

Planificación S-TDMA en redes submarinas de comunicaciones inalámbricas

Luque-Nieto, Miguel A. ^{1,*}, Moreno-Roldán, José M. ¹, Poncela, Javier. ¹, Otero, Pablo ¹, Fernández-Salas, Luis M. ² y Díaz-del-Río, Víctor ³

¹ Universidad de Málaga, E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación. Direcciones electrónicas: luquen@uma.es, jmmroldan@uma.es, jponcela@uma.es, pablo.otero@uma.es.

² Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Cádiz. Dirección electrónica: luismi.fernandez@cd.ieo.es

² Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de Málaga. Dirección electrónica: diazdelrio@ma.ieo.es

* Autor Principal y responsable del trabajo; Dirección electrónica: luquen@uma.es.

Abstract: Las redes submarinas de sensores son de importancia en la vigilancia y monitorización del medio submarino. Si se desea que las redes sean inalámbricas y con un alcance superior a unos pocos metros, las comunicaciones han de ser acústicas. El canal acústico submarino es de poca capacidad de transmisión y muy hostil en términos de ruido y desvanecimiento, ya que es selectivo en frecuencia. Además, estas redes inalámbricas plantean el problema añadido de la alimentación eléctrica. En redes de tráfico saturado, el procedimiento más eficiente de acceso al medio es TDMA espacial, por los menores “overheads” y la práctica ausencia de “handshaking”. En esta comunicación se presenta un procedimiento para la obtención de una planificación eficiente en redes submarinas de comunicaciones que utilicen TDMA espacial. El procedimiento está basado en dos algoritmos heurísticos encadenados y encuentra una planificación temporal eficiente para conseguir la misma cantidad de información de los sensores de cada nodo de la red.

Keywords: USN; S-TDMA; Comunicaciones submarinas; Protocolos de comunicaciones.

1. Introducción

Las redes submarinas de sensores, como medio de monitorización del medio acuático, tienen múltiples ámbitos de aplicación, entre los que pueden citarse las geociencias marinas, la explotación de caladeros de pesca, la vigilancia de la calidad de las aguas y, por supuesto, la seguridad y la defensa,

porque pueden usarse para la vigilancia de puertos, de cercanías de buques y, en sentido más amplio, para telemando, telecontrol y telemedida con vehículos autónomos submarinos [1]. En el medio marino está aceptado que las mejores comunicaciones son las realizadas mediante ondas acústicas. El canal acústico submarino de comunicaciones es muy distinto de los canales electromagnéticos habituales, con velocidad de propagación y con capacidad de transmisión mucho menores que en los canales electromagnéticos. En aguas someras el canal puede llegar a ser muy hostil, en el sentido de comunicaciones, sobre todo porque el desvanecimiento es selectivo en frecuencia, con distribuciones estadísticas de tipo Ricean-shadowed [2]. Por todo ello exige un especial cuidado en la elección de la topología de la red y en el diseño de las técnicas de comunicación, entre las que tienen un papel muy principal los protocolos de acceso al medio y de enlace.

En este artículo se presenta un protocolo de comunicaciones para una red submarina de sensores dispuesta en una topología en cadena, de forma que se disponen los nodos en hileras paralelas entre sí. Esta topología es muy poco común entre las redes de comunicaciones terrestres, pero es muy adecuada para monitorizar regiones con formas estrechas y largas, como por ejemplo, bocanas o perímetros. En el tipo de red submarina de comunicaciones que proponemos y del que pueden verse dos ejemplos en la figura 1 hay dos tipos de nodos, los que incorporan sensores y un nodo de comunicaciones cuya misión es actuar de concentrador de las transmisiones de los nodos sensores y de relevador para la comunicación con el mundo exterior. En lo sucesivo nos referiremos a este nodo como concentrador (“gateway”). A la vista de la topología, pueden usarse dos técnicas de transmisión entre los nodos sensores y el concentrador: difusión o multi-salto. En redes submarinas, donde la energía es un recurso muy escaso y la capacidad de transmisión pequeña, se elige la segunda técnica por ser más eficiente en ambos casos. En lo que respecta a la técnica de control de acceso al medio (MAC), pueden considerarse las de acceso múltiple por división de frecuencia o tiempo (FDMA/TDMA) y las de acceso aleatorio con evitación de colisión (MACA) ([3], [4], [5], [6]). Debido a la limitación de energía y a la también escasa anchura de banda disponible para la transmisión acústica, se ha optado por la técnica TDMA espacial (STDMA) [7]. El objetivo de este trabajo entonces es realizar la planificación de una red multisalto STDMA, que no está resuelto aún en la literatura técnica para el tipo de redes propuestas, para lo que se proponen dos algoritmos que, combinados, encuentran una planificación temporal muy eficiente.

En este trabajo se considera que las ubicaciones de todos los nodos son igualmente importantes a efectos de monitorización, por lo que el objetivo de la planificación es conseguir que todos los nodos consigan hacer llegar la misma cantidad de información al concentrador. A la planificación que consiga ese objetivo la llamaremos planificación ecuánime (“fair planning” o “fairness”) [8]. Otros autores han tratado recientemente el asunto del “fairness” en la planificación de redes STDMA ([9], [10], [11]), aunque ninguno de ellos la ha estudiado en términos de rendimiento de transmisión (“throughput”) en función de la posición del concentrador o del tamaño de la red, es decir, del número de nodos.

2. Diseño de la red

La topología de la red es la adecuada a la vigilancia de un perímetro, y tiene aspecto de cadena. El concentrador puede estar en el centro de la red, lo que mejorará el rendimiento (throughput) de la red, o en un extremo, lo que simplificará la comunicación con el mundo exterior. Ambas posibilidades se muestran en el ejemplo de trece nodos (doce nodos sensores y un concentrador) de la figura 1. Aunque se tiene una cadena de tres ramas, los nodos se encuentran situados en los vértices de una malla triangular equilátera de distancia constante. Los nodos adyacentes, o vecinos, están dentro de sus respectivos alcances de transmisión, mientras que los no adyacentes no lo están. Esta simplificación parece razonable ya que el control de potencia es una prestación común en transceptores. Mientras un nodo transmite, los seis de los vértices del hexágono que lo rodea reciben su señal. Por lo tanto, vecinos entre sí o incluso algunos vecinos de vecinos no pueden transmitir simultáneamente, ya que no consideramos el uso de transductores directivos, que no es una hipótesis realista. Llamamos nodos compatibles a los nodos que pueden transmitir simultáneamente. La explotación, por tanto, es en modo *simplex*. En lo que respecta a la naturaleza del tráfico de datos, suponemos tráfico saturado, ya que consideramos de gran interés la transmisión de imágenes. En la técnica multi-salto que se propone en esta comunicación, el encaminamiento está prefijado, un nodo sólo acepta paquetes de otro nodo más arriba en la cadena y envía paquetes sólo a otro nodo más abajo en la cadena. Considerado todo lo anterior, el acceso múltiple al medio se realiza por división de tiempo y espacio (STDMA). El tiempo se divide en intervalos (“slots”) o ranuras de tiempo (simplemente ranuras en lo que sigue, por agilidad) de duración fija. El régimen binario es idéntico para todos los nodos. Llamamos trama al conjunto de ranuras necesarias para que cada uno de los nodos haga llegar con éxito al concentrador un paquete de sus datos propios, y sólo uno. Es decir, la operación de la red es periódica y el período es la trama. Se usan los nodos compatibles para acortar la duración de la trama al mínimo posible. Se supone que todas las transmisiones están libres de errores. Esta hipótesis puede no parecer realista, pero con ayuda de códigos especiales se puede estar lo suficientemente próximo a ella y, además, el objeto del estudio, que es encontrar la planificación temporal que hace la trama más breve y aumenta el throughput, no queda invalidado por su incumplimiento.

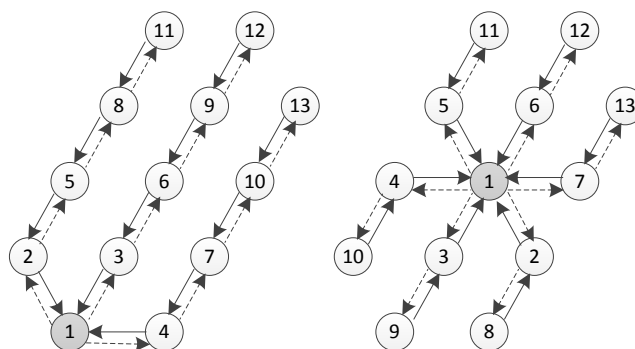


Figura 1. Ejemplo de redes con topología en cadena. El concentrador es el nodo 1.

3. Algoritmos de planificación STDMA

En este apartado se encontrará la secuencia de ranuras que hacen una trama “fair”. Para ello hay que empezar por encontrar los que llamamos nodos compatibles, que son los nodos que pueden transmitir simultáneamente. Como sólo nodos vecinos están dentro del alcance, sólo hay que evitar que tenga que recibir un nodo mientras está transmitiendo. A continuación se encuentran un conjunto completo de ranuras en las que sólo transmiten nodos compatibles. Dos protocolos son posibles: asignación orientada a nodo [9] o asignación orientada a enlace [12]. En comunicaciones submarinas, donde no cabe contar con transductores directivos, la asignación orientada a nodo es la recomendada. El tercer paso en el establecimiento de la planificación es crítico: encontrar, entre los conjuntos mencionados en el primer paso, el que da lugar a la trama “fair” más corta. Hemos desarrollado una técnica basada en la llamada matriz de compatibilidad [6].

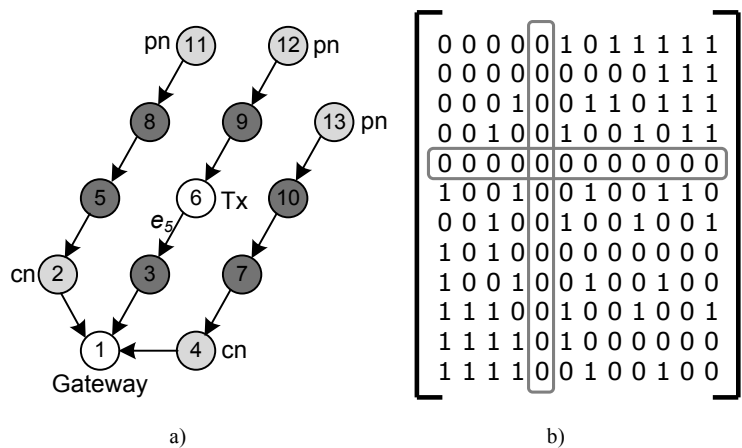


Figura 2. a) Ejemplo de red con 13 nodos en la que transmite el nodo 6. En gris oscuro, los nodos vecinos y en gris claro los vecinos de vecinos. b) Matriz de compatibilidad.

Definido el grafo, llamamos arista e_{i-1} a la arista de transmisión del nodo i . Llamemos M a la matriz de compatibilidad; sus elementos M_{ij} serán 1 ó 0, según que e_i y e_j puedan estar activas simultáneamente o no. En el ejemplo de la figura 2 se observa que el nodo 6 es incompatible con cualquier otro nodo por lo que todos los elementos de la fila y de la columna 5 de la matriz M son ceros. Consideremos el conjunto de vértices de nuestra red. Un clique es un subconjunto de vértices entre los que existe una arista que los conecta. En nuestra red consideramos cliques los conjuntos de nodos compatibles. Se llama cubierta de cliques de un grafo al conjunto de cliques posibles. Nuestra técnica está basada en identificar todos los cliques máximos con ayuda de un algoritmo descrito en [13]. Sea $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ la cubierta de cliques, donde k es un número natural todavía indeterminado [6]. Cada arista del grafo debe estar en al menos un clique de la cubierta. Hecho esto, cada ranura de la trama contendrá un clique de la cubierta o nodos sueltos, lo que asegura la transmisión compatible en esa ranura. Para obtener la trama más corta (p.ej., el conjunto $P = \{P_1, P_2, \dots, P_L\}$ con L mínimo y $P_j \in C$) hemos desarrollado un procedimiento heurístico compuesto por dos

algoritmos, que llamamos de Asignación y de Acortamiento, respectivamente. Esos dos algoritmos quedan definidos con sus diagramas de flujo, que se muestran en las figuras 3 y 4. La aplicación secuencial de los dos algoritmos conduce a la construcción de la trama más corta posible.

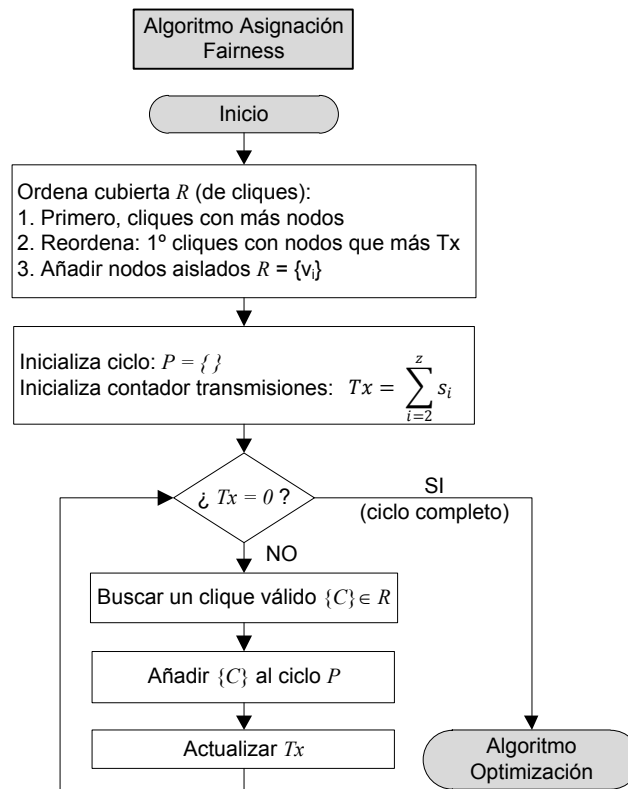


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo de Asignación.

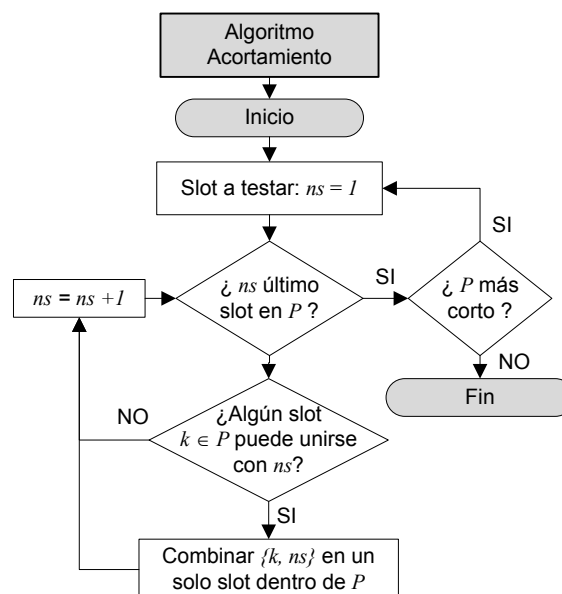


Figura 4. Diagrama de flujo del algoritmo de Acortamiento.

4. Resultados

Al objeto de conocer y proporcionar al lector una idea del “throughput” de una red de estas características se ha realizado un caso práctico. Hemos elegido una red de 13 nodos (un concentrador y 12 nodos sensores). El tráfico será saturado si los nodos incorporan sensores como una cámara de fotografía o de vídeo, es decir, que se pretenda transmitir imágenes. Para el régimen binario se ha usado la cifra de 31200 bit/s, pues ya existen módems comerciales que aseguran alcances de 1 km con ese régimen. Aceptamos que las imágenes se codifican con 24 bit/pixel. Algunas posibles relaciones de aspecto y tasas de compresión se muestran en la tabla 1.

La figura 5 muestra, por ejemplo, que para conseguir una imagen de calidad C-1 (640x360 pixel, 24 bit, 16:9, sin compresión) de cada uno de los 21 nodos hacen falta 250 minutos si el concentrador está en un extremo de la red. La figura 5 proporciona una idea cuantitativa de cuántas imágenes podrían transmitirse en función de su calidad, del número de nodos y de la posición del concentrador. Para la obtención de estas cifras se ha supuesto que la transmisión está libre de errores. Obviamente este punto no es cierto y las cifras deben modificarse para tener en cuenta la pérdida de rendimiento de transmisión debida a los procedimientos de corrección de errores que usen los protocolos competentes de la red. Este asunto está siendo analizado y estudiado en la actualidad por los autores de esta comunicación.

| Resolución | AR | 1 | 2 | 3 |
|--------------|------|----------------|----------------|----------------|
| | | Sin compresión | JPEG, Q=50% | JPEG, Q=25% |
| A: 320x180 | 16:9 | 1,382,400 | 92,160 | 60,104 |
| B: 320x240 | 4:3 | 1,843,200 | 122,880 | 80,139 |
| C: 640x360 | 16:9 | 5,529,600 | 368,640 | 240,417 |
| D: 640x480 | 4:3 | 7,372,800 | 491,520 | 320,556 |
| E: 1280x720 | 16:9 | 22,118,400 | 1,474,560 | 961,669 |
| F: 1280x960 | 4:3 | 29,491,200 | 1,966,080 | 1,282,226 |
| G: 1600x1200 | 4:3 | 46,080,000 | 3,072,000 | 2,003,478 |
| H: 1920x1080 | 16:9 | 49,766,400 | 3,317,760 | 2,163,756 |

Tabla 1. Ejemplos de transmisión de imágenes digitales. AR: relación de aspecto; Q: factor de compresión.

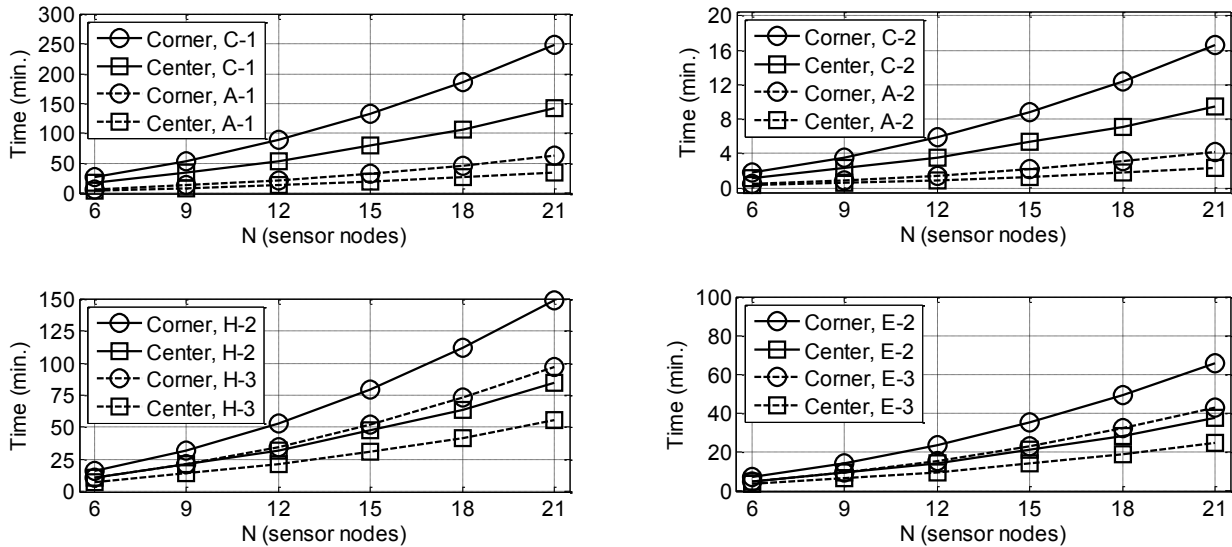


Figura 5. Tiempo necesario para conseguir una imagen de cada nodo, en redes de hasta 21 nodos. La calidad de la imagen se describe con las letras y los números de la tabla 1.

5. Conclusiones

En esta comunicación se ha presentado un nuevo procedimiento para obtener la planificación temporal óptima en redes submarinas de comunicaciones inalámbricas que utilizan S-TDMA como protocolo de acceso al medio. La topología de las redes es en cadena, con tabla de encaminamiento pre-establecida. El modelo de tráfico es de saturación, es decir, todos los nodos tienen datos dispuestos para su transmisión. Un importante criterio previo a la planificación es que todos los nodos de la red consigan hacer llegar al nodo concentrador el mismo volumen de información, lo que en inglés se conoce como “fairness”. El procedimiento propuesto está basado en dos algoritmos heurísticos encadenados, el primero llamado de Asignación, que busca qué nodos pueden transmitir simultáneamente y elabora las posibles planificaciones con este solo criterio. El segundo, llamado de Acortamiento, encuentra la asignación que da lugar a la trama más breve, es decir, que aumenta el “throughput”. La comunicación se completa con un ejemplo práctico donde se proporcionan órdenes de magnitud de tiempos de trama y del tiempo necesario para que todos y cada uno de los nodos hagan llegar al concentrador una imagen.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con ayuda de la Universidad de Málaga (Campus de Excelencia Internacional Andalucía Tech).

Referencias

1. Pompili, D.; Melodia, T. Research Challenges in Communication protocol design for underwater Sensor networks; in *Underwater Acoustic Sensor Networks*. CRC Press, Boca: Raton, FL, 2010.

2. Ruiz-Vega, F.; Clemente, M.C.; Otero, P.; Paris, J.F. “Ricean shadowed statistical characterization of shallow water acoustic channels for wireless communications,” in *Proc. IEEE Conf. Underwater Communications: Channel Modelling & Validation*, UComms, Sestri Levante, Italy, Sep. 2012.
3. Kurose, J.F.; Ross, K.W. *Computer Networking. A Top-Down Approach*; 6^a ed. Pearson: Harlow, Reino Unido, 2013.
4. Shahabudeen, S.; Motani, M.; Chitre, M. “Analysis of a high-performance MAC protocol for underwater acoustic networks,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, Vol. 39, No. 1, pp. 74-89, (Errata corrections in: p. 203).
5. Otnes, R.; et al. *Underwater Acoustic Networking Techniques*. Springer: Heidelberg, Alemania, 2012.
6. Shahabudeen, S.; Chitre, M.; Motani, M. “Adaptive multimode medium access control for underwater acoustic networks,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2014, Vol. 39, No. 3, pp. 500-514.
7. Nelson, R; Kleinrock, L, “Spatial TDMA: A collision-free multihop channel access protocol”, *IEEE Trans. Communications*, 1985, Vol. Com-33, No.9, pp. 934-944.
8. Mo, J.; Walrand, J. “Fair end-to-end window-based congestion control”, *IEEE/ACM Trans. Networking*, 2000, Vol. 8, No. 5, pp. 556-567.
9. Bjorklund, P.; Värbrand, P.; Yuan, D. “A column generation method for spatial TDMA scheduling in ad hoc networks,” *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, 2004, Vol. 2, No. 4, pp. 405–418.
10. Djukic, P.; Valaee, S. “Link scheduling for minimum delay in spatial re-use TDMA”, 26th IEEE Int. Conf. Computer Communications, INFOCOM 2007, Anchorage, Alaska, 6-12 May 2007, pp. 28–36.
11. Wang, Z.; Yu, F.; Tian, J.; Zhang, Z. “A fairness adaptive TDMA scheduling algorithm for wireless sensor networks with unreliable links,” *Int. Journal Communication Systems*, 2014, Vol. 27, No. 10, pp. 1535-1552.
12. Chou, A.-M., Li, V.O.K. “Slot allocation strategies for TDMA protocols in multihop packet radio networks”, *Proc. Eleventh Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, IEEE INFOCOM '92*, Florence, Italy, 4-8 May 1992, Vol. 2, pp. 710–716.
13. Bron, C., Kerbosch, J. “Algorithm 457: finding all cliques of an undirected graph”, *Communications of the ACM Mag. (CACM)*, Vol. 16, No. 9, pp. 575-577, Sep. 1973.