



DESPLIEGUE DE REDES MÓVILES INALÁMBRICAS *AD HOC* EN LANCHAS DE INSTRUCCIÓN DE LA ARMADA

Rafael ASOREY CACHEDA
Profesor del Centro Universitario de la Defensa
Escuela Naval Militar
Doctor ingeniero de Telecomunicación

Manuel MARÍN LÓPEZ



Introducción



L fin principal de las comunicaciones militares es servir al Mando, permitiendo ejercer el Mando y Control sobre una Fuerza en un ámbito mayor del que sería posible sin ellas.

El fin secundario es facilitar y hacer expeditivo el intercambio de información entre individuos y grupos de individuos. En este sentido, las comunicaciones sirven de apoyo a operaciones, inteligencia, logística y administración, todas ellas esenciales en el ejercicio del Mando.

La finalidad de las comunicaciones navales es establecer y mantener enlaces fiables, seguros y rápidos, tanto en paz como en guerra, para posibilitar a los mandos y autoridades navales el ejercicio de sus funciones, ya sean estas de mando, administrativas o técnicas.

Concretamente, desde que en el año 1911 el crucero *Extremadura* inaugurara las comunicaciones modernas en nuestra Armada, los enlaces inalámbricos desempeñan un papel fundamental en las comunicaciones navales.

El avance vertiginoso de las tecnologías de la comunicación en el mundo civil se plantea como una fuente de ideas inmensa donde investigar para encontrar su correcta aplicación en la complicada disciplina de las comunicaciones militares.

Esta profunda inmersión en las tecnologías de comunicación no afecta únicamente a la sociedad civil actual, sino que cada vez es mayor la cantidad de información que un buque de guerra necesita compartir entre las unidades de una fuerza naval.

El Centro Universitario de la Defensa (CUD) de Marín ha considerado necesario para la formación de los futuros oficiales de la Armada aportar medios necesarios para que se pueda llevar a cabo la inmersión de sus alumnos en las nuevas tecnologías, de las cuales cada día dependemos más. Dotar a las lanchas de instrucción (figura 1) de un enlace de datos entre ellas, y su unión respectiva con los sistemas informáticos disponibles en tierra nos brinda un amplio abanico de posibilidades para no solamente simular la metodología, sino también el camino que la información debe seguir desde que se extrae, procesa y analiza hasta que llega a su centro de mando y control correspondiente.



Figura 1. Una de las lanchas de instrucción usada por los alumnos en la Escuela Naval Militar.

Este artículo está basado en mi trabajo de Fin de Grado realizado siendo alférez de fragata, durante el curso 2014-2015 en la Escuela Naval Militar (ENM), y que estuvo dirigido y tutelado por el profesor Rafael Asorey Cacheda, del Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar.

Para llevar a cabo esta idea, se realiza el despliegue de un red mallada móvil, que formará parte del amplio equipamiento que los futuros oficiales de la Armada utilizan a diario para su formación en las constantes salidas a la mar, proporcionando un enlace fiable y seguro de datos basado en el concepto aún todavía sin explotar de los enlaces inalámbricos mallados.

En un escenario donde los nodos tienen un carácter móvil, las comunicaciones inalámbricas por microondas de arquitectura punto-multipunto se convierten en una opción muy conveniente para ciertos tipos de aplicaciones como las comunicaciones marinas. Este tipo de redes se conocen por el término MANET (*Mobile Ad hoc Network*). Una red MANET está constituida por múltiples nodos inalámbricos que utilizan enlaces *ad hoc* basados en el estándar IEEE802.11, de manera que no existe un único encaminador del tráfico. La función de encaminar la realiza un algoritmo instalado en cada uno de los interfaces de red, de forma que cada nodo conozca en todo momento la topología, dinámica en el caso de redes móviles.

El éxito obtenido en las pruebas pone de manifiesto la gran proyección de este tipo de estándares hacia un uso profesional en numerosas operaciones reales, donde la distancia entre los nodos no sobrepasa el horizonte.

Un escenario operativo donde su implantación alcanzaría un alto aprovechamiento sería, por ejemplo, entre los integrantes de un TVR (Trozo de Visita y Registro). Estos, sin necesidad de estar en visión directa con el buque madre dispondrían de un ancho de banda más que suficiente para, por ejemplo, equipar un sistema de vídeo en tiempo real a cada miembro. La banda de microondas, pese a sus limitaciones en propagación sin línea directa de visión, dispone de un gran ancho de banda de transmisión. Este problema de propagación, en el caso de que un miembro no disponga de línea de visión con el buque madre, se solucionaría con las retransmisiones automáticas contempladas en las redes inalámbricas MANET.

Su implementación entre los miembros de un TVR sería, únicamente, un posible uso desde el punto de vista de la aplicación. El desarrollo del despliegue expuesto a continuación tiene en cuenta el despliegue a nivel técnico.

El escenario actual referente a las tecnologías de la información en buques militares requiere enlaces seguros de alta capacidad que permitan a los buques intercambiar gran cantidad de información para su posterior evaluación y toma de decisiones (1). En las comunicaciones militares es un factor de rele-

(1) VASSILIOU, M. S.; AGRE, J. R.; SHAH, S. y MACDONALD, T.: *Crucial Differences between Commercial and Military Communications Technology Needs: Why the Military Still*

vancia la disponibilidad de los sistemas, incluso en las condiciones más adversas. Por ello, un sistema de comunicaciones militares debe buscar la mayor independencia posible de infraestructuras externas a él (2).

Un ejemplo muy extendido es el de la telefonía móvil GSM, donde la fiabilidad del enlace de voz no está únicamente supeditada al terminal móvil, sino también a toda la infraestructura desplegada por las compañías telefónicas. Este tipo de redes es una buena opción para el despliegue de una red de comunicaciones, pero solamente funciona bien en lugares próximos a la costa. Por ello, las comunicaciones navales buscan resistencia y redundancia en sus sistemas. Esto explica la razón de por qué todavía, a día de hoy, los buques de la Armada siguen equipando sistemas HF para transmisión de voz y datos cuando otros sistemas, como los de comunicaciones satelitales, ofrecen unas capacidades muchísimo mayores. La respuesta simple es que las comunicaciones navales procuran, en la medida de lo posible, depender lo menos posible de infraestructura de terceros para sus enlaces de voz y datos. Este hecho encaja en el concepto de despliegue de redes inalámbricas *ad hoc* presentado en este artículo.

Una tecnología en auge en las comunicaciones inalámbricas, aunque todavía sin estándares finales preparados para ser desplegados, es conocida en el mundo de las telecomunicaciones como *Wireless Mesh Networks*, cuya traducción sería «Redes Inalámbricas Malladas». Las posibilidades que ofrece

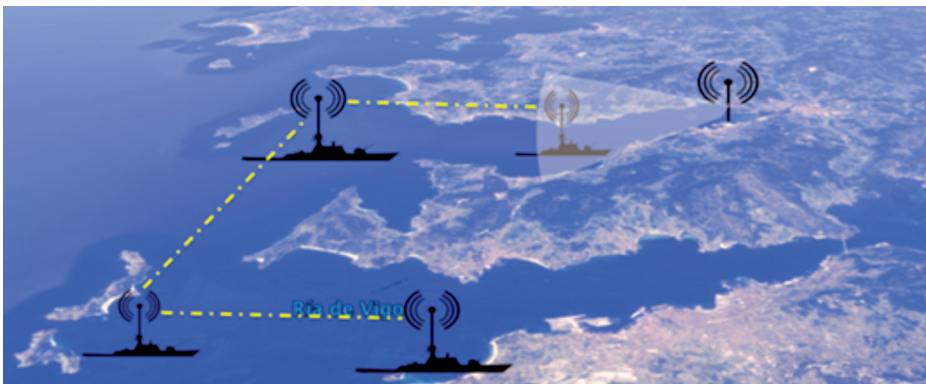


Figura 2. Simulación gráfica de un posible escenario de una MANET.

Needs Its Own Research, 2013. IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2013), pp. 342-347, 18-20 noviembre (2013).

(2) WILCOXSON, D.: *Advantages of Mobile Broadband Communications Services for Military Applications*, 2013. IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2013), pp. 266-272, 18-20 noviembre (2013).

este tipo de redes radican en la capacidad de poder mallar conexiones entre los nodos que componen la red, de forma que una fuerza naval con todas sus unidades en alcance radio entre ellas (una red no disjunta) establezca un enlace punto-multipunto (figura 2). De este modo, no hay un único camino por el que deba viajar la información, sino que será el equipo transmisor del buque quien de forma autónoma evalúe la mejor ruta para llegar del buque origen al buque destino. Los posibles caminos por los que la información puede viajar son directamente proporcionales al número de buques (nodos) que el nodo origen tenga en alcance radio. Puede darse el caso de que los buques origen y destino no estuviesen en alcance radio, debido, por ejemplo, a que se encuentren fuera del horizonte respectivo de cada buque. En este caso, uno o varios intermedios podrían retransmitir la información de manera automática.

El resto de este artículo está organizado como se indica a continuación: en el primer epígrafe se explica el funcionamiento y despliegue de la red, mientras que en el siguiente se detallan las principales conclusiones de este trabajo.

Funcionamiento y despliegue de la red

Los nodos embarcados están dotados de un transceptor basado en *software* Linux embebido y una antena omnidireccional de alta ganancia que opera en la banda ISM en el espectro de 2,4 GHz. La estación de radio dispuesta en tierra es preferiblemente una antena sectorial trabajando en la misma banda. En cualquier caso, y en función de la topología, la antena del equipo terrestre puede variar según las necesidades del terreno a cubrir.

El *software* libre, basado en Linux, permite configurar el protocolo de encaminamiento para la gestión de los enlaces *ad hoc* entre todos los nodos que componen la red. Dada la movilidad de los nodos en la red, el concepto de *Mesh Networking* (3) puede concretarse en un tipo de redes que reciben el nombre de MANET, que es el que mejor define la naturaleza del despliegue de red descrito en este artículo, pues todos los nodos son móviles y no existe un control centralizado. El modo IBSS contemplado en el estándar IEEE 802.11 (4), también conocido como *IEEE Ad Hoc Mode*, representa el punto de partida que fundamenta las redes malladas. Sin embargo, el concepto de multisalto es el que diferencia a las redes malladas respecto al modo IBSS. La razón de esto es que para que el multisalto pueda suceder en una red con enlaces *ad hoc* es necesario un mecanismo o protocolo de encaminamiento.

(3) LUO, J.; HU, H., y ZHANG, Y.: *Wireless Mesh Networking*, Auerbach Publications, Ed. New York (2007).

(4) IEEE Standards Association, *Part 11: Wireless Lan Medium Access Layer and Physical Layer*.

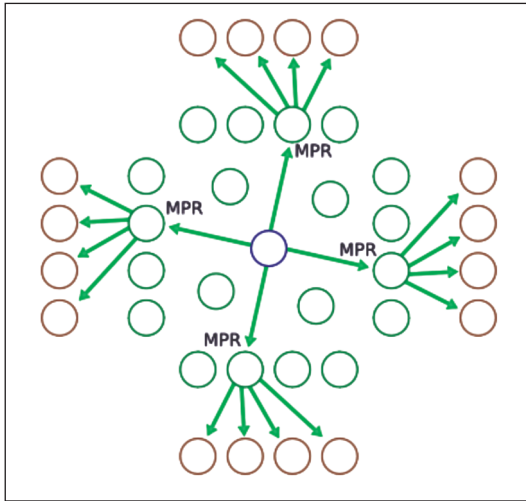


Figura 3. Selección de nodos MPR.

Encaminamiento OLSR

Las redes MANET son las que más se distinguen de las inalámbricas convencionales. En este nivel, los protocolos de encaminamiento (5) deben adaptarse rápidamente a los cambios de la topología de la red para poder mantener una ruta que en todo momento garantice la comunicación de los nodos. En redes MANET, estos actúan como encaminadores de tráfico, retransmitiendo los paquetes por las rutas adecuadas y actualizando las tablas de caminos en tiempo real.

El encaminamiento tradicional se basa en la idea de que todos los equipos dentro de la misma subred siempre utilizan la misma ruta, o que si cambia lo hace en períodos muy prolongados en el tiempo. Esto significa que todos los equipos de una subred están disponibles en muy pocos saltos, típicamente a través de encaminadores o conmutadores. Sin embargo, en redes tipo MANET no es el caso, y es necesario disponer de un mecanismo de encaminamiento.

OLSR es un protocolo de encaminamiento (6) para redes malladas que se basa en tablas proactivas que almacenan los distintos caminos y que utiliza un método de optimización denominado «retransmisión multipunto por inundación» (figura 3). Este mecanismo consiste en elegir un subconjunto de nodos vecinos que cubran el acceso de nodos distantes a dos saltos o más. De esta manera, se consigue que el algoritmo escale de forma razonable con el aumento del número de nodos en la red.

Los protocolos proactivos tienen la ventaja de que mantienen las tablas de encaminamiento actualizadas en todo momento. Presentan la desventaja de que requieren una carga adicional en la red inalámbrica debido a la transmisión periódica de mensajes de control.

(5) PETTERI, K.: *Classification of Ad Hoc Routing Protocols*, Finland: Finish Defence Forces, Naval Academy (2002).

(6) JACQUET P., y CLAUSEN, T.: *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*, RFC 3626 (2003), <https://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>

El intercambio de mensaje de control en una red mallada puede provocar congestión y suponer un grave problema en las comunicaciones. Para solucionarlo, OLSR utiliza los *Multi Point Relay* (MPR), que son nodos encargados de retransmitir paquetes *broadcast*. El número de MPR que retransmite un paquete *broadcast* es siempre inferior al cómputo total de nodos. Con esta técnica se aminora considerablemente el coste de las inundaciones *broadcast*. Sin embargo, el protocolo sigue proporcionando caminos óptimos, pues dichos paquetes llegan a todos los nodos.

Es importante entender que OLSR no encamina tráfico, únicamente actualiza las tablas de caminos disponibles. OLSR no es el único que lo hace, sino que toda la pila de protocolos de encaminamiento para MANET sigue el mismo patrón.

El algoritmo de encaminamiento utiliza diferentes tipos de mensajes con el fin de conocer la topología de la red, detectar vecinos y mantener el estado de enlace entre nodos.

Mensajes HELLO

Son los responsables del estado del enlace, detección de nodos vecinos y señalización de las retransmisiones MPR.

Cada nodo genera dos tablas con la información obtenida de los paquetes HELLO (figura 4). Una primera donde se encuentran todos sus nodos vecinos, es decir, todos los nodos de los que recibe los paquetes HELLO. Junto a la dirección del nodo, se guarda, además, el estado del enlace que mantiene con ellos. Los posibles valores que puede tomar este atributo son: MPR, bidireccional o unidireccional. El enlace se considera asimétrico cuando el nodo recibe paquetes HELLO, pero no se encuentra incluido en ellos como vecino.

Con la información de la tabla de la figura 4, más el conocimiento de los nodos que se encuentran a dos saltos y el vecino que los conecta se genera una

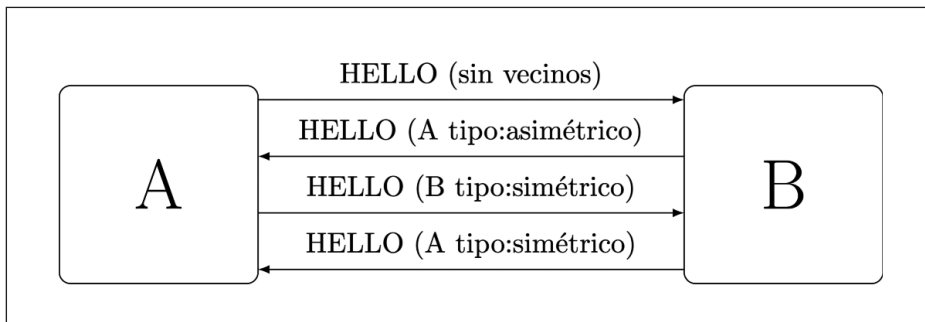


Figura 4. Escenario simplificado de detección de vecinos.

segunda tabla. Para ello, se emplea un algoritmo de mínimos conjuntos, teniendo en cuenta la disponibilidad de los nodos, y se calcula cuáles son sus nodos MPR. Una vez realizados los cálculos, en esta segunda tabla se guardan los nodos de dos saltos y a través de qué nodo MPR se accede ellos. Por lo tanto, con los mensajes HELLO se tiene un conocimiento completo de la red a una distancia de dos saltos. Aparte de la información de los nodos vecinos, los mensajes HELLO añaden cuáles han sido seleccionados por el nodo emisor para que sean sus MPR. Así, cuando se recibe un paquete HELLO, además de conocer la topología de la red de uno o más saltos, sabe si ha sido seleccionado por su vecino como MPR y por tanto está obligado a retransmitir los mensajes de control que reciba a partir de ese momento.

Mensajes TC (control de topología)

Este tipo de mensajes realizan la tarea de la difusión de la topología. Cuando un nodo detecta la llegada de un mensaje de control OLSR, comprueba si el nodo vecino que le ha enviado el mensaje se encuentra en su lista de MPR. En caso afirmativo, vuelve a enviar el mensaje por el resto de nodos de la red, de manera que todos sus enlaces MPR que no hayan recibido el mensaje vuelven a enviarlo de nuevo, extendiéndose el mensaje por la red sucesivamente.

Todos los nodos de la red envían de forma asíncrona un mensaje TC. Si cualquier de ellos detecta que la red no ha sufrido ningún cambio, puede omitir retransmitirlo. Con la información contenida en los mensajes TC, que al menos contienen la tabla de los MPR seleccionados por el nodo fuente, los nodos generan una tercera tabla, denominada «de topología», con información concerniente a toda la red, al igual que tienen una con los vecinos (un salto de distancia) y otra con los nodos a dos saltos de distancia.

Seguridad

En general, para conseguir seguridad en los mecanismos de encaminamiento de tráfico (7) es necesario preocuparse de aspectos como la integridad o la disponibilidad del servicio. Por lo tanto, hay que considerar cómo un nodo debe generar y verificar una firma digital que establezca confianza entre los mensajes de control intercambiados entre los nodos. En este sentido, la criptografía se podría dejar a un lado, ya que requiere más carga de computa-

(7) TONESSEN, Andreas: *Securing OLSR*, (2004). http://www.olsr.org/docs/report_html/node156.html

ción en los nodos, y la confidencialidad y la integridad en los mensajes de control intercambiados no es necesaria. Esto no es siempre así, puesto que en escenarios militares la información referente al encaminamiento es también un parámetro táctico de suma relevancia para el enemigo o potenciales atacantes. En redes MANET se tienen en cuenta varias cuestiones. Algunas son problemas que afectan especialmente a las redes inalámbricas, como el hecho de que la información se difunda de forma indistinta a todos los nodos que se encuentren dentro de un rango de cobertura, mientras que otros son aplicables también a las redes cableadas.

OLSR es un protocolo de encaminamiento proactivo que periódicamente difunde información acerca de la topología de la red. Si la red MANET no estuviese protegida totalmente, la topología se revelaría a cualquier usuario que escuche los mensajes de control. En situaciones donde la topología de la red sea confidencial se deben utilizar técnicas como el intercambio de mensajes de control de tráfico cifrados para evitar que nodos no autorizados accedan a estos mensajes. En las redes MANET basadas en OLSR, cada nodo inyecta a la red información topológica mediante la transmisión de mensajes HELLO y, en el caso de algunos nodos, TC. Si por cualquier razón, un nodo inyecta de manera malintencionada tráfico de control erróneo, la integridad de la red se vería comprometida. A continuación, se exponen ejemplos de situaciones que pueden ocurrir debido a la falta de integridad:

1. Un nodo genera mensajes TC anunciando enlaces a nodos que no son vecinos.
2. Un nodo genera mensajes TC pretendiendo ser otro nodo.
3. Un nodo genera mensajes HELLO anunciando nodos que no son vecinos.
4. Un nodo genera mensajes HELLO pretendiendo ser otro todo.
5. Un nodo reenvía mensajes que han sido alterados previamente.
6. Un nodo se niega a reenviar los mensajes de control de OLSR.
7. Un nodo reenvía una topología antigua de otro nodo.

Una contramedida utilizada en las situaciones 2, 4 y 5 es la autenticación por parte del nodo originador de los mensajes de control. Para los casos 1 y 3 se deben autenticar los enlaces individuales anunciados en los mensajes de control. Sin embargo, para prevenir que los nodos repitan información antigua, es necesario un atributo temporal que permita identificar los paquetes anticuados.

La solución final más factible es finalizar todos los paquetes OLSR con un mensaje firmado. El contenido de este se puede observar en la figura 5.

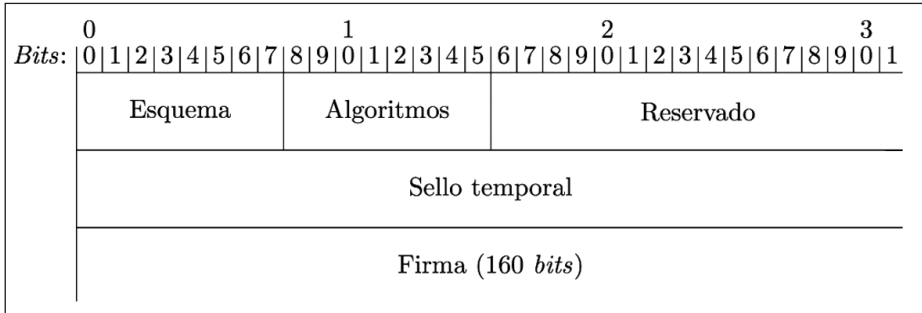


Figura 5. Esquema del mensaje de seguridad en OLSR.

Despliegue de la red

La mayoría de buques de la Armada dispone de equipos de transmisión de datos de radiodifusión HF, enlaces tácticos LOS (*Line of Sight*) y NLOS (*Non Line of Sight*) y enlace satélite con soporte del protocolo TCP/IP, muy ventajoso y versátil dada su facilidad de interacción con otras máquinas.

Dado el propósito docente de las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar y su limitada capacidad de almacenamiento de víveres y de combustible, la distancia a costa está limitada. Es por ello que adaptar un sistema de comunicación satélite, como en los buques de la Armada de mayor porte, resulta poco operativo y provechoso para la aplicación requerida y económicamente inviable.

En el sentido de lo descrito en el párrafo anterior, un enlace LOS mediante microondas de arquitectura punto-multipunto que utilice estándares extendidos es una solución adecuada para el propósito requerido. Un enlace de datos

Tabla 1. Relación de nodos.

Nodo	Transmisor	Antena	PIRE	Dirección IP	
				WLAN0	ETH0
ierra-1	Bullet M2	Antena omnidireccional AOA-2415	42 dBm	192.168.1.30/24	192.168.3.200/22
ancha-1	Bullet M2	Antena omnidireccional AOA-2415	42 dBm	192.168.1.10/24	10.0.10.10/16
ancha-2	Bullet M2	Antena omnidireccional AOA-2415	42 dBm	191.168.1.40/24	10.0.40.10/16
ancha-	Bullet M2	Antena omnidireccional AOA-2415	42 dBm	192.168.1.20/24	10.0.20.10/16

inalámbrico basado en el estándar 802.11 [4], que permita la comunicación directa (un único salto) hasta los límites de la ría de Pontevedra aporta infinidad de aplicaciones posibles en el ámbito docente y de la investigación. Además, a partir del concepto de red MANET, se deduce rápidamente que ese alcance puede escalarse siempre y cuando la disposición espacial de los nodos sea la debida.

Equipos utilizados

Cada una de las embarcaciones está dotada de un conjunto formado por un monopolo vertical y un sistema embebido de transmisión para exteriores en la banda de 2,4 GHz (figura 6).

En lo que se refiere al segmento pasivo del montaje, consta de una antena omnidireccional de exteriores fabricada con un revestimiento de fibra de vidrio y una base de aluminio que permite el anclaje a cualquier tubo cilíndrico de no más de 10 cm de diámetro. La elevada longitud del monopolo vertical en relación a la longitud de onda con la que trabaja provoca como parámetro a resaltar un haz de radiación vertical muy estrecho. Este último parámetro es

el principal motivante para la elección de esta antena en concreto, ya que al tratarse de una antena cuyo patrón de radiación en el plano horizontal es de 360°, si se requiere una de alta ganancia hay que sacrificar irremediabilmente la apertura del lóbulo de radiación en el plano vertical. Esta circunstancia, sin embargo, no es un impedimento en el escenario manejado, debido a que todas las embarcaciones se encuentran a nivel de mar y un haz de transmisión horizontal se puede considerar incluso ventajoso.

El patrón de radiación es una de las variables más importantes a la hora de valorar qué antena elegir para los enlaces inalámbricos entre las lanchas. La



Figura 6. Imagen de la instalación de uno de los nodos en tierra.

estrechez de su lóbulo principal de radiación vertical, de nueve grados, la convierte en una solución viable de cara a equipar los buques con antenas punto-multipunto. Una antena omnidireccional es la solución más económica para el propósito requerido, de tal manera que también se evaluaron otras alternativas, como un *array* de antenas sectoriales. Esta alternativa supone la utilización de algoritmos de gestión de la transmisión, esquemas de multiplexado espaciales que eviten la producción de ruido en la antena vecina que estaría cubriendo el sector adyacente, así como un encarecimiento sustancial en el presupuesto de adquisición de equipos.

El sistema embebido de transmisión consta de un transmisor de radiofrecuencia situado en la banda ISM de 2,4 GHz. Está fabricado por Ubiquiti Networks y dotado con un conector N, igual que el de la antena. Este concepto se denomina *Zero Variable Deployment*, que hace referencia a la ventaja que ofrece despreocuparse de cables coaxiales, ya que en este tipo de transmisores radio estos cables desaparecen. En este caso, el transmisor se conecta directamente al conector N de la antena. Esta característica es fundamental para el éxito del despliegue de la red, pues elimina pérdidas adicionales que se producirían con el empleo de cables coaxiales y conectores de adaptación.

Dispone de un interfaz de red *ethernet* que, aparte de extender la red inalámbrica a cualquier otra máquina, también es el medio de alimentación del transmisor mediante PoE (*Power over Ethernet*). Esto representa una amplia ventaja en la instalación de cada uno de los transmisores, de manera que solamente es necesario un cable CAT5 para extender la red MANET y para alimentar el *hardware*.

Pruebas empíricas

En la primera prueba, el nodo TIERRA-1 se instaló en la fachada norte del Cuartel Almirante Francisco Moreno. El principal inconveniente de la elección de esta ubicación radica en que el edificio del Centro de Medidas Electromagnéticas se encuentra en la trayectoria del haz de la antena hacia el exterior de la ría de Pontevedra. Este nodo es la puerta de enlace de acceso a Internet de toda la red MANET, extendiendo la red del Cuartel Almirante Francisco Moreno, la cual pertenece a la subred 192.168.0.0/22.

Los nodos embarcados, denominados LANCHA-X, se instalaron provisionalmente en el puente alto de las lanchas de instrucción. Se procuró que el haz omnidireccional de la antena tuviera en visión todo el horizonte para evitar, en la medida de lo posible, ángulos muertos que condicionaran el gobierno de la embarcación.

Para el escenario descrito, y a pesar de los sectores sin visión directa de la ría, se alcanzó una distancia máxima sin retransmisiones de 8,2 km. La tablas de encaminamiento se actualizaron satisfactoriamente, experimentándose un

retardo de no más de 10 segundos en la actualización de la topología de la red. A pesar de todo, la realidad en este escenario es que se produjeron grandes pérdidas debido a la cercanía de los obstáculos en las proximidades de la antena. Otro hecho determinante es el uso de una antena omnidireccional en lugar de un sistema embebido de transmisión que disponga de una antena sectorial instalada en el nodo de tierra.

Los puntos de acceso usan como sistema operativo una adaptación de Linux denominada OpenWrt. De esta forma es posible instalar todas las herramientas necesarias para el despliegue de la red, así como los módulos que proporcionan un entorno seguro de comunicación. A modo de ejemplo, la herramienta utilizada para examinar la topología de la red en tiempo real se corresponde con el módulo *olsr-viz*, que realiza una representación gráfica de la topología, tal y como se observa en la imagen de la figura 7. Aparte de este módulo gráfico, OpenWrt es útil en el sentido de que permite realizar experimentos con modos de trabajo o protocolos que todavía no han sido estandarizados, pero que pueden ser de interés, tanto desde el punto de vista de la defensa como del ámbito académico y docente.

La tasa de transferencia en enlace directo resultó ser de seis megabit por segundo y la latencia máxima no superó en ningún caso los 60 ms. Este hecho permitía hacer un uso fluido de servicios disponibles en Internet, como nave-

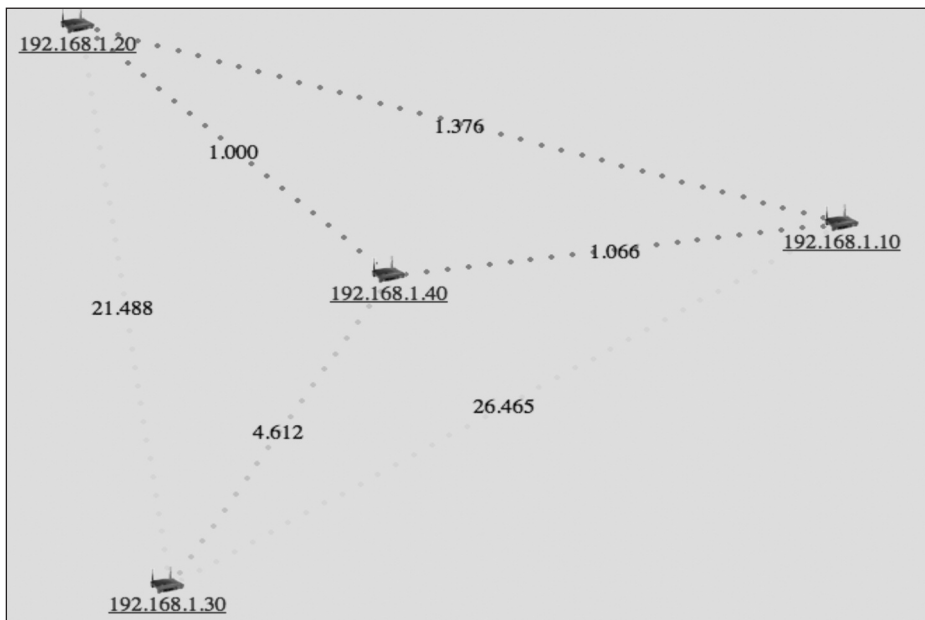


Figura 7. Representación de la topología en tiempo real mediante *software*.

gación *web* convencional e incluso la visualización de vídeos en *streaming*, lo cual demuestra la capacidad del radioenlace para soportar otras aplicaciones comunes con requisitos de banda ancha.

La figura 7 muestra la situación en la cual el nodo LANCH-2 (IP: 192.168.1.40) es el único en alcance radio con el nodo en tierra. Esta situación se monitoriza remotamente desde el nodo LANCH-1 (IP: 192.168.1.10). A continuación se exponen los criterios seguidos por el algoritmo de encaminamiento para la elaboración de las tablas de encaminamiento:

LQ: tasa de éxito de los paquetes recibidos desde el nodo vecino.
 NLQ: tasa de éxito de los paquetes enviados al nodo vecino.
 ETX: cuenta esperada de retransmisiones.
 Verde: muy bueno (ETX < 2).
 Amarillo: bueno < ETX < 4).
 Naranja: todavía utilizable (4 < ETX < 10).
 Rojo: malo (ETX > 10).

En la figura 8 se observa la baja potencia recibida por parte del nodo en tierra: -92 dBm de potencia en la recepción no es suficiente para que el transmisor enlace directamente con tierra. Para solventarlo, automáticamente, LANCH-2 hace de puente y comienza a retransmitir hacia los demás nodos fuera de alcance.

Durante la segunda prueba, los nodos en tierra fueron recolocados, eliminando en la medida de lo posible obstáculos que negaran la visión directa de la ría. Pese a que las condiciones meteorológicas eran de lluvia intensa, la antena omnidireccional AOA-2415 del nodo TIERRA-1 demostró tener un alcance de 11 km. En esta situación de enlace a dos saltos de distancia en el punto más lejano donde el sistema demostró seguir teniendo enlace se logró una tasa de transferencia de 1,3 Mbps con una latencia en torno a 100 ms.

Conclusiones

Este artículo muestra la gran capacidad de proyección que las redes mallas de nodos móviles tienen dentro de el ámbito de las Fuerzas navales. La

Associated Stations							
	SSID	MAC-Address	IPv4-Address	Signal	Noise	RX Rate	TX Rate
	NW-MESH	68:72:51:02:1C:A1	192.168.1.20	-74 dBm	-94 dBm	1.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz	36.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz
	NW-MESH	68:72:51:06:AE:E9	192.168.1.40	-69 dBm	-94 dBm	1.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz	36.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz
	NW-MESH	68:72:51:06:AE:FS	192.168.1.30	-92 dBm	-94 dBm	1.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz	54.0 Mbit/s, MCS 0, 20MHz

Figura 8. Potencia de recepción a bordo de LANCH-1.

portabilidad hacia frecuencias menores de este tipo de estándares supondría la posibilidad de aumentar la potencia transmitida, disminuir las pérdidas por atenuación del medio e irremediamente aumentar el alcance radio hasta la frontera física del horizonte. Asimismo, profundizar en el estudio de la seguridad y garantizarla es un factor fundamental antes de la implantación de estos estándares para un uso profesional. La confidencialidad e integridad de la información es un parámetro muy importante que debe tenerse en cuenta en este tipo de redes inalámbricas. Esta confidencialidad debe tener relevancia no solamente en personas externas a la red MANET que puedan perturbar la capa física o incluso afectar la capa de enlace inyectando falsas tramas que suplanten la identidad de usuarios ya autenticados, sino también en usuarios propios de la MANET que, por la naturaleza de la red, funcionen de retransmisores de la información. Para solucionar este problema sería útil la implantación túneles seguros haciendo uso del estándar IPSEC (8).

Agradecimientos

Los resultados de este trabajo han sido financiados parcialmente por el Centro Universitario de la Defensa (CUD) de Marín y obtenidos gracias al apoyo de la Escuela Naval Militar.



(8) KENT, S., y ATKINSON, R.: *Security architecture for the Internet Protocol*, RFC 2401 (1998), <https://tools.ietf.org/html/rfc2401>