

Protocolo Auto-Organizado de Encaminamiento para Redes Submarinas No Uniformes (PAO-RESNU)

Waheeduddin, Hyder ¹, Miguel-Angel, Luque-Nieto ^{2,*}, Javier, Poncela ^{3,†}, y Pablo, Otero ⁴.

¹ Dpto. Ingeniería de Comunicaciones. ETSIT, Universidad de Málaga. Bulevar de Louis Pasteur nº 35, 29010 Málaga. Correo electrónico: waheed@uma.es (W.H.)

^{2,*} Dpto. Ingeniería de Comunicaciones. ETSIT, Universidad de Málaga. Bulevar de Louis Pasteur nº 35, 29010 Málaga. Correo electrónico: luquen@uma.es (M.-A.L.)

^{3,†} Dpto. Ingeniería de Comunicaciones. ETSIT, Universidad de Málaga.

⁴ Dpto. Ingeniería de Comunicaciones. ETSIT, Universidad de Málaga. Bulevar de Louis Pasteur nº 35, 29010 Málaga. Correo electrónico: pablo.otero@uma.es (P.O.)

* Autor Principal y responsable del trabajo; Correo electrónico: luquen@uma.es (M.-A.L.)

Resumen: En esta comunicación, se presenta un nuevo algoritmo de encaminamiento para redes auto-organizadas (SON, *Self-Organizing Networks*) de sensores acústicas submarinas con un solo nodo recolector de datos (o Gateway en el argot). El protocolo PAO-RESNU (**Protocolo Auto-Organizado de encaminamiento para Redes Submarinas No Uniformes**) funciona para topologías 2D/3D ad-hoc en las que no se conoce la localización inicial de los nodos. Puede ser útil en aplicaciones de vigilancia que requieran un despliegue rápido de sensores. El estimador usado para construir la ruta hacia el nodo recolector se basa en una terna de indicadores: intensidad de señal recibida (RSS, *Received Signal Strength*), número de saltos y número de nodos compañeros. Se aportan resultados relativos al retardo promedio de paquete, número medio de saltos por ruta, o consumo promedio de energía. La evaluación de los resultados apunta a un comportamiento satisfactorio de PAO-RESNU.

Palabras clave: redes SON; redes UWSN; encaminamiento de paquetes; redes ad-hoc; monitorización submarina.

1. Introducción

Las redes de sensores inalámbricas submarinas (UWSNs, *Underwater Sensor Networks*) son una solución emergente en muchas áreas de trabajo, como monitorización medioambiental o vigilancia de naves. Sin embargo, el medio marino impone unas condiciones adversas para la propagación de las señales, obligando al uso de frecuencias acústicas (1 kHz..100 kHz) cuando se requiere un

alcance entre cientos de metros, hasta kilómetros. Otras tecnologías como radiofrecuencia [1] o comunicaciones ópticas no guiadas [2], poseen una alta velocidad de transmisión de datos, pero mucho menor alcance y se limitan a distancias muy reducidas entre el emisor y el receptor de la comunicación (típicamente inferior a decenas de metros).

Por otro lado, la velocidad de propagación de las ondas acústicas en el agua está en torno a 1500 m/s [3] (depende de la temperatura, salinidad y profundidad), lo que deriva en un alto retardo de propagación. Debido a estas dos razones (uso de frecuencias bajas de operación y alto retardo de propagación) es habitual encontrar protocolos de comunicaciones submarinas tanto para capa MAC (*Medium Access Control*) [4] como de encaminamiento (nivel de red OSI) [5] que sean eficientes en tiempo y energía. Los protocolos diseñados para redes de sensores inalámbricas aéreas (WSNs, *Wireless Sensor Networks*), aunque están en un estado de madurez avanzado, no son adecuados en este entorno marino tan hostil.

En esta comunicación, se propone el uso de un nuevo protocolo para redes ad-hoc (PAO-RESNU). Tras un primer recorrido por el estado del arte de las redes UWSN en general, se aborda su descripción y funcionamiento en la Sección 3. Posteriormente, se aportan resultados de simulaciones para retardo de paquetes y energía consumida en la Sección 4, para finalizar con las conclusiones del trabajo realizado.

2. Estado del arte

Existen diferentes clasificaciones para catalogar a los protocolos a nivel de red (enrutamiento). Una de ellas pone el énfasis en el modo de elegir el siguiente nodo del camino, distinguiendo entre protocolos proactivos y reactivos. Un protocolo proactivo se basa en tablas con rutas predefinidas, donde los caminos son independientes de las necesidades instantáneas del tráfico. Por otro lado, los reactivos eligen el siguiente nodo del camino en el momento en que reciben un paquete que deba ser encaminado en la red, es decir, reaccionan según la demanda del tráfico. El protocolo que se presenta en esta comunicación es proactivo, teniendo la ventaja de sufrir menor retardo en la entrega de paquetes, y el inconveniente de tener que actualizar la tabla de caminos siempre que exista un cambio en la topología de la red, por ejemplo, debido a malfuncionamiento de algún nodo.

Algunas clasificaciones habituales para encaminamiento en redes submarinas, son: protocolos basados en localización (o no), protocolos oportunistas, protocolos basados en grupos (clústeres), eficientes en energía o con que permitan movilidad de los nodos.

Los protocolos basados en localización, requieren conocer previamente la posición de los nodos antes de trazar rutas para los paquetes. Uno de los más famosos basados en localización, del que existen muchas variantes, es VBF (*Vector-Based Forwarding*) [6] que requiere que cada nodo calcule su posición relativa al resto a medida que recibe algún paquete. Ejemplos representativos que no requieren información de localización son NLPU (*Network Layer Protocol for UANs*) [7] o LFLSR (*Location Free Link State Routing*) [8]. El primero, que es proactivo, usa un canal full dúplex para establecer el camino, mientras el segundo usa un paquete especial de difusión desde el nodo recolector de datos (o Gateway en adelante) para ir estableciendo camino hacia él.

En el ámbito de protocolos inalámbricos, se denomina oportunista a aquel que elige el nodo más cercano al destino para enviar sus paquetes, sin negociación previa entre ambos. Un ejemplo lo constituye DBR (*Depth Based Routing*) [9] en el que los nodos van eligiendo el nodo que menos saltos requiera para llegar hasta el Gateway.

Por su parte, los protocolos basados en clústeres, tratan de reducir la energía necesaria para encaminar los paquetes a base de una jerarquía donde existe un maestro del clúster que recibe de los demás nodos esclavos. Solo el maestro del clúster puede enviar a otros maestros paquetes hasta alcanzar al nodo Gateway. En [10] se hace una revisión reciente de distintos protocolos como DUCS (*Distributed Underwater Clustering Scheme*) [11] o TCBR (*Temporary Cluster Based Routing*) [12].

Un protocolo catalogado como eficiente en energía, muchas veces aparece enmarcado dentro de alguna otra categoría, pero puesto que el consumo de energía en aplicaciones submarinas es una restricción importante, un comportamiento eficiente conlleva una alta relevancia para su posible adopción en entornos reales. Existen estudios comparativos como [13] que exploran diferentes alternativas de protocolos. En este trabajo, vamos a tomar como referencia RECRP (*Reliable Energy-Efficient Cross-Layer Routing Protocol*) [14] puesto que su funcionamiento es similar al protocolo propuesto. Las principales diferencias radican en que RECRP es un protocolo reactivo, es decir, el camino se decide en el momento en que llega el paquete, mientras que PAO-RESNU es proactivo: se basa en tablas fijas elaboradas al desplegar los nodos. Otra diferencia es que en RECRP, los nodos que encaminan se eligen según la energía residual de los candidatos, mientras que en PAO-RESNU, se considera una decisión basada en tres métricas: distancia (intensidad de señal o RSS), número de saltos y número de nodos compañeros. Esto permite ajustar el protocolo según las necesidades: mínima energía consumida (dando peso a mayor RSS, menor distancia), o maximizando el throughput (mínimo número de saltos, menor retardo asociado).

Cuando en la red existen vehículos autónomos (AUVs, *Autonomous Underwater Vehicles*) o nodos móviles (*Dolphins*) que pueden recolectar los datos de los nodos sensores acercándose a ellos, entran en juego los protocolos con modelos de movilidad. Un ejemplo lo constituye DDD (*Delay-Tolerant Data Dolphin*) [15] aunque existen muchos otros posibles en la literatura [16].

El protocolo presentado en este trabajo, está pensado para redes fijas (sin AUVs), y puede ser catalogado como proactivo, no basado en localización, sin clústeres y es eficiente en energía.

3. Protocolo PAO-RESNU

3.1. Topología de red

En la **Figura 1**, se representa una disposición típica de red cooperativa UWSN, donde el nodo recolector de datos (Gateway) es único y recibe mediante retransmisiones nodo a nodo, los datos de todos los demás nodos que poseen sensores. El caso representado es para aguas profundas (más de 100 m de profundidad), en el que los nodos tienen dos disposiciones distintas: anclados al fondo marino, o colgados de una boya de flotación en la superficie (o a cierta profundidad de interés). Esta ilustración serviría como escenario de operación al protocolo presentado en este estudio.

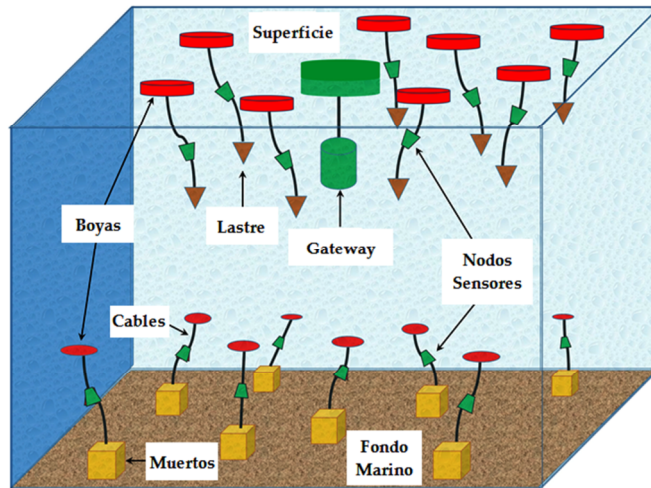


Figura 1. Topología genérica de una red UWSN cooperativa.

Respecto a la topología, el caso de estudio es una red ad-hoc, es decir, la disposición de los nodos no es fija además de ser desconocida a priori. El objetivo principal es establecer un protocolo que permita crear caminos entre los nodos de forma que cualquier nodo sensor pueda enviar sus datos (o reenviar los datos de otros nodos del mismo camino) hacia el Gateway. Este protocolo se ha denominado PAO-RESNU, y su funcionamiento se describe en §3.2 y §3.3.

3.2. Establecimiento del camino

PAO-RESNU tiene en cuenta una terna de valores para decidir el camino nodo a nodo: RSS (*Received Signal Strength*), número de saltos y número de compañeros. El valor RSS es una estimación de la potencia de señal recibida, y permite evaluar la distancia a la que está el nodo transmisor. Respecto al número de saltos, indica el número de nodos que el paquete debe visitar (retransmisiones) hasta llegar al Gateway. Por último, el número de compañeros que un nodo tiene hace referencia al número de nodos dentro de su rango de transmisión.

Para crear caminos desde los nodos hacia el Gateway, PAO-RESNU sigue esta secuencia:

- a. El nodo Gateway transmite un paquete RR con su identificador 3 veces, para asegurar que sus nodos compañeros (dentro del rango de transmisión) lo reciben.
- b. Aquellos nodos que reciben el paquete RR, generan camino con el Gateway sin usar la medida RSS, pues tienen conexión directa sin otros nodos intermedios. Además, generan nuevos paquetes RR en intervalos de tiempo aleatorios para evitar colisiones.
- c. Los nodos que reciban paquete RR de un solo nodo formarán camino a través de ese nodo.
- d. En el caso de que se reciban paquetes RR de múltiples nodos, el nodo evalúa para cada nodo transmisor: i) el valor RSS, ii) el número de saltos hacia el Gateway, y iii) el número de compañeros. Se seleccionará como nodo conector del camino, aquel resultante de un proceso de selección que se explicará en la sección 4.3.
- e. El nodo receptor, una vez seleccionado su nodo conector del camino, envía paquete RR_ACK de reconocimiento al nodo que envió el paquete RR.
- f. El envío de paquetes RR continuará hasta que todos los nodos hayan recibido su paquete RR.

g. Si un nodo no recibe RR_ACK después de 3 transmisiones de RR, supondrá que es un nodo final de la red y generará un paquete RR_RSP con su identificador de nodo y de los nodos del camino creado. Este paquete RR_RSP no se difunde por toda la red, solo por el camino creado en sentido hacia el nodo Gateway.

3.3. Criterio de selección del nodo conector

Para seleccionar el nodo conector del camino, el nodo que recibe el paquete RR se sirve de la terna de valores ya comentada: RSS, número de saltos y número de nodos compañeros del nodo conector candidato. Se puede definir el número de saltos como el número de enlaces necesario que un paquete debe atravesar desde su nodo origen hasta su nodo destino. Por otra parte, el número de compañeros de un nodo es aquel número de nodos localizados en su rango de transmisión, es decir, aquellos nodos que pueden recibir sus paquetes transmitidos.

Si el protocolo se usa para ser robusto en el retardo, se da más importancia al número de saltos. Si se prima la conservación de energía, los otros dos valores serán más importantes (mayor RSS y menor número de compañeros). En la **Figura 2**, se establece un escenario para poder entender este mecanismo de selección.

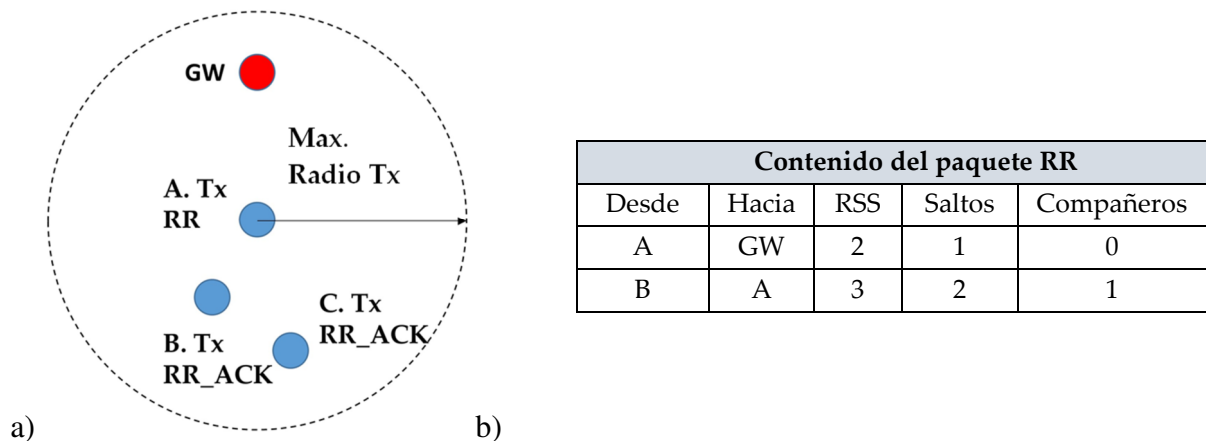


Figura 2. a) Alcance del paquete RR, b) paquetes RR enviados.

El nodo A (**Figura 2a**) difunde el paquete RR, que se recibe por los nodos B y C debido a que están en su rango de transmisión. La información que contiene el paquete RR está descrita en la Figura 1b. Hasta el momento, el nodo A desconoce cuáles son sus nodos compañeros. Cuando los nodos B y C transmitan reconocimiento (RR_ACK), el nodo A descubrirá que pertenecerá al camino de los nodos B y C. A continuación, B o C transmiten RR en instantes aleatorios. Suponiendo que B es el primero en transmitir RR, su paquete contiene el valor RSS entre A y él mismo (3 en este caso), número de saltos hasta el GW (2 en este caso) y número de compañeros (1 en este caso).

En este momento, el nodo C comparará los valores obtenidos de RSS, nº de saltos y nº de compañeros para formar el camino con A o con B. Existen dos alternativas para conectar C al GW: $C \rightarrow A$ o $C \rightarrow B \rightarrow A$. Si se da más peso al nº de saltos, C seleccionará A como su nodo conector, obteniendo un retardo mínimo en la entrega de paquetes. Si por el contrario se da más importancia al valor RSS, para ahorrar energía, C elegirá a B como su nodo conector, siendo la ruta elegida para alcanzar el GW: $C \rightarrow B \rightarrow A$.

4. Resultados y discusión

En base a simulaciones con MATLAB® según los parámetros de la **Tabla 1**, y con topología aleatoria de los nodos tomando 10 simulaciones para cada caso (100, 200... 600 nodos) se aportan dos tipos de resultados: retardo medio en la entrega de paquetes, y energía media consumida.

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad del sonido	1500	m/s
Tasa de datos	5000	bits/s
Frecuencia	48	kHz
Tamaño de cabecera	30	bits
Potencia de transmisión	18	Watts
Nº nodos	100	nodos
Área	4x4	km ²
Profundidad	4	km
Densidad de nodos	1.56	nodos/m ³
Nº iteraciones	100	-

Tabla 1. Parámetros de simulación empleados.

En el cálculo del retardo medio en la entrega, se considera tiempo de inicio como aquel en el que se ha terminado de enviar el paquete, y tiempo de fin cuando se ha recibido dicho paquete por el Gateway. Para valorar el efecto que tiene el criterio de selección (§3.3) en el retardo, se han considerado diferentes ponderaciones para la terna de valores (RSS, saltos, compañeros), expresadas en la tabla de la **Figura 3a** **Tabla 1** adjunta. El valor de la terna seleccionado para estudiar su efecto (principal), será ponderado con valores de la primera fila (entre [0.2,1] a incrementos de 0.2) y los otros dos valores de la terna quedan ponderados según la segunda fila de la tabla (con valores iguales ambos para no influir en el criterio de selección). De esta forma, se obtienen los valores de retardo cuando se toma como principal cada parámetro de la terna, representados en las Figuras 3b, 3c y 3d.

Valor principal	Pesos de ponderación				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Resto de valores	0.4	0.3	0.2	0.1	0

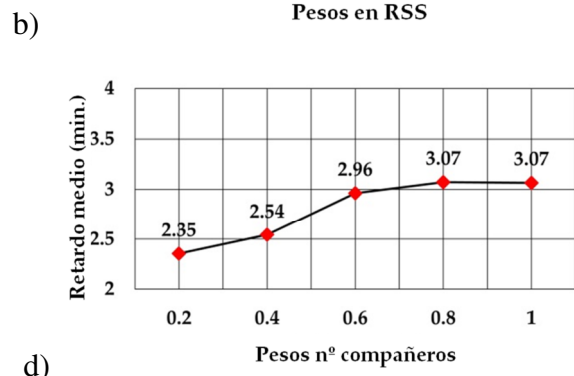
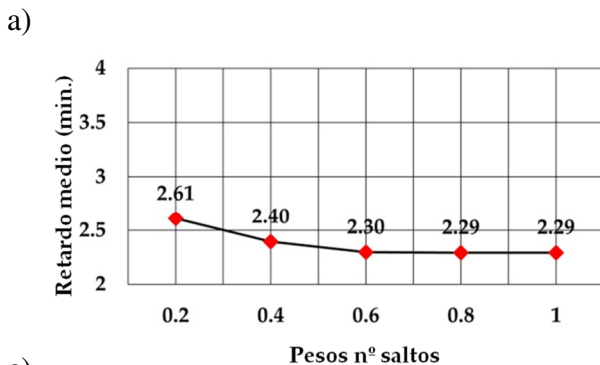
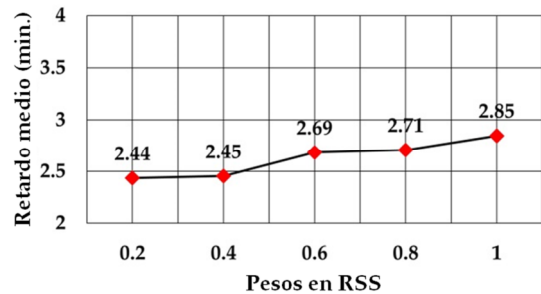


Figura 3. Retardo medio según diferentes criterios de selección (a) para RSS (b), nº de saltos (c) y nº de compañeros (d).

El menor retardo se obtiene cuando se toma para el menor número de saltos el mayor peso (=1, **Figura 3c**), con un valor de 2.29 minutos. Esto supone una reducción del 12.26% comparado con el retardo obtenido cuando se le da un peso de 0.2 (2.61 min), y reducciones del 19.65% en el caso de

RSS con máximo peso (2.85 min.) o del 25.41% en el caso de menor número de compañeros con máximo peso (3.07 min.).

Para valorar los datos de la energía consumida por PAO-RESNU, se han comparado los valores obtenidos con aquellos aportados por el protocolo RECRP [14], que es similar al propuesto en este trabajo. En este estudio, se han conservado las mismas condiciones de simulación que en [14], es decir, un volumen para la red de 10 km x 10 km x 10 km, y el número de nodos entre 100 y 600 con incremento de 100 nodos en cada caso simulado. Además, se tiene un paquete de datos de 256 bits, y el rango de transmisión se ha ajustado en cada caso según la densidad de nodos presente, variando entre 5-8 km para el caso de 100 nodos, hasta 2-3 km con 600 nodos.

Los datos se presentan en la **Figura 4**, donde se puede apreciar como para todos los casos considerados de tamaño de red (entre 100 y 600 nodos), la energía media consumida por PAO-RESNU es menor que para el protocolo RECRP. Los valores presentados en la **Figura 4b**, no son exactos porque han sido tomados a partir de la curva de energía facilitada en [14].

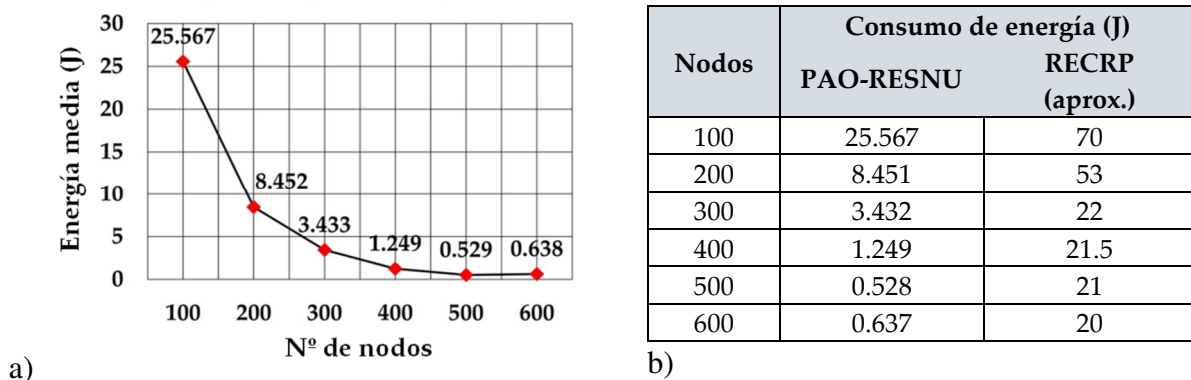


Figura 4. Energía media consumida por PAO-RESNU (a), y comparativa con RECRP (b).

5. Conclusiones

Se ha presentado el protocolo de encaminamiento PAO-RESNU, que permite ajustar su comportamiento según un criterio de decisión que pondera de manera distinta tres indicadores: RSS, número de saltos y número de compañeros. Los resultados obtenidos en cuanto al retardo medio en la entrega de paquetes, han resultado ser satisfactorios. Para evaluar la eficiencia en consumo de energía, se han realizado simulaciones en un escenario y condiciones similares a otro protocolo con funcionamiento parecido (RECRP), y se ha comprobado un mayor ahorro energético. Esto se debe a dos razones: (i) un nodo en RECRP actualiza su tabla tras cada recepción aunque no sea el nodo destino del paquete, y (ii) en RECRP, es posible que se elija un nodo conector más lejano que en PAO-RESNU para una misma topología, pues no se usan distintas métricas para decidir.

Agradecimientos

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

Referencias

1. S. Sendra, J. Lloret, et al. Underwater Ad Hoc Wireless Communication for Video Delivery. *Wireless Personal Communications*, **2017**; 96(6): 5123-5144.

2. Vavoulas A, Sandalidis H.G, Varoutas D. Underwater Optical Wireless Networks: A k-Connectivity Analysis. *IEEE J. Oceanic Eng.* **2014**; 39:801-809.
3. Urick, R.J., Principles of Underwater Sound. *Peninsula Publishing*, 3Ed. 1983, ISSN: 9780932146625.
4. Chen K, Ma M, Cheng E, Yuan F, Su W. A survey on MAC protocols for underwater wireless sensor networks. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, **2014**; 16:1433-1447.
5. Khan A, Ali I, et al. Routing protocols for underwater wireless sensor networks: Taxonomy, research challenges, routing strategies and future directions. *Sensors*, **2018**; 18(5), 1619.
6. Xie P, Cui J.-H, et al. VBF: Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks. Proc. 5th Int. *IFIP-TC6 Networking Conference*, Coimbra (Portugal), **2006**; 15–19 May, pp. 1216-1221.
7. Xie G.G, Gibson J.H. A Network Layer Protocol for UANs to Address Propagation Delay Induced Performance Limitations. Proc. *MTS/IEEE OCEANS*, **2001**, Honolulu (Hawai, USA), 5–8 Nov.; Vol. 4:2087-2094.
8. Barbeau M, Blouin S, et al. Location-free Link State Routing for Underwater Acoustic Sensor Networks. Proc. *IEEE 28th Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering*, **2015**; Halifax (Canada), 3–6 May, pp. 1544-1549.
9. Yan H, Shi Z.J, Cui J.H. DBR: Depth-Based Routing for Underwater Sensor Networks. In *Networking 2008 Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet; Lecture Notes in Computer Science*; Springer: New York (USA), **2008**; Vol. 4982:72-86.
10. Singh S.P, Sharma S.C. A survey on cluster based routing protocols in wireless sensor networks. Proc. *Computer Science*, **2015**; Vol. 45:687-695.
11. Domingo M.C, Prior R. A Distributed Clustering Scheme for Underwater Wireless Sensor Networks. In Proc. *IEEE 18th Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, **2007**; Athens (Greece), 3-7 September.
12. Ayaz M, Abdullah A, Jung L.T. Temporary Cluster Based Routing for Underwater Wireless Sensor Networks. In Proc. *International Symposium on Information Technology (ITSim)*, **2010**; Kuala Lumpur (Malaysia), 15–17 June, Vol. 2:1009-1014.
13. Zenia N.Z, et al. Energy-efficiency and reliability in MAC and routing protocols for underwater wireless sensor network: A survey. *J.of Network and Computer App.*, **2016**; 71:72-85.
14. Liu J, Yu M, Wang X, Liu Y, Wei X, Cui J. RECRP: An Underwater Reliable Energy-Efficient Cross-Layer Routing Protocol. *Sensors*. **2018**; 18, 4148.
15. Magistretti E, Kong J, Lee U, Gerla M, Bellavista P, Corradi A. A Mobile Delay-Tolerant Approach to Long-Term Energy-Efficient Underwater Sensor Networking. In Proc. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, **2007**; Kowloon (China), 11-15 March, pp. 2866-2871.
16. Ahmed M, Salleh M, Channa M.I. Routing protocols based on node mobility for Underwater Wireless Sensor Network (UWSN): A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, **2017**; 78: 242-252.