por los propios nodos. La primera es improbable por el coste de despliegue y la segunda es asumible dando por hecho que los nodos dispondrán de capacidad de proceso y transmisión, lo cuál no quita que deba existir un buen algoritmo capaz de estimar correctamente y distribuir a todos los nodos un valor que se aproxime a la realidad y que resulte útil para un correcto enrutamiento, y de momento estos son muy escasos (GyTAR [Jerby, 2007]) y obtienen datos poco fiables. Ahí existe un importante reto para el enrutamiento.

Además de la información de tráfico es fundamental que se informe a los vecinos de la velocidad y dirección con la que se desplaza cada nodo (GSR, [Lochert, 2003]), con ello se puede estimar el tiempo de vida de cada enlace, eligiendo posteriormente el que proporcione un mayor avance (greedy) y vaya a estar activo durante un mayor tiempo. GPSR+AGF [Naumov, 2006] utilizó la misma información de velocidad y dirección para determinar a la hora de enviar cada paquete, si el nodo vecino x continua estando dentro de la zona de alcance de comunicación. Estas dos opciones son bastante similares y tienen un mismo objetivo, evitar restablecimiento de enlaces en la mayor medida posible para contrarrestar las características de movilidad VANET y minimizar tráfico de control que sobrecargue de manera innecesaria la red.

2.5 Protocolos Híbridos

Como su nombre indica aquí se analizarán protocolos que pretenden aprovecharse de las ventajas de unos y otros métodos, perjudicándose de sus inconvenientes en la menor medida posible, y maximizando el aprovechamiento de sus ventajas. Fundamentalmente son híbridos entre protocolos reactivos y proactivos y en su mayoría utilizan la parte proactiva para comunicaciones dentro de subredes pequeñas y nodos cercanos al origen y tienen la parte reactiva para enrutamiento de larga distancia y con mayor cantidad de nodos.

Por lo general estos protocolos no se desmarcan demasiado de los clasificados como clusterizados, ya que los últimos, utilizan normalmente distintos algoritmos para enrutamiento dentro de la celda, que para comunicaciones intercluster, de una manera similar a como comentamos en el párrafo anterior, hacen los protocolo híbridos. Es el caso por ejemplo del protocolo HRPLS [Pandey, 2006] que se estudia más adelante. En él las comunicaciones en las cuales la distancia internodo es menor a un número de saltos K , se realiza mediante algoritmos reactivos, mientras que a partir de ahí la metodología empleada será de tipo proactiva. Además en HRPLS se emplea un algoritmo llamado ELICD que jerarquiza y divide la red en sectores o celdas, jerarquizando los nodos de manera que los categorizados como nodos backbone son los que se encargan de mantener a los demás nodos dentro de una celda u otra, y de realizar los handover entre celdas en caso necesario. Como se puede ver y como se ha comentado anteriormente, la diferencia entre unos protocolos y otros (híbridos y clusterizados) puede ser casi inexistente.

Para nuestro estudio comenzaremos con el protocolo híbrido clásico, ZRP [Pearlman, 1997] en el que ya se empleaba la jerarquización de nodos, y se designaba a algunos como “border vehicles”, situados en la frontera con otras celdas y que son los encargados de transmitir las peticiones de establecimiento de ruta de los demás nodos, hacia fuera de la celda.

Después se analizan protocolos HWMP [Strutt, 2006], HRPLS [Pandey, 2006] y LANMAR + DFR [Lee, 2006] que van siendo más modernos y más complejos, pero que en su parte reactiva siguen teniendo una fuerte base de AODV [Perkins, 2003].

2.5.1. ZRP (Zone Route Protocol)

El protocolo realiza un enrutamiento basado en el posicionamiento geográfico de los nodos y además está orientado a unicast. Es un protocolo híbrido entre proactivo y reactivo, aunque también podría ser insertado en la clasificación de protocolos clusterizados. Siguiendo la referencia [Pearlman, 1997], podemos encontrar información adicional sobre el protocolo

Es un protocolo híbrido que se adapta a diferentes topologías y características de redes. Puede actuar como una red proactiva en escenarios pequeños (con pocos nodos y que se mueven rápido entre ellos) o como reactiva. Se adapta al escenario particular de red con una configuración apropiada y puede funcionar siendo tan efectivo (incluso a veces más) que protocolos puramente reactivos o proactivos. En situaciones donde el comportamiento de red varía según zona, el rendimiento de ZRP se puede ajustar de manera precisa según la zona de enrutamiento del nodo. El protocolo define un área alrededor de un nodo (con un número de saltos), y usa dos protocolos distintos: IARP (Intrazone) para comunicación en el interior de un área, e IERP (Interzone) para la comunicación entre distintas áreas. De esta forma el protocolo actúa de manera proactiva en el interior de la zona y de manera reactiva si el enrutamiento se produce hacia fuera de la zona del emisor.

La componente reactiva de ZRP usa un mecanismo basado en multicast “bordercast” (vehículos situados en la frontera de la zona interna) para propagar las peticiones de ruta “route queries” en toda la red de manera eficiente, en vez de confiar en el broadcast vecino a vecino de los protocolos reactivos tradicionales. ZRP proporciona un gran beneficio en redes donde el broadcast confirmado entre vecinos es ineficiente o casi imposible.

Evaluación

Permite un ajuste fino en cada nodo de la red configurando de manera adaptativa su radio óptimo de zona. La adaptabilidad de ZRP puede ser usada para manejar las comunicaciones en protocolos intercluster e intracluster, de ahí el que pueda ser introducido en los protocolos de tipo *cluster*.

Hay un mejor aprovechamiento del ancho de banda con poca pérdida de alcance porque se

toman pocos vehículos para hacer reenvíos de mensajes mediante *broadcast*.

El enrutamiento de paquetes a través de los nodos frontera (*border vehicles*) hace que al final se sobrecarguen las comunicaciones en estos pocos vehículos, se necesita una simulación exhaustiva para comprobar hasta qué punto se concentra el tráfico provocando “cuellos de botella” y si por el contrario resulta más eficiente que el broadcasting entre vecinos.

2.5.2. HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol)

En primer lugar dejaremos constancia de la referencia correspondiente a HWMP donde encontrar información extra sobre el protocolo, [Strutt, 2006]. Brevemente diremos que HWMP es un protocolo híbrido orientado a unicast.

El protocolo tiene dos componentes, una de ellas basada en AODV de tipo reactiva y otra componente basada en una estructura de árbol de tipo proactiva. La combinación de ambas activa una óptima y eficiente selección de caminos en una amplia variedad de redes *mesh* (mallada) con y sin estructura.

El protocolo usa cuatro primitivas de enrutamiento: RREQ, RREP, RERR, RANN. Las dos primeras son para el enrutamiento bajo demanda y RREQ y RANN para el proactivo de manera que se pueda formar el árbol de enrutamiento. Por otro lado RERR es una primitiva utilizada para comunicar que ha habido un error.

El modo bajo demanda permite que los nodos se comuniquen mediante rutas directas entre ellos. Se emplea en localizaciones donde no se ha configurado un nodo como raíz de un posible árbol.

Evaluación

Un diseño que encaja en un estándar podría facilitar su implantación si se lograra un buen

rendimiento, pero a falta de cualquier tipo de simulación, un AODV simple para unas situaciones y un protocolo proactivo bastante sencillo para otras situaciones, cuando por lo general no rinden bien los algoritmos proactivos en VANETs, no parecen razones suficientes para calificarlo como útil en este tipo de redes.

2.5.3. HRPLS (Hybrid Routing Protocol for Large Scale mobile ad-hoc networks)

De HRPLS comentaremos brevemente que el protocolo realiza un enrutamiento basado en el posicionamiento geográfico de los nodos y que está orientado a unicast. Híbrido entre proactivo y reactivo aunque como los demás híbridos no se desmarca demasiado de los clusterizados. Tiene una fuerte herencia de AODV [Pandey, 2006]

Al protocolo también se le conoce como “*PLB-AODV in MBN*”. Cuando el destino está a una distancia menor a un número de saltos K , el protocolo de manera proactiva usa *prediction location-based routing* [Shah, 2001] (PLB) para el enrutamiento unicast. Si por el contrario la distancia es mayor el protocolo se adapta y se usa AODV [Perkins, 2003].

Además el protocolo divide la red en dos subredes jerárquicas llamadas MBN (Mobile Backbone Networks). En estas redes hay dos tipos de nodos, por un lado los que tienen capacidad *backbone* (columna vertebral), con un radio más potente de transmisión y funcionalmente más capaces, y por otro lado los nodos normales. Los distintos niveles transmiten en diferentes canales para minimizar las interferencias entre niveles.

También se emplea un algoritmo de clusterización llamado ELIDC en el que solo los nodos Backbone se encargan de la sectorización. Son los nodos de control de cada celda.

Como PLB envía paquetes “hello” de actualización a vecinos, la información que contienen es la necesaria para realizar la clusterización y combinados con el esquema propuesto de enrutamiento resulta en que la sobrecarga final es casi nula.

Evaluación

El aumento de movilidad (de 1 a 20 m/s) influye muy poco en cuanto a tasa de paquetes que no alcanzan el destino en comparación con PLB-AODV y AODV simple. Esto es algo muy positivo para VANETs ya que la variación de la velocidad en los nodos es un tanto aleatoria y cuanto más estable sea el protocolo mejor.

Los nodos *backbone* tienen más potencia de transmisión, pero en redes VANET no hay problemas en cuanto a posibilidades de usar energía para la transmisión, por lo que todos los nodos podrían transmitir a esa máxima potencia. Aún así el limitar los nodos con la máxima potencia cobra importancia a la hora de evitar interferencias y esa puede ser una buena razón para emplear este método.

El esquema empleado en el caso reactivo es demasiado simple, AODV [Perkins, 2003]. Algún protocolo reactivo más avanzado completaría el protocolo.

Un problema de PLB es que aunque puede aportar QoS, genera paquetes de actualización redundantes que se traducen en sobrecarga de red.

2.5.4. LANMAR + DFR (Direction Forward Routing)

En la referencia asociada al protocolo, [Lee, 2006], encontraremos información adicional sobre el algoritmo de la que a continuación se va a mostrar. Adicionalmente y como resumen diremos que LANMAR es un algoritmo híbrido al que se le añade una mejora (DFR) y además utiliza información de localización GPS para localizar a los nodos que conforman la red.

LANMAR es un protocolo proactivo que usa unos nodos de referencia para hacer el seguimiento de subredes formadas por nodos que tienen un interés común y que se mueven juntos como grupo. En cada subred se elige un representante y se usa una IP para direccionar que consiste en un identificador de grupo (subred) y un identificador de host.

El protocolo LANMAR está soportado a su vez por dos protocolos de enrutamiento

cooperantes. Uno de ellos que opera hasta un límite de saltos de manera proactiva (FSR-Fisheye Routing [Pei, 2000]) y una parte reactiva (LMDV) que propaga el camino para alcanzar cada punto de referencia por toda la red. Como resultado se mantienen dos tablas de enrutamiento en cada nodo: una de enrutamiento local con rutas directas a todos los nodos cercanos y otra con rutas hacia los puntos de referencia. Así si el destino se encuentra en las proximidades se envía directamente y si no, se envía al punto de referencia correspondiente a la subred.

Como mejora, los autores introducen el *Direction Forward Routing* para superar el problema que observaron de que la información de posición de los nodos vecinos estaba desfasada rápidamente aunque se hubiera actualizado recientemente debido al movimiento del nodo “predecesor” al destinatario del paquete. La mejora de DFR consiste en que cuando se mueve un nodo se actualiza el camino de enrutamiento y en el nodo previo al destino no solo recuerda al nodo destino, sino que también se almacena la dirección hacia donde se ha movido el destino. Así si el nodo se mueve y el envío hacia ese nodo falla, se hace un envío hacia un nodo en esa dirección mejor situado. Si la red es suficientemente densa, el envío direccional recuperará la mayoría de los fallos de envío simples.

Existen dos modelos posibles en DFR para el procesamiento de la dirección:

- El procesamiento direccional implica que los nodos tienen una antena direccional y están equipados con una brújula para orientar la antena. Este esquema solo funcionaría en exteriores debido al direccionamiento de la antena.
- La segunda consistiría en que hubiera un sistema de coordenadas locales que permitiera a los nodos estar localizados y referenciar a los demás nodos. Una solución es el sistema global de posicionamiento GPS en el que cada nodo periódicamente informaría a los demás nodos de su posición y la otra solución sería establecer unos nodos (RFIDs) que mediante radiofrecuencia informen de una identificación a los nodos en un determinado radio y dichos nodos puedan procesar su posición relativa a los RFID.

Evaluación

Existen varias posibilidades de procesamiento de la dirección que dejan alternativas a varios modelos. Para la solución que requiere de la señal GPS pueden emplear la experiencia de protocolos basados en localización.

Con alta densidad de nodos se observan buenos resultados a velocidades de entornos urbanos gracias a DFR. Además la tasa de paquetes que alcanza el destino en LANMAR aplicando DFR aumenta a un 95%, desde el 60% inicial sin la mejora.

Las velocidades de simulación alcanzan un máximo de 16 m/s, poco reales fuera de entornos urbanos pero aún así aceptables.

A nivel económico, la solución de los RFIDs implicaría unos costes de infraestructuras que alguien tendría que asumir y parece ser una solución menos viable. La información GPS sería útil con una alta implantación en los nodos, que aunque hoy en día se encuentra en la mayoría de los vehículos, no lo están en dispositivos que pudieran adaptarse a redes VANET, por lo que la implantación habría que empezarla prácticamente desde cero, al igual que los protocolos basados en localización. Aún así es una solución más viable que la de los RFIDs.

CONCLUSIONES

De los protocolos híbridos diremos que es uno de los grupos en los que menos recursos se han invertido. Fruto de ello es que realmente existen pocos protocolos y debido a las escasísimas simulaciones que hay realizadas resulta prácticamente imposible determinar cuál de los analizados resulta apropiado para las VANET.

Personalmente me resulta raro que no sea este grupo uno de los que más ha avanzado, ya que normalmente las soluciones técnicas que se aplican en ingeniería en muchos casos, suelen ser “soluciones de compromiso”, es decir, soluciones que cogen las ventajas de cada tipo de metodología existente y las combinan para utilizarlas en los entornos más adecuados para cada una de ellas, maximizando las ventajas y minimizando las desventajas en cada caso. Esa parece ser la razón fundamental de implementar protocolos híbridos entre unos reactivos y otros proactivos, pero parece ser que la parte proactiva (poco eficiente en entornos VANET) pesa demasiado en estos protocolos debido a la característica sumamente dinámica de las redes vehiculares, y o bien no terminan de decidirse los desarrolladores, o bien realmente los resultados que arroja la parte proactiva no compensan la fusión de ambas metodologías.

Aún así merece la pena destacar al protocolo LANMAR+DFR, que además de utilizar dos partes, una proactiva y otra reactiva, propone utilizar la información de localización geográfica como complemento y en su caso se utiliza para realizar un seguimiento del nodo destino, que por

supuesto durante la transmisión de un paquete puede permanecer en movimiento y cambiar el lugar geográfico que ocupaba en el instante en el que se envió el paquete.

Definitivamente creo que una futura solución de enrutamiento tiene que pasar por varias metodologías, una fusión de protocolos que se apliquen dependiendo del entorno.

Capítulo III

Protocolos de enrutamiento multicast

3. Multicast – Destinatario múltiple.

A partir de aquí analizaremos protocolos dirigidos a alcanzar a varios nodos, es decir, el destino de los paquetes es múltiple. En un caso el objetivo son los nodos situados en una zona geográfica (geocast), en otro el objetivo es un grupo de nodos (multicast) y en el último el objetivo son todos los nodos de la red (broadcast).

Hay distintas utilidades para las que están diseñados y que podrían dar cabida a múltiples servicios. Si nos centramos en los geocast podemos decir que están destinados principalmente a aumentar la seguridad vial. Por ejemplo en caso de accidente, un vehículo que observe la situación y active la intermitencia de emergencia podría alertar a todos los vehículos situados en la “zona geogast” posterior al propio emisor y dentro del mismo carril, para que estos alertados reduzcan la velocidad. Otra posibilidad sería la de instalar una infraestructura de emisores en puntos críticos, de manera que se avisara a los vehículos en la “zona geocast” inmediatamente anterior al punto peligroso de que están próximos, y deben reducir la velocidad. Sería una información complementaria a las señales viales.

Para el caso de los multicasting, podrían estar destinados a distribución de información a grupos concretos en situación de emergencia, por ejemplo, distribución de avisos entre coches de

policía, ambulancias, bomberos, etc. Para el caso de los broadcast, un accidente urbano en un cruce vial sería un buen lugar para aplicar un protocolo broadcast que se extendiera rápidamente a todos los nodos cercanos para informar del accidente.

En este caso procederemos a analizar los protocolos geocast, luego nos centraremos en los multicast y por último analizaremos los broadcast.

3.1 Protocolos GEOCAST

Dentro de los protocolos geocast se engloban todos aquellos en los que los destinatarios de los paquetes son todos los nodos situados en una zona geográfica, que comparten un área y unas coordenadas similares que están dentro de unos límites (derivados de la aplicación para la que se vaya a utilizar).

Todos estos protocolos asumen que cada nodo dispone de un dispositivo de localización geográfica GPS, con el que poder situarse dentro o fuera de la zona geográfica objetivo, aceptando o descartando el paquete oportuno.

Para este caso comenzaremos analizando una serie de protocolos, todos ellos bastante similares: GeoRouting [Navas, 1996], LBM [Young-Bae, 1999] [Young-Bae, 2002] GeoTORA [Young-Bae, 2000]. Posteriormente nos centraremos en DUHGP [Briesemeister, 2000], ZOR [N. Faisal, 2004], IVG [Bachir, 2003] y GeoGRID [Liao, 2000] los cuales están más evolucionados y sectorizan en mayor medida la zona de emisión, dividiendo la carretera en dos zonas según los correspondientes sentidos, intentando así evitar la emisión a zonas del sentido contrario, siempre que dicha emisión sea prescindible.

3.1.1. GeoRouting

De este protocolo comenzaremos diciendo que su referencia es [Navas, 1996], donde podremos encontrar más información que la que a continuación se va a plasmar sobre el protocolo. Además diremos como resumen de GeoRouting que realiza un enrutamiento de tipo geocast, y que para ello

realiza una localización de nodos mediante su posición geográfica.

Nos encontramos ante uno de los primeros protocolos que empezó a utilizar la localización geográfica para enrutar paquetes.

Definía el concepto de GeoNode, que consistía en un nodo dentro de la zona geocast que recibía la responsabilidad de difundir el mensaje enviado a dicha zona. La zona geocast se definía como un polígono que recorría el límite del área y que se describía con las coordenadas de los bordes.

Otro componente importante son los GeoRouters, que coordinan varios GeoNodes y la suma de sus *service areas* (*zonas de trabajo*). Entre GeoRouters se habla GeoRip, de manera similar al RIP entre encaminadores, y con él se intercambiaban información sobre las *service areas* de cada GeoRouter.

En un principio se definió para áreas extensas, aunque la alta movilidad bastante probable en una VANET no se tuvo en cuenta en la época en la que se implementó.

Evaluación

Como innovador que fue este protocolo aportó importantes ideas al enrutamiento futuro, pero en sí mismo está prácticamente sin desarrollar ya que data de 1996. Una de esas ideas innovadoras fue la de adaptar RIP que ya estaba implementado a GeoRip y además definir “representantes zonales”. Y la fundamental de todas fue la de referenciar zonas, nodos, representantes... con el posicionamiento geográfico. Además fueron de los primeros en observar la utilidad de diseñar un protocolo capaz de transmitir a una zona limitada.

Pero en conclusión y a la hora de llevarlo al entorno VANET no es aplicable a redes con alta movilidad ya que fue un aspecto que para nada se tuvo en cuenta al diseñar GeoRouting, además de que es muy simple en comparación con los actuales, por lo que aunque es útil para los desarrollos posteriores de protocolos, queda descartado de cara a su utilidad en VANETs.

3.1.2. LBM

De este protocolo dejaremos presentes dos referencias asociadas, [Young-Bae, 1999] y [Young-Bae, 2002]. Consultándolas podremos encontrar más información que la que a continuación se va a plasmar en el documento. Además diremos a modo de resumen que sus autores definen tres opciones de protocolos geocast similares, y que por supuesto usan la información de localización geográfica GPS, ya que nos encontramos dentro del grupo de protocolos con esa característica.

En las 3 soluciones propuestas, los nodos intermedios reenvían la información hacia la zona geocast de destino si dichos nodos se encuentran en la “forwarding zone” (FZ). Estos 3 métodos difieren en la forma en la que se define dicha zona, dentro de la que se decidirá si se reenvía o no:

- ⤴ Zona estática: FZ será el rectángulo mínimo que contenga la fuente y la zona geocast de destino. Por lo tanto todos los nodos intermedios contenidos en el rectángulo podrán reenviar.
- ⤴ Zona adaptativa: cada nodo i decide si reenvía el paquete geocast hacia el siguiente nodo j (igual que en el anterior), pero si decide enviarlo modificará la FZ contenida en el paquete de manera que ahora será más pequeña y será ahora el rectángulo mínimo que contenga a j y la zona geocast de destino.
- ⤴ Distancia adaptativa: no se incluye la FZ explícitamente en el paquete geocast. Se incluyen datos de la zona geocast (ZG), el centro de la ZG y las coordenadas de la fuente. A partir de ahí cada nodo toma la decisión correcta según su posición y si se encuentra o no en la ZG.

Evaluación

Aporta distintas soluciones que pueden ser útiles según escenarios concretos. La primera y segunda soluciones podrían ser más útiles para espacios abiertos, autovías, etc., ya que la forwarding zone no tiene en cuenta que puede haber objetos intermedios que impidan la transmisión. La tercera solución es adaptativa y podría modificarse para utilizar algún mapa que ayudara a determinar si hay edificios intermedios y determinara entonces la FZ hacia donde interese.

Sin tener en cuenta el problema de los posibles elementos intermedios que dificulten la transmisión, los algoritmos basados en la “forwarding zone” permiten conseguir exactitud y

eficiencia en el envío hacia la “geocast zone” sin renunciar a reducciones de sobrecarga derivadas de reducir la zona de inundación, pero aún así LBM es uno de los protocolos más básicos y antiguos geocast.

Aparentemente, como no usa la estrategia greedy (enviar al más lejano alcanzable en dirección hacia la zona), realiza muchos saltos nodo a nodo pasando por todos los intermedios, con los consiguientes retardos en calcular “forwarding zones” y retransmisiones en cada uno de ellos.

3.1.3. GeoTORA

Para comenzar con el algoritmo diremos que es un protocolo geocast que toma su base del protocolo TORA [Park, 1997]. Además dejaremos presente la referencia de GeoTora, que se puede consultar para obtener información adicional sobre el protocolo y su autor, [Young-Bae, 2000].

GeoTORA se basa en el algoritmo DAG (directed acyclic graph). Define los *anycast groups*, que son subconjuntos de un número N de nodos cualquiera de la red. Mediante una modificación del *anycast protocol* (permite gestionar los enlaces entre los nodos del grupo anycast), GeoTORA mantiene un DAG único para cada grupo geocast y este DAG se actualiza cada vez que los miembros del grupo geocast cambian.

La diferencia con TORA es que todos los nodos que pertenecen a la región geocast tienen altura cero en el grafo DAG (en TORA solo el nodo destino tenía altura nula). Por lo demás el establecimiento y mantenimiento de rutas es igual que TORA.

Al enviar un paquete geocast el emisor envía por cualquier enlace saliente (anycast) y los nodos que van recibiendo el paquete hacen lo mismo, de manera que si el emisor no está separado de la zona geocast, el mensaje llega antes o después a algún miembro del grupo. A partir de ahí se va realizando entre los nodos vecinos un broadcast con un salto de distancia, incluyendo en el paquete geocast la información de la región geocast destino, para que los nodos que reciban el paquete comprueben que no están en la región solicitada y vayan descartando los mensajes en vez de seguir reenviándolos.

Evaluación

Integrando TORA e *inundación selectiva* de zona (anycast), se reduce significativamente el exceso de mensajes geocast reenviados, comparándolo con *inundación básica* y LBM.

Versión bastante básica de uno de los primeros protocolos geocast, en la que se deja un poco “al azar” que los paquetes lleguen a algún miembro de la zona geocast cuando la red es medianamente grande.

3.1.4. GeoGRID

De este protocolo diremos que es de tipo geocast y que está profundamente relacionado con otro protocolo de los mismos autores GRID [Liao, 2001]. Podremos encontrar más información en la referencia correspondiente a GeoGRID [Liao, 2000].

Geogrid divide el área geográfica simplificada en 2D, en rejillas (grids) de tamaño $d \times d$. Cada rejilla se numera según sus coordenadas. En cada celda se elige un nodo como Gateway, preferiblemente el más cercano al centro de la rejilla. La responsabilidad de estos nodos elegidos es la de propagar los paquetes geocast a sus vecinos de celda si se encuentra en la zona geocast, o reenviar a otra celda si se encuentra en la zona de reenvío. La zona de reenvío o “forwarding zone” (FZ) se elige como en LBM [Young-Bae, 1999] [Young-Bae, 2002].

Según se elija el tamaño de d se elegirá el tamaño de la celdilla. Una d pequeña implica mejor conectividad entre los nodos de la celda y también más *nodos Gateway* por lo que habría más tráfico en la red. Existen dos versiones de Geogrid:

- ⤴ Flooding-Based, no se genera árbol de expansión, ni camino hasta el destino previa solicitud de envío geocast. Cada *nodo gateway* en la FZ ayudará a la transmisión de la información geocast.

- ⤴ Ticket-Based, en esta versión no todos los *nodos gateway* en la FZ van a reenviar los paquetes geocast. Se distribuyen un número de “tickets” concreto a los *gateways* que serán encargados desde ese momento de reenviar el mensaje a la zona geocast. Según el

número de tickets repartidos, se controlará la sobrecarga de la red, y también se afectará a la tasa de llegada a la zona de destino. Aproximadamente en una zona de $m \times n$ grids se distribuirán $m + n$ tickets

Evaluación

Se reduce el número de reenvíos con “ticket-based” con respecto a la versión flooding-based. La versión flooding-based a su vez reduce el número de reenvíos con respecto a versiones anteriores de protocolos geocast eligiendo a los *nodos gateway* de cada zona.

Aún así, el protocolo no usa la estrategia *greedy* [Karp, 2000], con la que en zonas de alta densidad de nodos, con multitud de *grids* y *nodos gateway*, se realizan reenvíos de cada paquete geocast a través de todos los *nodos gateway* que estén en la dirección de forwarding, con los consiguientes retardos. Utilizar la táctica *greedy* haría que estando dentro del alcance varios *nodos gateway* en la dirección de envío, no se tuviera en cuenta a los intermedios para transmitir directamente al más lejano de todos ellos ahorrando saltos a la transmisión.

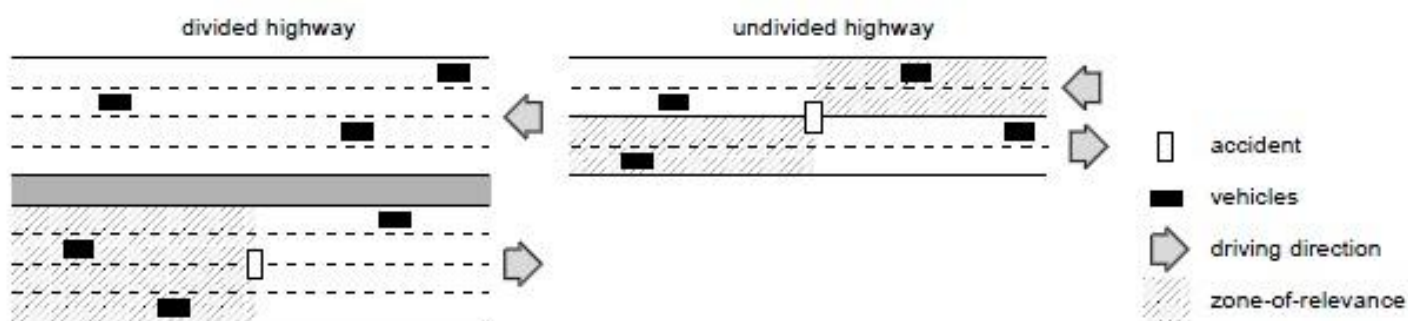
3.1.5. DUHGP

De este protocolo diremos a modo resumen que está orientado a geocast, y que usa la posición geográfica de los nodos para su localización. Así pues diremos que en su referencia, [Briesemeister, 2000] se puede encontrar información extendida sobre el algoritmo correspondiente y datos sobre su autoría.

Utiliza un método simple basado en geocast. Protocolo propuesto para evitar la colisión de paquetes y reducir el número de reenvíos en modo *broadcast*. Cuando un nodo recibe un paquete no lo reenvía de inmediato. En vez de hacerlo espera un tiempo de espera para tomar la decisión de si lo hará o no. Ese tiempo de espera depende de la distancia que le separa del nodo anterior que le envió el paquete. Cuanto más distante está el receptor, menor será el tiempo de espera. Así, principalmente los nodos situados en el borde del alcance del nodo, tomarán parte en el reenvío rápidamente. Cuando el tiempo de espera finaliza, si no se ha recibido el mismo mensaje de otro

nodo, entonces se hará un reenvío en modo *broadcast* del mensaje. Así se evita una tormenta de broadcasts y el reenvío es optimizado alrededor del vehículo que lo inició. El método también usa un número máximo de saltos para limitar el alcance de la inundación.

También dependiendo de si la carretera de circulación está dividida o no, el algoritmo envía el paquete sobre una o dos zonas. Trabajaron [Briesemeister, 2000] sobre la simulación de la propagación de paquetes en caso de un accidente. Si la autovía está dividida en dos sentidos, nuestra zona relevante de envío será únicamente los vehículos que circulan detrás en nuestro sentido de circulación, pero si la carretera no se encuentra dividida, la zona relevante de envío aumentará, incluyendo también los vehículos que se encuentran más adelante que nosotros y en sentido opuesto.



Evaluación

Reduce bastante el número de nodos que hacen broadcast y por tanto el número de paquetes iguales que se reenvía inútilmente. Es una idea simple pero a la vez eficiente y cobra importancia sabiendo que este protocolo [Briesemeister, 2000] fue el precursor de la idea de una carretera dividida en zonas, idea que después sería empleada por otros protocolos como ZOR [N. Fisal, 2004]. Un problema que puede existir con alta movilidad en este algoritmo es el siguiente. Un nodo n transmite un paquete. Los nodos $n+1$ y $n+2$ reciben el paquete. El nodo $n+2$ que está más alejado de n realiza el reenvío *broadcast* tras alcanzar su timeout. Pero puede que en ese momento el nodo $n+1$ no esté dentro de su alcance por lo que no recibe el *broadcast* y tras alcanzar su *timeout* realiza su *broadcast* creyendo que ningún nodo lo ha hecho antes. Una sencilla manera de solucionar el problema sería numerar cada paquete transmitido, de manera que fuera fácil para los nodos intermedios descartar paquetes ya recibidos.

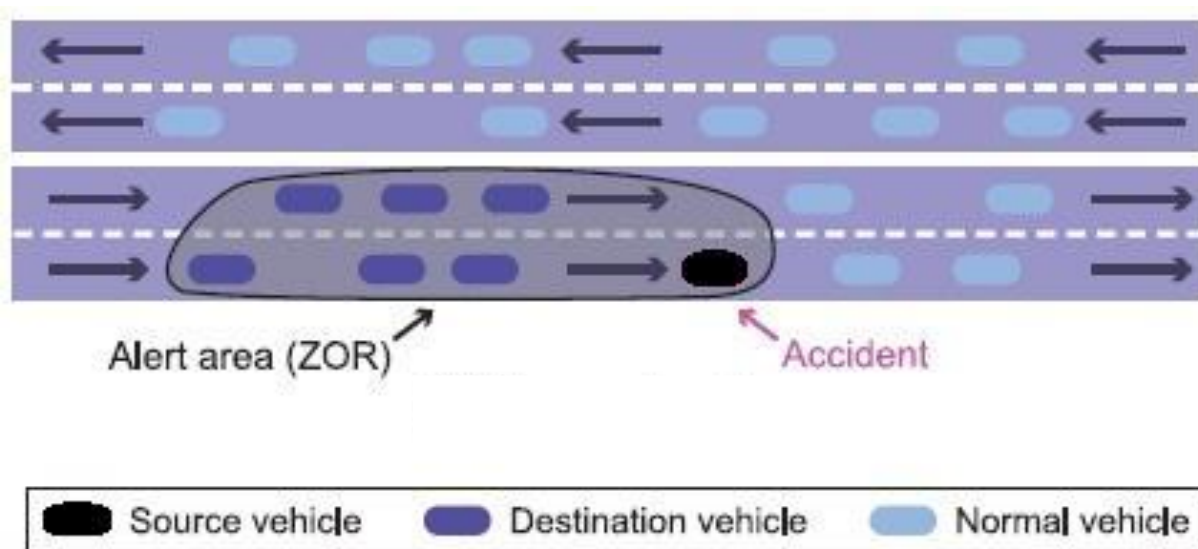
Un aspecto muy positivo y acertado a la hora de volver a hacer el *broadcast* es que el tiempo de espera para retransmitir es inverso a la distancia que separa los nodos. Esto hace que los nodos más alejados sean capaces de retransmitir el *broadcast* rápidamente, minimizando el número de saltos.

Un problema es el hecho de que está probado únicamente para vías abiertas. En entornos urbanos habría que introducir multitud de *zonas relevantes*, sobretodo en cruces, aunque aún así DUHGP podría tener una alta eficacia.

3.1.6. ZOR

Para comenzar con este algoritmo diremos que el enrutamiento que realiza está basado en la topología de la red en el instante de enrutamiento y que además está orientado a comunicaciones geocast. Dejamos constancia de su referencia, [N. Faisal, 2004] en la que podemos encontrar más documentación que la que a continuación se va a mostrar.

Protocolo fuertemente basado en AODV [Perkins, 2003] Ad-hoc On-demand Distance Vector, al igual que otros muchos protocolos analizados, pero la diferencia es que en este caso el algoritmo está adaptado para la finalidad de un protocolo geocast, determinando una zona geográfica hacia la que transmitir. Como decimos, está diseñado para enviar los paquetes a múltiples enlaces determinados, que se encuentren en nuestra zona de interés. La forma y el lugar de esta zona de



interés con respecto al emisor del paquete, se determinarán por la aplicación concreta para la que utilicemos ZOR. Por ejemplo para el modelo de autovía dividida en dos sentidos, la “zona relevante” en caso de un accidente, sería la del mismo sentido de circulación y concretamente los vehículos que circulen por detrás. Solamente a estos vehículos nos convendría avisarles del accidente. Existe otro protocolo basado en la misma idea llamado LAR (Location-Aided Routing) [Vaidya, 2000] que también será estudiado.

Evaluación

El protocolo ZOR en conjunto constituye una idea muy buena para resolver algunos problemas de enrutamiento en casos reales de tráfico, como el caso del accidente, en el que ZOR no informa a otros vehículos no implicados, ya que en caso de ser avisados podrían alertarse innecesariamente ocasionando problemas añadidos como atascos y otros accidentes. Esta idea está sacada del protocolo DUHGP [Briesemeister, 2000] que fue el precursor.

ZOR en general es una utilidad muy limitada a algunos problemas concretos y poca adaptabilidad a otros escenarios. Además como está basado en AODV simple obtiene unos pobres resultados (es reactivo por lo que el retardo hasta que se envía el paquete de información es alto) y habría que evaluar si en el caso propuesto del accidente, ese retardo es importante para evitar otros accidentes, o por el contrario un simple AODV resulta suficiente.

3.1.7. IVG

En este caso diremos para empezar que el protocolo es de tipo geocast y que realiza la localización de nodos mediante posición geográfica. Además, como referencia asociada, [Bachir, 2003], dejamos presente que en ella se puede encontrar información adicional a la que pasamos a exponer.

Usa una estrategia similar a DUHGP [Briesemeister, 2000] para reenvío de paquetes, con un tiempo de reenvío broadcast inversamente proporcional a la distancia que separa al nodo que tiene

que reenviar del nodo emisor.

Se definen unas áreas relevantes hacia donde enviar paquetes en caso de accidente. También definen el periodo de repetición de *broadcast* acorde con la distancia de frenado de los vehículos, de forma que se asegure que los vehículos no entren en una zona (*too much late region*) en la que sea demasiado tarde para evitar el accidente debido a que su distancia al accidente sea menor que la distancia requerida por el vehículo para detenerse.

Evaluación

Es un protocolo bastante sencillo y que introduce poca sobrecarga en las comunicaciones. En carreteras urbanas alcanza hasta un 100% de vehículos informados en las simulaciones.

Un aspecto a destacar es que se hicieron modificaciones en el algoritmo para tener en cuenta a los vehículos sin señal GPS pero aún no se han probado.

La utilidad de este protocolo es muy restringida al igual que los anteriores, sobre todo útil y limitado para geocasting a nodos situados en zonas muy cercanas.

3.1.8. CGG (Cached Greedy Geocast)

Para comenzar con este protocolo hacemos mención a su referencia, [Eberhardt, 2004], donde encontrar información adicional a la que a continuación se documentará. A modo de resumen, decir que sus autores definen un nuevo geocast (*cached geocast*) en la que la localización de nodos sigue siendo mediante datos sobre la posición geográfica, pero con el añadido del uso de una caché adicional.

Siguiendo un algoritmo “greedy” (GPSR) [Karp, 2000] modificado, el objetivo del protocolo es introducir una pequeña caché a la capa de enrutamiento para que conserve los paquetes que el nodo no puede reenviar instantáneamente debido a un “local maximum” (ningún vehículo en la zona de alcance se encuentra más próximo que nosotros del destino). Cuando un nuevo vecino informa de que se encuentra en la zona de alcance, se comprueba en la caché los mensajes almacenados para quizás reenviar alguno de ellos por el nuevo nodo disponible.

En redes con alta movilidad se pierde rápidamente la validez de la posición de los nodos y el algoritmo básico greedy (que reenvía a los nodos más cercanos al destino y más lejanos a nosotros) pierde eficiencia ya que los nodos de reenvío pueden dejar de estar al alcance rápidamente. CGG seleccionará para un mejor rendimiento un nodo (teniendo en cuenta su velocidad) que muy probablemente esté en la zona de alcance. Esta solución toma el nombre de “*distance aware neighbor selection*”.

Utilizan dos tipos distintos de métodos para que la caché permanezca actualizada. Uno de ellos tiene un número máximo de almacenamiento de paquetes y va eliminando los más antiguos según llegan nuevos para almacenar. La otra tiene un tiempo máximo de almacenamiento y cuando este tiempo se cumple se desechan los paquetes. Los resultados, que son similares, demuestran que con una pequeña caché de almacenamiento máximo sería suficiente para incrementar bastante el rendimiento.

Evaluación

Es una evolución que mejora claramente el rendimiento comparándolo con el greedy simple de GPSR. Aumenta más la diferencia con redes con alta movilidad y baja densidad de nodos, ya que la caché interviene en muchas ocasiones y mejora mucho más los resultados.

Apreciaron altos retardos usando el greedy con caché, ya que los paquetes en vez de ser eliminados se mantienen hasta que se pueden reenviar. La ventaja es que los paquetes al final llegan, pero la desventaja es que para multitud de aplicaciones que necesitan bajo retardo no sería válido este método. Aún así y teniendo en cuenta que se trata de casos con baja densidad de nodos (cached greedy) en los que no tenemos nodos alcanzables, ningún método puede dar solución a aplicaciones de tiempo real no teniendo nodos alcanzables. Al menos la caché resulta útil para que después de un tiempo y al encontrar otros nodos, los paquetes acaban llegando.

Por otro lado este protocolo geocast no está tan limitado en cuanto a las aplicaciones para las que puede ser utilizado. Puede ser útil en las situaciones de accidente, como los protocolos anteriores, pero también en difusión de paquetes de datos de cualquier tipo a zonas más alejadas.

3.1.9. AG (Abiding Geocast)

De este protocolo, decir para comenzar que en su referencia, [Eberhardt, 2005], podemos encontrar información adicional sobre su autor y el propio protocolo a la que a continuación se documentará. Los autores de AG definen un nuevo geocast especial, útil cuando se suele enviar información permanente a una zona. La situación de nodos dentro de la propia red sigue siendo mediante datos con la posición geográfica de los propios nodos, al igual que los demás protocolos de esta sección.

Es un protocolo basado en el envío de paquetes a todos los nodos que están durante un tiempo llamado “geocast lifetime” en una zona geográfica de destino. Hasta la fecha no existían protocolos para este fin. Se busca poder dar una serie de servicios como advertencias geográficas (situación de la carretera), o servicios de suscripción-publicación.

Los autores propusieron tres soluciones al problema:

- Un servidor proporcionado por la propia infraestructura de la vía que mediante geocast enviará información a los vehículos situados en una zona. Previamente se le ha hecho llegar al servidor la información mediante unicast, de manera que se envía la información periódicamente a los vehículos y el periodo de tiempo depende de la velocidad en la vía.
- Un vehículo elegido dentro de la zona geocast almacena la información. Periódicamente reenvía la información hasta que abandona la zona de destino. Es entonces cuando se cede la información a otro nodo.
- Cada nodo almacena los paquetes geocast destinados a su zona y mantiene una tabla de nodos vecinos y su localización. Si un nodo detecta a un vecino nuevo le reenvía la información. Opcionalmente permite un reparto de mensajes mediante un broadcast de un solo salto.

Evaluación

Una vez instalada la infraestructura puede resultar muy eficiente ya que prácticamente no serían necesarios paquetes de control, sería casi toda información útil. El tercero es el que más ancho de banda utiliza para control.

Tiene una utilidad muy concreta que es dar información desde la infraestructura vial, el problema es que requiere de una infraestructura muy extendida, aunque limitando las zonas de implantación a puntos críticos se reducirían los costes en gran medida.

Un problema detectado del que los autores no hablan, es que en las soluciones 2º y 3º si todos los vehículos abandonan la zona, se pierde la información, a menos que también haya infraestructura en esos modelos.

CONCLUSIONES

De los protocolos basados en GeoRouting diremos que su objetivo principal es difundir una información en una zona determinada. Creo que es importante realizar una distinción entre dos tipos de transmisiones geocast: situaciones de tiempo crítico, con zonas destino situadas cerca del nodo transmisor (emergencias y accidentes) y situaciones de tiempo acrítico, con zonas destino más alejadas (información de curva peligrosa, radar próximo...). Creo que la idea básica que deberían intentar optimizar los protocolos de este tipo, sobretodo en situaciones de tiempo acrítico, es realizar una transmisión hasta algún nodo situado en la zona (GeoNode) con un protocolo unicast eficaz y que ese nodo se encargue de hacer un broadcast limitado a los nodos situados en la zona, “unicast + broadcast”. También es cierto que para el caso concreto en el que un protocolo geocast difunde información sobre una situación de emergencia como un accidente, la táctica que emplean varios protocolos geocast (LBM, GeoGRID) es acertada, una inundación direccional desde el propio nodo hacia los que vienen por detrás y dirigida al área del mismo sentido de circulación. Creo que una mejora en este tipo de protocolos como GeoGRID sería lo que se ha comentado anteriormente: si la zona de destino de la información está más lejos de una determinada distancia, no se está enviando una información crítica como en el caso de un accidente, sino que es del tipo “radar próximo”, “curva peligrosa próxima”, en vez de realizar una inundación direccional, se realice una transmisión unicast a la zona y dentro de la zona se realice un “broadcast zonal”, de esta forma se evitaría una inundación excesiva durante la transmisión del paquete a la zona geocast.

Es interesante también la táctica empleada en DUHGP para avanzar hacia la zona geocast. Cada nodo intermedio que recibe un paquete reenvía tras esperar un tiempo inversamente proporcional a la distancia que le separa del origen. Así se consigue que los nodos más alejados del origen reenvíen antes avanzando una mayor distancia.

Tras alcanzar la zona geocast empleando la táctica “unicast + broadcast”, se debe realizar una inundación que sea controlada de alguna forma, por ejemplo limitando el número de saltos a realizar. El empleo de la información de localización para lograr este objetivo es importante. Una posible táctica interesante es limitar la zona de validez del paquete, introduciendo las cuatro coordenadas de los vértices de un cuadrado en el que sí tiene validez el paquete. Los nodos situados fuera de esa zona descartan el paquete.

Para implementar la táctica “unicast + broadcast”, se crea el protocolo AG (Abiding Geocast) con el que se pretende “mantener” una información constantemente en una zona geográfica, de

modo que los propios nodos situados en ella y que están de paso, reenvíen cada cierto tiempo para que los nuevos nodos de la zona conserven la información. Recordemos que la información transmitida en estos casos no es de tiempo crítico como el caso de un accidente, sino que sería más bien informativa. Plantea tres soluciones distintas para ello, pero creo que la solución viable es una híbrida entre las propuestas, en la que la infraestructura hardware desplegada a los lados de la vía emita información destinada a una zona geocast, y siempre que la densidad de nodos de la red lo permita, los propios nodos van actualizando dicha información a los nuevos nodos que lleguen a la zona geocast.

3.2 Protocolos BROADCAST

En esta sección analizaremos algunos de los protocolos que tienen como destinatarios todos los nodos de la red, al menos los situados a una distancia del emisor, o un número determinado de saltos desde el origen.

Existe un menor número de aplicaciones para este tipo de protocolos que para las demás clases. Una de ellas, como ya se ha comentado anteriormente, sería el caso de un accidente en un cruce dentro de un entorno urbano. En ese momento sería de utilidad informar rápidamente a todos los nodos cercanos a una distancia determinada. La velocidad con la que se expande la información puede ser vital en este caso, por lo que un protocolo con un tiempo de procesamiento y reenvío mínimo es el más apropiado. Aún así sería útil un control sobre la expansión del paquete, para evitar una sobrecarga excesiva por toda la red. De ahí el que se plantee contabilizar el número de saltos máximo que realizará el paquete, para que una vez superado ese número, se deseche el paquete oportuno. En resumen, decir que una simple inundación por toda la red puede ser eficaz y rápida al mismo tiempo, pero que por otro lado hay que controlar el alcance de la inundación para que no se extienda hasta límites descontrolados, sobrecargando la totalidad de la red con la suma de varias transmisiones broadcast.

Analizaremos varios de estos protocolos basados en inundación, BROADCAST [Durrezi, 2005], UMB [Korkmaz, 2004] y VTRADE y HV-TRADE [Sun, 2000], este último con una idea similar al protocolo híbrido ya analizado ZRP y que a su vez emplea una división del área geográfica en celdas. Comenzaremos a continuación con el primero de esta clase.

3.2.1. BROADCAST

Para comenzar con este grupo de protocolos y en concreto con BROADCAST, dejaremos constancia de su referencia, [Durrezi, 2005], donde encontrar información adicional a la que a continuación se mostrará. Además, decir a modo de resumen, que el algoritmo de enrutamiento de este protocolo está basado en la creación de celdas (cells) y orientado a broadcast. Se diseña como

un protocolo de emergencia con estructura jerárquica.

Está basado en una estructura jerárquica para una red en una carretera abierta: autovía, autopista... Los nodos en la carretera están organizados en dos niveles jerárquicos. El primer nivel incluye todos los nodos de una celda y el segundo nivel incluye los “cell reflectors” que son unos pocos nodos normalmente situados cerca del centro geográfico de la celda. Los “cell reflectors” se comportan durante un cierto tiempo como una estación base (*cluster head* [Blum, 2003]) y que como tal, pueden manejar los mensajes de emergencia provenientes de miembros de la misma celda o miembros de celdas vecinas.

Los “cell reflectors” funcionan como nodo intermedio fundamental en el enrutamiento de mensajes de emergencia que provienen de los “cell reflectors” vecinos y decide cuál de los distintos mensajes recibidos reenviará primero.

Evaluación

BROADCOMM supera a protocolos similares basados en inundación básica de la red en cuanto al retardo del broadcast completo del mensaje por toda la red, con redes de tamaño medio-grande y mejora la sobrecarga total generada para completar el broadcast por toda la red...

Es un protocolo muy simple y funciona de manera óptima en redes simples de carreteras abiertas con bajo número de nodos. El aumento de nodos provoca un aumento casi exponencial del uso del ancho de banda, al igual que en los protocolos broadcast más simples. Solo cobraría sentido usar ese ancho de banda en situaciones de emergencia que es para lo que está destinado.

3.2.2. UMB (Urban Multi-Hop Broadcast)

Comenzaremos hablando de este protocolo diciendo que está orientado a broadcast, usa la localización geográfica para hacer el *packet forwarding*, y que requiere una infraestructura

desplegada en las vías de circulación para obtener un mejor rendimiento. En [Korkmaz, 2004] podemos encontrar información adicional a la que a continuación mostraremos sobre el propio protocolo.

Está diseñado para superar las interferencias, la colisión entre paquetes y los problemas de nodos ocultos o inalcanzables durante la diseminación de mensajes en broadcast multisalto.

En UMB el nodo emisor intenta seleccionar el nodo más lejano según la dirección de broadcast para asignarle la tarea de reconocimiento del paquete y reenvío, sin ninguna información de la topología de la red a priori. En las intersecciones, se instalan repetidores para reenviar los paquetes a todos los segmentos de la carretera para no perder nodos.

El protocolo UMB tiene un porcentaje mucho más alto de éxito en situaciones de elevada carga de paquetes y alta densidad de tráfico vehicular, que los protocolos 802.11-distance y 802.11-random, que son modificaciones del también basado en inundación y a su vez estándar IEEE 802.11, y con los que para evitar colisiones entre paquetes de rebroadcasting se fuerza a que los vehículos esperen para hacer sus reenvíos de paquetes.

Evaluación

Aporta una nueva idea para evitar dejar a algunos nodos fuera de cobertura. Requiere de la infraestructura adecuada para dar cobertura a todos los segmentos de las vías, lo que supone elevar el coste de la red en gran medida. Parece inviable hoy en día la implantación de repetidores en todos los cruces de cada ciudad.

El aspecto positivo de UMB es que en las simulaciones parece que consigue buenos resultados con carga elevada en la red, superando a los demás protocolos broadcast hasta la fecha. Aún así, el propio broadcast induce por definición una sobrecarga en la propia red que en redes VANET es difícil de controlar sin un protocolo muy avanzado.

3.2.3. VTRADE y HV-TRADE (Vector-based TRACKing Detection y Historic-enhanced VTRADE)

A continuación se documentará el protocolo, pero para obtener una información más extendida sobre el protocolo y su autor, se puede acudir a la siguiente referencia [Sun, 2000].

De manera breve diremos que ambos protocolos están orientados a broadcast y usan el GPS para la localización geográfica de los nodos.

La idea básica es similar al protocolo unicast ZRP [Pearlman, 1997]. Basándose en la información de posición y vectores movimiento de los vehículos, el algoritmo clasifica a los nodos vecinos en diferentes grupos según sentido y carretera de circulación y según su posición con respecto al emisor. Para cada grupo, solo un pequeño subgrupo de vehículos llamados border vehicles son seleccionados para el rebroadcast del mensaje.

Los *vehículos frontera* (*border vehicles o bv*) hacia los que se enviará el paquete son elegidos según el área sobre el que se quiera hacer broadcast, tomando una o varias de las combinaciones siguientes:

- Sentido: el mismo y/o contrario.
- Carretera: la misma que el emisor y/u otra.
- Posición: por delante del emisor y/o por detrás.

Cada nodo decide, cuando recibe el paquete, y valorando los condicionantes anteriormente descritos, si debe hacer rebroadcast de nuevo o no.

HV-TRADE mejora al primero en cuanto a que los vehículos se envían una historia de las posiciones pasadas del propio vehículo, para determinar entre ellos si están circulando por la misma carretera. V-TRADE no implementa esa parte del protocolo y por tanto no puede evaluar esa condición.

Evaluación

Mejoran bastante el ancho de banda empleado con respecto a otros protocolos broadcast por seleccionar los vehículos que retransmitirán y por otro lado no disminuye prácticamente el alcance de la señal. Aún así hay un fuerte retardo de enrutamiento porque los nodos de reenvío son seleccionados en cada salto.

CONCLUSIONES

De los protocolos *broadcast* diremos que son los que por definición envían más tráfico a la red. Es por ello que las utilidades en entornos VANET se tienen que ver restringidas a casos en los que realmente sea una solución imprescindible. También es cierto que el tiempo de procesado de cada paquete antes del envío es prácticamente inexistente, por ello las situaciones que podrían salir más beneficiadas de estos protocolos son las de tiempo crítico, como por ejemplo avisar en caso de accidente a los vehículos cercanos. A partir de aquí, creo que sería importante tener en cuenta por qué carretera se circula para evaluar si realmente sería un protocolo broadcast el más idóneo en caso de emergencia:

- En una autovía o autopista de un solo sentido de circulación por calzada, no convendría avisar a los vehículos situados por delante del accidente o en la otra calzada y sentido, porque debido a la alerta de emergencia, los conductores alertados innecesariamente podrían incluso producir otro accidente. En este caso, creo que un protocolo geocast que dirija la información a una zona determinada sería mucho más idóneo a pesar de un ligero retardo en el envío.
- En una carretera nacional de doble sentido de circulación sí que convendría alertar a los vehículos situados por delante del accidentado y en el otro sentido de circulación, ya que una leve invasión del carril contrario podría producir más accidentes. Por ello creo que en este caso un protocolo broadcast sí que realizaría su función sin otros perjuicios y además transmitiendo en el mínimo tiempo posible a todos los nodos colindantes.

Para que esto se pudiera realizar y se pueda actuar de una manera u otra, los nodos tienen que saber en qué tipo de carreteras se encuentran, por ejemplo, mediante la ayuda de los mapas urbanos y de carreteras.

Partiendo de que este fuera un buen planteamiento, que el broadcast se emplee simplemente para situaciones de urgencia extrema, en carreteras de doble sentido y de que se requiera del menor retardo posible de transmisión, plantear protocolos más complejos que una transmisión broadcast sencilla no tendría sentido, ya que al final retardaría la transmisión y en algunos casos como V-TRADE, HV-TRADE o BROADCASTCOMM generan una sobrecarga de tráfico de control continua. Digamos que lo que estamos planteando es que una vez que se requiera del protocolo broadcast (se ha producido un accidente en una carretera de doble sentido), dejaría de tener importancia que se

sobrecargue la red por la amplia difusión realizada, que los nodos dejen de poder cursar tráfico de otro tipo, que estaban cursando previamente, y que lo único que importaría es que la alerta se transmitiera lo más rápido posible a los nodos vecinos. Aún así habría que limitar el alcance del broadcast con un tiempo de vida del paquete, para que pudiera recuperarse la red posteriormente y un número de saltos máximos que podría ser proporcional a la velocidad con la que se desplacen los vehículos en esa vía.

Con lo expuesto anteriormente solo queda recordar que a nivel individual se han analizado los protocolos broadcast uno por uno anteriormente, pero que como se acaba de reseñar y según el planteamiento presentado, creo aumentar la complejidad de los protocolos broadcast para las contadas situaciones límite en las que se necesitan, no aporta ningún beneficio real e iría en contra de las necesidades propias de la situación de emergencia crítica.

3.3 Protocolos MULTICAST

En esta sección se analizarán algunos de los protocolos existentes en los que el destino de la transmisión es un subconjunto de los nodos de la red.

Como se ha comentado anteriormente, uno de los posibles objetivos de estos protocolos es la distribución de información en situaciones de emergencia. Vehículos próximos a la zona podrían informar a centrales de control y que esta información se transmitiera después a un grupo concreto de vehículos interesados en esa información: ambulancias, policía, bomberos, etc.

El primero que se analizará es SENCAST [Appavoo, 2008], el cual fue diseñado claramente para las situaciones de emergencia antes descritas. Después se analizará EraMobile [Genç, 2008], un protocolo que reporta unos buenos resultados pero que según se puede observar, está destinado a grupos multicast geográficamente próximos. Por último se hablará de MRMP [Hsiu, 2009] un protocolo con una base de funcionamiento reactiva, al contrario que SENCAST cuya base es proactiva.

3.3.1. SENCAST

De este protocolo diremos para comenzar que en su referencia, [Appavoo, 2008], se puede encontrar información adicional a la que a continuación se muestra relativa al propio. Como información general diremos que SENCAST es de tipo proactivo y orientado a multicast en situaciones de emergencia. Utiliza información geográfica GPS para localización de la emergencia y de las zonas de aviso.

El objetivo básico de SENCAST es diseminar información eficientemente para dar soporte a operaciones de emergencia utilizando una red ad-hoc muy extensa. Pretende ser una red altamente escalable, con una ínfima sobrecarga de control, una gran resistencia a problemas de cualquier tipo y disponibilidad en cualquier situación, y con capacidad para permitir la comunicación entre emisor y un grupo distante de receptores.

El protocolo pretende conectar mediante conexiones dúplex puntos cercanos a una emergencia con centrales de control, de manera que se puedan enviar o solicitar información de diversos tipos tales como mapas, retratos de criminales y/ cualquier tipo de información en tiempo real cuando sea necesario.

En los nodos se guarda una tabla de enrutamiento para cada ruta encontrado mediante una modificación ligera del “reverse path forwarding” (Dijkstra), algoritmo que usan los protocolos proactivos anteriormente analizados.

Evaluación

El protocolo pretende ser de gran utilidad en situaciones críticas. Asume que la movilidad del emisor es baja durante el descubrimiento de ruta, lo cual no tiene porque ser cierto salvo en caso de accidente.

Según los autores rinde eficientemente en redes extensas, pero no simulan la alta velocidad de los nodos vehiculares, aplicable a multitud de situaciones de emergencia, ni tienen en cuenta la existencia de obstáculos que empeoren la calidad de las comunicaciones en entornos urbanos por lo que a priori no es aplicable en general a redes VANET, aunque sí podría ser de utilidad para la comunicación de accidentes, atascos y diversas situaciones que impliquen baja movilidad en vías interurbanas.

3.3.2. EraMobile

En la referencia relativa al protocolo [Genç, 2008] podemos encontrar más datos sobre el protocolo que a continuación explicaremos. A modo resumen, el protocolo está orientado a comunicaciones multicast, y actúa utilizando unos mensajes de control llamados “gossip”.

Basado en inundación, la forma más básica de diseminación, pretende eliminar las sobrecargas

inducidas por crear y mantener estructuras y topologías de red. Se divide en tres unidades funcionales:

- Data Dissemination Unit: se encarga del control de la transmisión de paquetes y el control de nodos dentro del grupo multicast. Introduce el concepto de mensajes “gossip” (cotilla), los cuales con un mínimo tamaño informan a los nodos vecinos con un resumen del buffer de datos de un nodo y esto se utiliza para el control de transmisión de datos ya que dichos mensajes “gossip” son enviados por broadcast periódicamente.

- Buffer Management Unit: controla los paquetes necesarios para recuperar a otros nodos de errores de paquetes perdidos. Mantiene un orden FIFO en su cola del buffer.

- Adaptivity Unit: para adaptarse a la variabilidad de la red y la imprevisibilidad de las condiciones de la red, esta unidad del protocolo adapta parámetros dinámicamente teniendo en cuenta densidad de nodos, número de vecino alrededor de un nodo... El número de nodos vecinos se controla por los mensajes “gossip”.

Evaluación

Algunas de las características más importantes del protocolo son fiabilidad, escalabilidad, tolerancia a fallos y que funciona bien con alta movilidad. Un gran punto a favor es que prácticamente no requiere de mensajes de sobrecarga para mantener estructuras ni topologías de red.

Los autores realizaron simulaciones con velocidades reales de vehículos y obtiene buenos resultados. Parece adecuado indicar que sería un protocolo apropiado para redes VANET's.

Un problema aparente de EraMobile es el hecho de que solo es válido para grupos Multicast relativamente próximos, por lo que limitaría las aplicaciones para las que este sería útil.

3.3.3. MRMP (Maximum-Residual Multicast Protocol)

De este protocolo diremos para comenzar y de manera resumida que el protocolo está orientado a multicast y que MRMP es de tipo reactivo. Además de la información que a continuación expresaremos se puede consultar su referencia [Hsiu, 2009].

Pretende suprimir múltiples comunicaciones unicast por algunas multicast para mejorar el aprovechamiento de la red en aplicaciones como la monitorización de la carga de la red (de manera cooperativa), distribución de información turística dentro de las ciudades, la gestión de taxis...

En MRMP no se emplean mensajes de control para recoger información de enrutamiento o reparar enlaces rotos. Tampoco se mantiene información de miembros de grupos, ni relaciones entre vecinos con mensajes explícitos. Cuando se requiere una ruta se invoca un proceso de descubrimiento que depende de las decisiones de nodos intermedios formando finalmente un árbol simple sin bucles posibles. El algoritmo de descubrimiento está basado en el de Bellman-Ford para encontrar el camino más corto, usado en los protocolos reactivos ya estudiados.

Cada nodo puede ajustar su nivel de potencia en transmisión de paquetes tal que la energía residual sobre la red maximice su eficiencia para un grupo multicast concreto.

Las rutas, una vez establecidas, son válidas durante un tiempo determinado que depende de la velocidad con la que se muevan los nodos. En las tablas de enrutamiento se almacenan los niveles propios de potencia necesarios para transmitir los paquetes de datos en cada sesión.

Evaluación

Elimina mensajes de control y la sobrecarga consecuente. La problemática de minimizar energía empleada es útil en redes móviles en general, pero no lo es en redes VANET ya que se cuenta con energía “ilimitada”, así que aunque por ello no deja de ser un protocolo válido, sí que lo hace más complejo en ese aspecto de manera innecesaria.

Las pruebas necesarias se realizan a velocidades urbanas (mínimas), por lo que los tiempos de validez de las rutas obtenidas deberían disminuir a mayores velocidades, y como consecuencia directa se perdería bastante eficacia al contar con nodos que se desplazan a velocidades reales resultando al final y como conclusión que seguramente dejaría de ser válido para redes VANET en general. Aún así una correcta simulación sería útil para descartarlo finalmente.

CONCLUSIONES

De los protocolos multicast diremos que al igual que los broadcast, tienen muy limitados sus

utilidades. La aplicación principal de los mismos es la de dar servicios de información entre nodos pertenecientes a subgrupos del total de nodos, y que se encuentran distribuidos por todo el área de la VANET. Estos subgrupos de nodos estarían formados por vehículos que podrían ser coches de policía, ambulancias, bomberos...los cuales podrían comunicarse entre sí. Dichos protocolos multicast podrían ser sustituidos por enlaces unicast entre los propios nodos, pero señalando que estas comunicaciones deberían ir cifradas, ya que la información pasará por multitud de nodos intermedios y el contenido de esos paquetes puede ser confidencial para los subgrupos de nodos. El hecho de proponer utilizar protocolos unicast por encima de los multicast es debido a que lo pocos protocolos multicast que se han implementado y simulado, tienen buen rendimiento pero en condiciones irreales, con baja velocidad de nodos (MRMP) y con los nodos de cada subgrupo muy próximos entre sí (EraMobile), siendo totalmente ineficaz el protocolo con nodos alejados, que sería la situación real que podría darse en los grupos de vehículos para los que va dirigido el protocolo.

Capítulo IV

Presupuesto

4.1 Tareas realizadas

A continuación se van a detallar cada una de las tareas realizadas explicando en que ha consistido cada una de ellas.

- **Formación teórica previa:** Necesitamos saber con cierto grado de profundidad a qué nos enfrentamos, que nos vamos a encontrar para saber afrontarlo con una buena base teórica al respecto.
- **Búsqueda y análisis de información:** En esta fase se realiza una recopilación de documentos que posteriormente se analizarán. Según se va entrando en materia, van apareciendo más y más documentos, por las referencias que aparecen dentro de los mismos y eso lleva a que la cantidad de información a analizar vaya aumentando en un principio de manera exponencial y tras un tiempo analizando documentos poco a poco siguen apareciendo documentos pero ahora en menor medida.
 - **Búsqueda de documentación:** Como se ha comentado anteriormente, se trata de buscar documentación editada por los propios autores acerca de cada uno de los protocolos.
 - **Análisis de documentación:** Básicamente se trata de realizar una completa lectura a fondo de cada documento, extrayendo la información importante en cada caso. Se han analizado alrededor de cien artículos de protocolos, algunos de ellos tras ser leídos, se han descartado directamente para el entorno VANET y los demás han sido posteriormente documentados en profundidad.

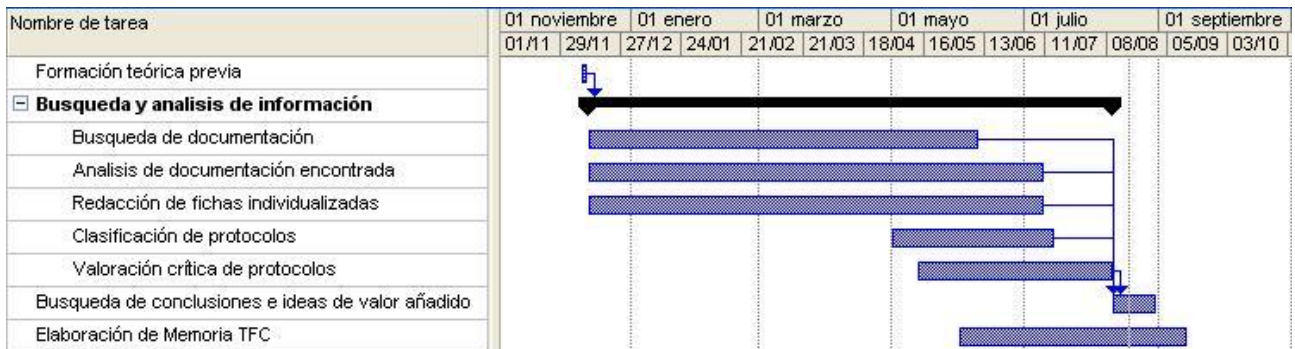
- Redacción de fichas individualizadas: Tras una profunda lectura y comprensión, se procede a realizar una ficha para cada protocolo, de manera que en posteriores etapas se pueda entender el protocolo de una manera más eficiente tomando la ficha como punto de partida.
- Clasificación de protocolos: Teniendo en cuenta la base teórica adquirida durante la redacción de las fichas se distinguen varios grupos de protocolos. A partir de ahí y teniendo en cuenta las características que aparecen en las fichas individualizadas, los protocolos se van encasillando dentro de uno de los grupos.
- Valoración crítica de protocolos: Una vez que se han analizado todos los protocolos de manera individualizada, y se han introducido dentro de un grupo, se procede a realizar una valoración crítica, comparándolos además con los demás protocolos incluidos en el mismo grupo.
- Búsqueda de conclusiones e ideas de valor añadido: Con toda la información analizada, se trata de buscar elementos que aporten valor añadido al proyecto. Para ello y con el conocimiento adquirido, se pretende tener una visión global del proyecto para posteriormente conseguir extraer las partes más positivas y negativas encontradas, y poder realizar propuestas para mejorar esas partes negativas halladas. Además se han elaborado conclusiones generales a nivel de grupos de protocolos y a nivel global del proyecto.
- Elaboración de la memoria del proyecto fin de carrera: Una vez que se ha terminado con la materia se procede a la realización del documento en el que queda plasmado todo el trabajo realizado.

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
Formación teórica previa	3 días	jue 09/12/10	sáb 11/12/10	
<input checked="" type="checkbox"/> Busqueda y analisis de información	242 días	dom 12/12/10	mié 10/08/11	1
Busqueda de documentación	6 mss	dom 12/12/10	jue 09/06/11	
Análisis de documentación encontrada	7 mss	dom 12/12/10	sáb 09/07/11	
Redacción de fichas individualizadas	7 mss	dom 12/12/10	sáb 09/07/11	
Clasificación de protocolos	2,5 mss	dom 01/05/11	jue 14/07/11	
Valoración crítica de protocolos	3 mss	vie 13/05/11	mié 10/08/11	
Busqueda de conclusiones e ideas de valor añadido	20 días	jue 11/08/11	mar 30/08/11	3;4;5;6;7
Elaboración de Memoria TFC	3,5 mss	mié 01/06/11	mar 13/09/11	

4.2 Diagrama de Gantt

Debido a las características particulares de este proyecto, no existen en general, fases claramente diferenciadas que requieran de la finalización de otras anteriores para poder comenzar, sino que la mayoría de ellas se superponen y se han ido realizando varias tareas en paralelo cada vez que nos enfrentábamos a un nuevo protocolo.

A continuación se muestran las distintas tareas y el diagrama de Gantt para poder relacionarlos entre sí.



4.3 Esfuerzo

- Formación teórica previa: treinta horas.
- Búsqueda y análisis de información: trescientas cincuenta y cinco horas.
 - Búsqueda de documentación: veinte horas.
 - Análisis de documentación: alrededor de cien documentos a una media de dos horas por artículo, doscientas horas.
 - Redacción de fichas individualizadas: de alrededor de sesenta protocolos a una media de una hora por ficha, sesenta horas.
 - Clasificación de protocolos: quince horas
 - Valoración crítica de protocolos: alrededor de una hora de valoración individualizada por cada uno de los sesenta protocolos, sesenta horas.
- Búsqueda de conclusiones e ideas de valor añadido: veinte horas
- Elaboración de la memoria del proyecto fin de carrera: cuarenta horas.

- Total: cuatrocientas cuarenta y cinco (445) horas.

Capítulo V

Conclusiones y trabajo futuro

Conclusiones y trabajo futuro

Tras multitud de artículos leídos relacionados con el campo del enrutamiento VANET, la primera conclusión que he obtenido es que por un lado, aún falta mucho trabajo por realizar y que por otro lado el trabajo que se realice debe ser orientado al bien común de las VANET. Para comenzar diré que en cada *paper* los distintos autores muestran de una manera muy breve como han analizado sus protocolos, en cada uno ha sido de una manera distinta, siendo cada una la forma que cada creador ha creído conveniente. Actuando así hasta la fecha se ha provocado una situación en la que tras años investigando desde distintos frentes, hoy en día existe un “maremágnum” de ideas, de protocolos y de sus correspondientes test y evaluaciones. Me parece vital proponer que desde ya se debe crear un estándar sobre la evaluación de los protocolos y animar a los investigadores que trabajen en el campo, a que utilicen el estándar para las evaluaciones de sus protocolos. De esta manera se conseguirán dos cosas:

- Poder evaluar los protocolos directamente por sus porcentajes de rendimiento, clasificándolos y observando así la evolución que se aporta con cada nuevo protocolo sobre los anteriores. De esta manera se seguiría trabajando en líneas distintas, pero al final se mostrarían los resultados en una misma, viendo los frutos del trabajo individual plasmados

en una evolución global de las VANET.

- Evitar que se publiquen protocolos que son modificaciones simples, básicamente otros protocolos ya existentes renombrados y que no aportan novedades ni mejoras en cuanto a rendimiento, pero que se publican bajo unas pruebas muy limitadas y favorecedoras en algunos aspectos, arrojando resultados que parecen esperanzadores.

Como propuesta, el estándar de evaluación de protocolos VANET debería ser lo más concreto posible:

- Definir las herramientas utilizadas de simulación vehicular, de captura del tráfico en la red y posterior análisis de ese tráfico.
- Concretar en distintos entornos (urbano e interurbano) unos parámetros de movilidad vehicular: *aceleración*, *velocidad* y la *separación natural* que se produce entre los vehículos al aumentar o reducir la velocidad, son parámetros que pueden resultar muy importantes a la hora de arrojar unos resultados y que además no tienen nada que ver en los distintos entornos propuestos, por lo que un buen resultado en un entorno, puede no serlo para el otro. De ahí podemos deducir ya que si las pruebas estandarizadas arrojan unos resultados que indican qué protocolos actúan mejor en distintos entornos, quizá sea de utilidad aplicar un enrutamiento híbrido entre varios de estos protocolos y que actuará de manera distinta para cada tipo de entorno, al menos diferenciando los dos ámbitos ya mencionados (urbano e interurbano).
- Definir qué estadísticas porcentuales o en valores absolutos se tomarán como referencia para poder comparar resultados. Creo que sería bueno que se publicaran todas y cada una de las estadísticas que se definieran, para que cuando se publiquen resultados no solo aparezcan los números favorables, y que aquellos aspectos en los que pueda mejorar el protocolo oportuno sean públicos para que futuras evoluciones puedan hacer mejorar esas cifras, partiendo de los buenos resultados alcanzados en otros aspectos de la versión anterior. Creo que esta filosofía global de trabajo colectivo, puede aportar más valor al trabajo individual

que actualmente.

- Sería importante también realizar un mínimo de dos tipos de evaluación dependiendo del número de vehículos que existan en el entorno planteado. Según el momento y la vía en la que actúe un protocolo real puede haber una saturación de vehículos o por el contrario puede que haya tan pocos que resulte imposible establecer enlaces entre dos de ellos por la distancia que les separa. Aunque se podría plantear mil situaciones distintas, creo que un mínimo de dos, sería suficiente para una evaluación genérica y tampoco sería demasiado exigente para animar a aquellos que decidan publicar sus resultados siguiendo el estándar. La primera de las situaciones sería con un número de vehículos suficientes para que se puedan establecer comunicaciones entre vehículos cada vez que se requiera. La otra situación sería aquella en la que, al menos de vez en cuando, se intentara establecer una comunicación y no existieran vehículos con los que poder establecer un enlace.

Como resumen de lo anteriormente expuesto decir que sería interesante realizar cuatro tipos de análisis: en función del entorno (urbano e interurbano) y de la densidad de vehículos (alta o baja). Para cada una de las cuatro situaciones habría que definir con qué estadísticas de referencia vamos a evaluar el rendimiento, obteniendo finalmente cuatro grupos de estadísticas (porcentuales o en valores absolutos), cuyos valores debería mostrar el autor del protocolo una vez realizadas las pruebas pertinentes. Para presentarlas a continuación gráficamente en la tabla, diremos que a cada grupo de estadísticas le asignamos un nombre aleatorio: W, X, Y, Z.

	Alta densidad	Baja densidad
Entorno urbano	W	X
Entorno interurbano	Y	Z

A continuación seguiremos con las conclusiones a nivel de protocolo. Como se ha comentado

anteriormente muchas veces resulta difícil encasillar a un protocolo dentro de un grupo por su tipología, pero más difícil aún resulta compararlos por su rendimiento debido a la diversidad de análisis a las que estos protocolos se someten y resulta tarea imposible analizarlos todos partiendo de cero para comparar sus resultados. Aún así a lo largo de este proyecto se ha intentado en la medida de lo posible analizarlos uno por uno, observando sus puntos fuertes y débiles, y aunque ahora no nos centraremos en analizarlos todos de nuevo, sí que parece importante resaltar metodologías y aspectos concretos de algunos protocolos que pueden ser interesantes según su tipología, de cara a servir de referencia en futuras implementaciones de nuevos protocolos.

Comenzaremos con los protocolos unicast de tipo reactivo. Una estrategia interesante es la que implementan PRAODV y PRAODV-M. Partiendo de que los nodos informan periódicamente a sus nodos vecinos de su velocidad de desplazamiento, ambos protocolos utilizan dicha información para establecer unos tiempos de vida de enlaces. Esos tiempos de vida son los que emplean para elegir una ruta u otra pasando por distintos enlaces, en lugar de seleccionar simplemente el camino más corto.

Otra estrategia interesante es la que adopta DNVR, que asigna a cada nodo un identificador con una longitud variable, pero en cualquier caso pequeña. A partir de esos identificadores se construye el vector de ruta para un paquete. Ese vector es la suma de varios identificadores de nodos que el paquete tiene que atravesar. Con ello se consigue reducir la carga de control que portan los paquetes individualmente, mejorando la eficiencia por bit transmitido. Esta mejora resulta apropiada para los protocolos reactivos que descienden de DSR, ya que los que descienden de AODV no portan información acerca de los nodos a atravesar en el interior del paquete.

Otro método que me parece digno de resaltar es el que emplea CAR para realizar el beaconing. Se trata de un “beaconing adaptativo” en el que el número de beaconings que se ejecutan en un periodo de tiempo es inversamente proporcional al número de nodos existentes alrededor del nodo que realiza el beaconing. De este modo se reduce la sobrecarga de la red en entornos con una alta afluencia de nodos.

Por último, creo que es interesante resaltar que DYMO redefine el concepto de rutas, como caminos bidireccionales y que se almacenan en los nodos intermedios (proviene de AODV). Muchas veces la comunicación entre dos puntos es de ida y vuelta, de forma que con DYMO un solo establecimiento de ruta podría darnos cabida a dos sentidos de comunicación.

Sobre los algoritmos unicast de tipo proactivo, decir que son de los grupos de protocolos que arrojan peores resultados debido a la alta movilidad de los nodos en las VANET y al continuo cambio topológico de la red. Generalmente estos protocolos y debido a las especiales características de las VANET introducen mucha sobrecarga en la red a priori, aún cuando no se está transmitiendo nada. Un método interesante para reducir la pesada sobrecarga proactiva consiste en que los nodos informen a sus vecinos sobre los datos que conocen de la red (otros vecinos, rutas existentes) pero con la diferencia de que se haga en modo diferencial. Así, una vez adquirido un conocimiento general del estado de la red por parte de un nodo, solo recibirá información relativa a los cambios que en esta se produzcan, evitando que se envíen de nuevo datos ya conocidos por los nodos. Otro punto interesante en este campo es el que emplea el protocolo LOUVRE. Tratando de reducir la sobrecarga proactiva, LOUVRE define una red superpuesta con una serie de “hitos” fijos situados en los cruces y que sirven de referencia para los nodos de la red. Además, y si hay una densidad de nodos suficiente entre hitos, se establece un enlace superpuesto entre hitos. Conceptualmente las ideas básicas son establecer *puntos de referencia(hitos)* para los nodos vehiculares tratando de hacer la red más estática, y crear *enlaces de referencia* entre hitos con independencia de los nodos que circulen entre esos puntos de referencia. Así se pueden reducir los efectos de la alta movilidad VANET.

Sobre los protocolos clusterizados diremos que son los que menos han evolucionado. Parece cierto que en general los investigadores en protocolos VANET existentes por todo el mundo no están decididos a crear más algoritmos de este tipo, y bien es cierto que es el grupo de protocolos unicast en el que menos algoritmos podemos encontrar. Un factor decisivo y lastre para este tipo de algoritmos es que en su intención por liberar de carga a la mayoría de nodos de la red, se concentra el tráfico en los nodos centrales de cada celda. Estos nodos coordinan las propias celdas, deciden los integrantes que las conforman, realizan los handover de nodos entre celdas y además, por ellos pasa el tráfico de los nodos integrantes de la celda, lo que al final se traduce en que los nodos coordinadores acaban convirtiéndose en verdaderos cuellos de botella, donde gran parte del tráfico existente es tráfico de control, reduciendo la eficiencia de los datos transmitidos. En un entorno tan dinámico como el de las redes VANET hay que apostar por protocolos que actúen de una manera lo más distribuida posible, para aprovechar la capacidad de comunicación y procesamiento de cada nodo, reduciendo al mínimo las pesadas cargas algorítmicas de control de la propia red.

Sobre los protocolos multicast (broadcast, multicast y geocast) decir que por definición implican una carga elevada de la red, como en el caso de los multicast, y que el tráfico generado es prácticamente proporcional al generado por comunicaciones unicast y multiplicado por el número de nodos a los que queremos transmitir. Por ello y además de los esfuerzos realizados por los creadores de este tipo de protocolos, hay que tener presente que el uso de estos protocolos ha de estar extremadamente restringido a servicios puntuales que requieran de sus algoritmos y que normalmente son informativos. Dentro de estos servicios podemos considerar los que ya hemos ido comentando a lo largo de este PFC: información a los nodos cercanos en caso de accidente (broadcast), transmisión de información entre servicios de emergencias (multicast) o avisos de situaciones peligrosas emitidos desde la propia infraestructura vial, por elementos fijos controlados en remoto (geocast).

Ahondaremos ahora en el caso de los broadcast, de los cuales concluimos al final de su apartado correspondiente, que en situaciones críticas (ejemplo: aviso del propio vehículo accidentado a otros vehículos en caso de accidente, al detectar el impacto mediante un sensor, activarse el airbag...), unas fracciones de segundo pueden ser vitales a la hora de evitar otros accidentes en cadena, por lo tanto los broadcast más básicos (inundación pura) serían los protocolos que tienen un menor retardo ya que no realizan cálculos de ningún tipo antes de transmitir. Además, en el supuesto de un accidente creo que dejaría de tener importancia el que durante la inundación broadcast se sature la red con esta información y no funcionen otras comunicaciones que estaban establecidas antes, ya que en ese momento, la prioridad absoluta es la de evitar más accidentes. Resta señalar un par de aspectos importantes de cara a estas “alertas de emergencia automatizadas”:

- Sería interesante mencionar que al broadcast habría que limitarlo de alguna manera para que no se expanda eternamente, en el tiempo y en número de saltos. Quizás los paquetes deberían llevar un valor temporal de “caducidad” del paquete para que fuera descartado automáticamente por los propios nodos transcurrido un tiempo prudente y además podrían llevar un número de saltos máximos (TTL), que fuera directamente proporcional a la velocidad con la que se desplacen los vehículos normalmente en esa vía, para que se transmita a un mayor número de vehículos cuanto mayor sea la velocidad de circulación por esa vía. Con este par de valores adjuntos al paquete, que no retardarían de manera significativa la transmisión conseguiríamos que la red se recuperara una vez que la situación de extrema urgencia ha finalizado. La información de la velocidad de las vías se puede extraer de los mapas GPS que deberían incorporar

como complemento los elementos hardware VANET, instalados en cada vehículo.

- Como se concluyó en el apartado correspondiente no en todos los tipos de vías es interesante alertar a todos los demás nodos cercanos mediante un broadcast ya que podría resultar contraproducente. Habría que valorar cual es el retardo que introduce un protocolo geocast empleado para tal efecto y si dicho tiempo resulta significativo para evitar un accidente, pero en el caso concreto de una autovía o autopista, con dos calzadas y sentidos de circulación diferenciados, podría resultar contraproducente avisar a los nodos en la otra calzada de la existencia del accidente, ya que de ninguna forma se ven afectados y la alerta repentina podría ocasionar algún otro accidente. Por ello propongo la utilización en este tipo de vías de protocolos geocast que diferencian la zona donde transmiten.

En cuanto a los protocolos unicast basados en localización geográfica podemos decir que es el grupo en el que más esfuerzo se está realizando por parte de la mayoría de investigadores del campo, es la rama en la que mayor evolución se está produciendo y donde se están obteniendo claramente unos mejores resultados. Todo ello es gracias a una multitud de estrategias propuestas, muchas de ellas muy positivas y que introducen grandes mejorías. A continuación dejaremos constancia de cuales nos han parecido más acertadas y señalándolas como proposición en su conjunto y para servir de referencia a futuras implementaciones de protocolos

La primera de ellas es la estrategia *greedy* (codicioso) [Karp, 2000] utilizada en muchos de estos protocolos. El método consiste en realizar un avance hacia el destino, eligiendo en cada nodo intermedio el siguiente salto, que será el que proporcione un mayor avance. Los cálculos se realizan con la información de localización GPS, y son cálculos relativamente rápidos y que se puede ejecutar en el propio nodo, al contrario que cualquier otro método (reactivo, proactivo, *clusteres*) que requiere de un procesamiento distribuido para obtener rutas de transmisión.

Este método por sí solo no resulta del todo efectivo, porque en entornos urbanos con nodos relativamente cercanos, puede hacer que los propios vehículos intenten enviar a nodos situados en otras carreteras, habiendo en muchas ocasiones obstáculos (edificios mayormente) que interrumpen la transmisión. Por ello un método complementario que mejoraría la eficacia de la transmisión sería el empleo de mapas urbanos. Teniendo constancia de la topología de la ciudad, el protocolo de enrutamiento puede focalizar su transmisión en los nodos que circulan por su misma vía, evitando

así las mencionadas interferencias. Los vehículos próximos a los cruces de vías serían los encargados de redireccionar los paquetes hacia otras vías para continuar con el avance hacia el destino. En el caso de no existir ningún nodo en el cruce en el que se deba redireccionar, se puede emplear una táctica *carry-and-forward* mediante la que el nodo correspondiente conserva el paquete hasta alcanzar el cruce, para después hacer un *forwarding* del paquete.

GyTAR [Jerbi, 2007] asigna a los siguientes posibles cruces intermedios una puntuación en función del tráfico existente por cada carretera que lleva a esos cruces y del avance que suponen con respecto al destino. El cruce con mayor puntuación era hacia donde se reenvía el paquete. El problema de este método es que requiere de una información fiable del estado del tráfico para lo que existen dos soluciones posibles: calculo distribuido del tráfico, que resulta bastante impreciso y existen pocos algoritmos implementados, o instalación de una infraestructura de sensores por todas las ciudades, lo cual es bastante improbable por el coste de despliegue.

GpsrJ+ [Lee, 2007] introdujo una mejora en el enrutamiento entre cruces, la selección dinámica de nodos intermedios, con la que se evita pasar por los nodos situados en los cruces de manera obligatoria (como ocurría en los protocolos anteriores) en caso de que no se vaya a cambiar la dirección de circulación, ahorrando saltos intermedios innecesarios.

Ya en GSR [Lochert, 2003] se utilizaba información adicional de los propios nodos para hacer una mejor avance *greedy*. Esta información adicional era la *dirección* y *velocidad* de desplazamiento de los nodos, que ayuda a disminuir en gran medida los paquetes que se envían realizando “avances negativos”. Para el conocimiento de esos datos por parte de los nodos vecinos, cada vehículo incluye su dirección y velocidad de desplazamiento en el *beaconing* periódico.

Para algunas aplicaciones sería interesante alguna evolución del protocolo ExOR [Biswas, 2005] que con su algoritmo ligero de establecimiento de subgrupos dentro de la red, es capaz de reducir a un cuarto el Jitter entre emisor y receptor.

Para ir concluyendo con nuestra selección de métodos basados en localización, señalar que GPSR + AGF [Naumov, 2006] añade un campo a cada paquete con el que se va controlando su tiempo de vida (desde que se emite el paquete) y junto a los vectores velocidad de los nodos vecinos, se podía determinar si los vecinos seguían siendo alcanzables por los nodos intermedios a la hora de reenviar.

Unos y otros de estos métodos se pueden complementar para extraer una estrategia básica que cubra la más amplia casuística que se puede dar en el enrutamiento VANET. Pero además de la propia estrategia básica del protocolo, es importante que el protocolo sea capaz de recuperarse frente a errores de transmisión para ser más eficaz y fiable al mismo tiempo. En GeOpps [Leontiadis, 2007] cada nodo calcula su METD (Maximum Estimated Time to Destiny), los nodos se informan entre sí, y el que tenga un tiempo menor estimado será el siguiente portador. Mientras no exista un nodo que mejore ese tiempo con respecto al portador, el paquete se conservará en el propio nodo. Esta táctica puede ser muy útil para recuperarse de una situación en la que la estrategia *greedy* no pueda avanzar hacia el destino por no haber nodos emplazados en la ruta hacia el destino (*local maximum*). En ese caso y en ese nodo, el tiempo estimado hasta el destino (METD) crece muy rápidamente. Pero si existen alternativas pasando por otros nodos, aún cuando haya que realizar algún avance negativo al principio, podemos recuperarnos de la situación y entregar finalmente el paquete. El caso de Geodtn+Nav [Cheng, 2008] es un claro ejemplo de estrategias de recuperación a distintos niveles. Primero sigue una estrategia *greedy*, si esta falla pasará a otra estrategia perimetral (dando un rodeo) y si por último falla esta estrategia porque el nodo no tiene vecinos, o los que hay no aportan un avance positivo hacia el destino, se seguirá una estrategia *store-carry-forward* en la que se conserva el paquete hasta encontrar un nodo que haga progresar al paquete hacia el destino.

En resumen y como conclusión general, queda un largo camino por desarrollar para cubrir la amplia casuística que se puede dar en el enrutamiento de redes vehiculares. Si bien es cierto que con diferencia los protocolos que usan la información geográfica son los actualmente más avanzados y los que más servicios pueden cubrir, creo que es cierto también que resulta vital desde ya estandarizar la publicación de estos protocolos o al menos estandarizar la publicación de los resultados obtenidos en las simulaciones. Existe un gran interés económico tras este tipo de redes y aunar los distintos esfuerzos que se realizan desde muchos lugares del mundo puede hacer que se evolucione sobre los protocolos que realmente funcionan, que se reconozca el trabajo de aquellos desarrolladores que están realizando una gran labor innovando, frente a autores de protocolos que no dejan de ser simples copias de otros implementado anteriormente, pero sobretodo y de interés general, que se avance rápidamente en este campo, que es el enrutamiento VANET y que se encuentra en la fase de la adolescencia.

Bibliografía

- ♣ [Afzal, 2008] “RSRP: A Robust Secure Routing Protocol for Mobile Ad hoc Networks ”, Syed Rehan Afzal, Subir Biswas, Jong-bin Koh, Taqi Raza, Gunhee Lee, and Dong-kyoo Kim , Graduate School of Information and Communication, Ajou University.

- ♣ [Appavoo, 2008] “SENCAS: A Scalable Protocol for Unicasting and Multicasting in a Large Ad hoc Emergency Network”; P. Appavoo and K. Khedo, University of Mauritius, 2008.

- ♣ [Bachir, 2003] A. Bachir and A. Benslimane, “A multicast protocol in ad hoc networks intervehicle geocast,” in *Proceedings of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference*, vol. 4, pp. 2456–2460, 2003.

- ♣ [Basagni, 1998] Basagni, S., Chalamtac, I., and Syrotiuk, V. R. “A Distance Routing Effect Algorithm for Movility (DREAM)”, International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 76-84, 1998.

- ♣ [Biswas, 2005] Sanjit Biswas and Robert Morris, “ExOR: Opportunistic Multi-Hop Routing for Wireless Networks”. M.I.T. Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, 2005.

- ♣ [Blum, 2003] J. Blum, A. Eskandarian, and L. Hoffman, “Mobility management in IVC networks,” in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2003.

- ♣ [Briesemeister, 2000] L. Briesemeister, L. Schäfers, and G. Hommel, “Disseminating messages among highly mobile hosts based on inter-vehicle communication,” in *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 522–527, 2000.
- ♣ [Caleffi, 2007] Marcello Caleffi, Giancarlo Ferraiuolo, and Luigi Paura; “Augmented Tree-based Routing Protocol for Scalable Ad Hoc Networks”, 2007.
- ♣ [Cheng, 2008] Pei-Chun Cheng, Kevin C. Lee, Mario Gerla, Jerome Härri; “GeoDTN+Nav: A Hybrid Geographic and DTN Routing with Navigation Assistance in Urban Vehicular Networks”.
- ♣ [Clausen, 2003] Clause, T. and Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). Request for Comments, 2003. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
- ♣ [Durrezi, 2005] M. Durrezi, A. Durrezi, and L. Barolli, “Emergency broadcast protocol for intervehicle communications,” in *ICPADS '05: Proceedings of the 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems—Workshops (ICPADS'05)*, 2005.
- ♣ [Eberhardt, 2004] Maihöfer and R. Eberhardt, “Geocast in vehicular environments: Caching and transmission range control for improved efficiency,” in *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 951–956, 2004.
- ♣ [Eberhardt, 2005] Maihöfer, T. Leinmüller, and E. Schoch, “Abiding geocast: time-stable geocast for ad hoc networks,” in *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks (VANET '05)*, pp. 20–29, 2005.

- ♣ [Eriksson, 2007] J. Eriksson, M. Faloutsos and S. Krishnamurthy. “DART: Dynamic Address Routing for Scalable Ad Hoc and Mesh Networks”. *IEEE- ACM Transactions on Networking*, vol.15, no. 1, 2007, pp.119-132., 2007.

- ♣ [Floyd, 1994] Floyd, S. and Jacobson V. “The Synchronization of Periodic Routing Messages”. *IEEE/ACM Transaction on Networking*. Vol. 2, issue 2, pp. 122-136.

- ♣ [Flury, 2006] Roland Flury, Roger Wattenhofer Computer Engineering and Networks Lab, ETH Zurich; “MLS: An Efficient Location Service for Mobile Ad Hoc Networks” , 2006.

- ♣ [Füßler, 2003] H. Füßler, J. Widmer, M. Käsemann, M. Mauve, and H. Hartenstein, “Contention-Based Forwarding for Mobile Ad-Hoc Networks,” *Elsevier’s Ad Hoc Networks*, vol. 1, no. 4, pp. 351–369, 2003.

- ♣ [Hannes, 2004] Füßler, H., Hannes, H., Jörg, W., Martin, M., Wolfgang, E. (2004), Contention-Based Forwarding (CBF, “Contention-Based Forwarding for Street Scenarios,” *Proceedings of the 1st International Workshop in Intelligent Transportation (WIT 2004)*, pages 155–160, Hamburg, Germany, March 2004.

- ♣ [Heissenbüttel, 2003] M. Heissenbüttel and T. Braun, “BLR: Beacon-Less Routing Algorithm for Mobile Ad-Hoc Networks,” *to appear in Elsevier’s Computer Communications Journal (Special Issue)*, 2003.

- ♣ [Hsiu, 2009] Pi-Cheng Hsiu, Student Member, IEEE, and Tei-Wei Kuo, Senior Member, IEEE, “A Maximum-Residual Multicast Protocol for Large-Scale Mobile Ad Hoc Networks”, 2009]

- ♣ [Hou, 1986] T. Hou and V. Li, “Transmission range control in multihop packet radio networks,” *IEEE Transactions on Communication*, vol. 34, no. 1, pp. 38–44, Jan. 1986.
- ♣ [IEEE 1609] IEEE 1609 - “Family of Standards for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)”.
- ♣ [IETF’s MANET working group, 2010] <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-dymo-21>.
- ♣ [Jacquet, 2002] Jacquet, P., Laouiti, A., Minet P., and Viennot, L. “Performance of multipoint relaying in ad hoc mobile routing protocols”. Pp. 38-398. *Proceedings of the Second International IFIP-TC6 Networking conference on Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; and Mobile and Wireless Communications*.
- ♣ [Jerbi, 2007] Moez Jerbi, Sidi-Mohammed Senouci, Rabah Meraihi and Yacine Ghamri-Doudane. “An Improved Vehicular Ad Hoc Routing Protocol for City Environments”, 2007.
- ♣ [Karp, 2000] B. Karp and H.T. Kung, “GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks,” in *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, 2000.
- ♣ [Khwildi, 2007] A. N. Al-Khwildi, K. K. Loo and H. S. Al-Raweshidy. “Wireless Network and Communications Group (WNCG”, School of Engineering & Design, Brunel University, 2007.

- ♣ [Korkmaz, 2004] G. Korkmaz, E. Ekici, F. Özgüner, and Ü. Özgüner, “Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems,” in *ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, pp. 76–85, 2004.

- ♣ [Koubek, 2008] Koubek, Martin; Rea, Susan; Pesch, Dirk (2008-09-11), "A Novel Reactive Routing Protocol for Applications in Vehicular Environments", *The 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2008)* (Finland), [ISSN 1883-1192](#).

- ♣ [Le, 2006] “A Dynamic Geographic Hash Table for Data-Centric Storage in Sensor Networks”. Thang Nam Le, Wei Yu, Xiaole Bai and Dong Xuan , This full text paper was peer reviewed at the direction of IEEE Communications Society subject matter experts for publication in the WCNC 2006 proceedings, 2006.

- ♣ [LeBrun, 2005] Jason LeBrun, Chen-Nee Chuah, Dipak Ghosal, Michael Zhang, “Knowledge-Based Opportunistic Forwarding in Vehicular Wireless Ad Hoc Networks”, 2005.

- ♣ [Lee, 2005] Young J. Lee and George F. Rile. “Dynamic Nix-Vector Routing for Mobile Ad Hoc Networks”, 2005.

- ♣ [Lee, 2006] Yeng-Zhong Lee, Mario Gerla, Jason Chen, Jiwei Chen, Biao Zhou and Antonio Caruso, “Direction Forward Routing for Highly Mobile Ad Hoc Networks”, 2006.

- ♣ [Lee, 2007] Kevin C. Lee, Jérôme Häaerri, Uichin Lee, Mario Gerla. “Enhanced Perimeter Routing for Geographic Forwarding Protocols in Urban Vehicular Scenarios”, 2007.

- ♣ [Lee, 2008] K. C. Lee, P.-C. Cheng, J.-T. Weng, L.-C. Tung, and M. Gerla. “VCLCR: A

- practical geographic routing protocol in urban scenarios”. Technical Report 080009, UCLA, 4732 Boelter Hall, Los Angeles, CA 90095, March 2008.
- ♠ [Lee, 2008, 2] Kevin C. Lee, Michael Le, Jérôme Härri, Mario Gerla; “LOUVRE: Landmark Overlays for Urban Vehicular Routing Environments”, 2008.
- ♠ [Lee, 2009] Kevin C. Lee, Uichin Lee, Mario Gerla, University of California .; “TO-GO: TOPOlogy-assist Geo-Opportunistic Routing in Urban Vehicular Grids”, 2009.
- ♠ [Leontiadis, 2007] Ilias Leontiadis and Cecilia Mascolo, “GeOpps: Geographical Opportunistic Routing for Vehicular Networks Department of Computer Science”, University College London, 2007.
- ♠ [Li, 2000] Li, J., Jannotti, J., De couto, S. J., and Karger D.R. (2000). “A scalable location service for geographic ad hoc routing preceedings of the 6th acm international conference on mobile computing and networking”, pp 120-130, 2000.
- ♠ [Liao, 2001] W.-H. Liao, Y.-C. Tseng, and J.-P. Sheu, "GRID: A Fully Location-Aware Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks", Telecommunication Systems, Vol. 18, no. 1, 2001, pp. 37-60.
- ♠ [Liao, 2000] W.-H. Liao, Y.-C. Tseng, K.-L. Lo, and J.-P. Sheu, “GeoGRID: A geocasting protocol for mobile ad hoc networks based on GRID,” Journal of Internet Technology, vol. 1, no. 2, pp. 23–32, Dec. 2000.
- ♠ [Lin, 2006] Ya-Jeng Lin, Shihpyng Shieh and Warren W. Lin. “Lightweight, pollution-

- attack resistant multicast authentication scheme”, ASIACCS '06, Taipei, Taiwan, Mar 2006.
- ♣ [Liu, 2004] G. Liu, B.-S. Lee, B.-C. Seet, C.H. Foh, K.J. Wong, and K.-K. Lee, “A routing strategy for metropolis vehicular communications,” in *International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 134–143, 2004.
 - ♣ [Liu, 2006] Chang Liu and Winston K.G. Seah, “Skewed Map Forwarding for Location-Based Multipath Routing in Ad Hoc Networks”, 2006.
 - ♣ [Lochert, 2003] C. Lochert, H. Hartenstein, J. Tian, D. Herrmann, H. Füßler, and M. Mauve, “A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments,” in *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2003)*, pp. 156–161, June 2003.
 - ♣ [Lochert, 2005] C. Lochert, M. Mauve, H. Füßler, and H. Hartenstein, “Geographic routing in city scenarios,” *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review (MC2R)*, vol. 9, no. 1, pp. 69–72, Jan. 2005.
 - ♣ [Maltz, 1996] D.B. Johnson and D.A. Maltz, “Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks” (Kluwer Academic, 1996).
 - ♣ [Maltz, 1998] D. Johnson, D.A. Maltz and J. Broch, “The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks” (Internet-draft), in: *Mobile Adhoc Network (MANET) Working Group, IETF* (1998).
 - ♣ [Mauve, 2001] Mauve, M., Widmer, J., and Hannes H. “A survey on position-based routing in mobile ad-hoc networks”. *IEEE Network Magazine*, 15(6):30-39, 2001.

- ♣ [N. Faisal, 2004] C.-C. Ooi and N. Faisal, “Implementation of geocast-enhanced AODV-bis routing protocol in MANET,” in *Proceedings of the IEEE Region 10 Conference*, vol. 2.
- ♣ [Namboodiri,2004] V. Namboodiri, M. Agarwal, and L. Gao, “A study on the feasibility of mobile gateways for vehicular ad-hoc networks,” in *Proceedings of the First International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, pp. 66–75, 2004.
- ♣ [Naumov, 2006] V. Naumov, R. Baumann, T. Gross, “An Evaluation of InterVehicle Ad Hoc Networks Based on Realistic Vehicular Traces”, 2006.
- ♣ [Naumov, 2007] Valery Naumov; Thomas R. Gross, “Connectivity-Aware Routing (CAR) in Vehicular Ad Hoc Networks”, (ETH Zurich, Switzerland), 2007.
- ♣ [Navas, 1996] T. Imielinski and J. Navas, “GPS-based addressing and routing,” Internet Engineering Task Force, Network Working Group, Request for Comments, RFC 2009, Nov. 1996.
- ♣ [Nzouonta, 2008] Josiane Nzouonta, Neeraj Rajgure, Guiling Wang, Member, “VANET Routing on City Roads using Real-Time Vehicular Traffic Information”. IEEE, and Cristian Borcea, Member, IEEE , 2008.
- ♣ [Ogier, 2004] Ogier, R. G., Lewis, M.G., and Templin, F. L. “Topology Dissemination based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF)”, 2004. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3684.txt>.
- ♣ [Oka, 2010] Hiroaki Oka and Hiroaki Higaki. Department of Computers and Systems

- Engineering. “Wireless Multihop Communication in Sparse Vehicle Ad-Hoc Networks”, 2010.
- ♣ [Pandey, 2006] Ashish Pandey, Md. Nasir Ahmed, Nilesh Kumar, P. Gupta, HRPLS (Hybrid Routing Protocol for Large Scale Mobile Ad Hoc Networks with Mobile Backbones): “A Hybrid Routing Scheme for Mobile Ad Hoc Networks with Mobile Backbones”, *IEEE International Conference on High Performance Computing, HIPC 2006*, pp. 411-423, Dec 2006.
 - ♣ [Park,1997] Park, V.D., Corson, M.S. (1997), “A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks,” *INFOCOM '97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE* , vol.3, no., pp.1405-1413 vol.3, 7-12 Apr 1997.
 - ♣ [Pearlman, 1997] Z.J. Haas and M.R. Pearlman, “The zone routing protocol (ZRP) for ad hoc networks,”in *Internet draft—Mobile Ad hoc NETWORKING (MANET)*, Working Group of the Internet Engineering Task Force (IETF), Nov. 1997.
 - ♣ [Pei, 2000] Pei, G., Gerla, M. and Chen, T. W. (2000). “Fisheye state routing in mobile ad hoc networks,” in *Proceeding of ICDCS 2000 workshops*, 2000.
 - ♣ [Perkins, 2003] Perkins, C.; Belding-Royer, E.; Das, S. (July 2003). “Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing”, 2003.
 - ♣ [Perrig, 2001] A. Perrig, R. Canetti, D. Song and J.D. Tygar. “*Efficient and secure source authentication for multicast*”, in *Proceedings of the Network and Distributed System Security Symposium, NDSS'01 (February 2001)*.

- ♣ [Ratnasamy, 2002] S. Ratnasamy, B. Karp, L. Yin, F. Yu, D. Estrin, R. Govindan, and S. Shenker, “GHT: A geographic hash table for data-centric storage in sensornets”. In Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA), 2002.

- ♣ [Ratnasamy, 2003] S. Ratnasamy, B. Karp, L. Yin, F. Yu, D. Estrin, R. Govindan, and S. Shenker, “Data-centric storage in sensornets with GHT, A Geographic Hash Table”. In Journal of Mobile Networks and Applications (MONET), Kluwer, 2003.

- ♣ [Riley, 2001] G. Riley, M. Ammar, and E. Zegura, “Efficient routing using Nix- Vectors,” IEEE HPSR 2001, May 2001.

- ♣ [Shah, 2001] Samarh H. Shah and Klara Nahrstedt. “Predictive location-based qos routing in mobile ad hoc networks”. Technical Report UIUCDCS-R-2001-2242/ UILU- ENG-2001-1749, Department of CS, UIUC, September 2001.

- ♣ [Santos, 2005] R.A. Santos, A. Edwards, R. Edwards, and L. Seed, “Performance evaluation of routing protocols in vehicular adhoc networks,” *The International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, vol. 1, no. 1/2, pp. 80–91, 2005.

- ♣ [Schnauffer, 2008] Sascha Schnauffer and Wolfgang Effelsberg. Computer Science IV - University of Mannheim, Seminargebäude A5; “Position-Based Unicast Routing for City Scenarios”, 2008.

- ♣ [Sommer, 2010] “The DYMO routing protocol in VANET scenarios” – Christoph Sommer, 2010.

- ♣ [Strutt, 2006] Guenael Strutt, company: Motorola. HWMP routing protocol document 11-06-1778r1. “Hybrid Wireless Mesh Protocol: Default path selection protocol for interoperability”, 2006.
- ♣ [Sun, 2000] M. Sun, W. Feng, T.-H. Lai, K. Yamada, H. Okada, and K. Fujimura, “GPS-based message broadcasting for inter-vehicle communication,” in *ICPP '00: Proceedings of the 2000 International Conference on Parallel Processing*, 2000.
- ♣ [Vaidya, 2000] Y.-B. Ko and N. H. Vaidya, “Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks,” *Wireless Networks*, vol. 6, no. 4, pp. 307–321, 2000.
- ♣ [Vilalta, 2002] Vilalta, R. et al. Predictive Algorithms. Management of Compute Systems, vol. 41, num. 3, 2002.
- ♣ [Young-Bae, 1999] Young-Bae Ko and Nitin H. Vaidya, “Geocasting in mobile ad hoc networks: Location-based multicast algorithms,” in Proceedings of the 2nd Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA 99), New Orleans, USA, Feb. 1999, pp. 101–110.
- ♣ [Young-Bae, 2000] Y. B. Ko and N. H. Vaidya, “GeoTORA: A protocol for geocasting in mobile ad hoc networks”, in Proceedings of the 8th International Conference on Network Protocols (ICNP), Osaka, Japan, Nov. 2000, pp. 240–250.
- ♣ [Young-Bae, 2002] Young-Bae Ko and Nitin H. Vaidya, “Flooding-based geocasting protocols for mobile ad hoc networks,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 7, no. 6, pp. 471–480, 2002.