

# Protocolos de comunicaciones para redes de vigilancia submarina

Autores: Miguel Ángel Luque Nieto, Universidad de Málaga; Pablo Otero Roth, Universidad de Málaga; Javier Poncela González, Universidad de Málaga.

Palabras clave: UWSN, Protocolo MAC, Planificación de transmisiones.

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 2.4.1; MT 2.5.2.

## Introducción

Las redes de sensores submarinas (USN, *Underwater Sensor Networks*) son útiles para la monitorización del medio marino o para prevención de desastres naturales (ej. detección de tsunamis) entre otras muchas aplicaciones. Estas redes (ver figura 1) están formadas por un conjunto de nodos sensores que se comunican bien por medios inalámbricos (UWSN, *Underwater Wireless Sensor Networks*) o por cable (fibra óptica), enviando los datos recogidos a algún nodo especial o *Gateway*, que los almacena para su posterior recogida, bien por buzos o por envío de estos datos a vehículos submarinos autónomos (AUV, *Autonomous Underwater Vehicle*). Esta misma infraestructura de red, puede también servir para labores de vigilancia marítima, por ejemplo, en la bocana de puertos, detectando presencia de naves o buzos que de otra forma sería difícil llevar a cabo.

## Técnicas de comunicación: protocolos

Algunos aspectos importantes que deben ser tenidos en cuenta para elegir los protocolos MAC de acceso al medio marino (*Medium Access Control*) compartido por todos los nodos, pueden ser [1]:

- **El canal marino.** El uso de frecuencias acústicas implica dos problemas a superar: baja velocidad de transmisión binaria, y alto retardo de la onda propagada.
- **Energía.** El consumo debe ser lo más reducido posible, debido al alto coste de reemplazar la fuente de energía de los nodos de la red.
- **Sincronismo.** En algunas técnicas MAC se requiere que la operación en la red esté sincronizada. Esto obliga a usar algún mecanismo para conseguir que todos los nodos de la red usen un reloj sincronizado.
- **Colisiones.** Según la técnica MAC empleada, puede darse el caso de varias transmisiones simultáneas que provoquen interferencias, corrompiendo los datos en recepción. En este caso, será obligado hacer una recuperación de la colisión entre los nodos implicados, lo que conlleva asociado un mayor consumo de energía que si no se hubiera producido esta.

En relación a las técnicas MAC propuestas para redes UWSN, existe mucha actividad reciente [1]. Una división aceptada para clasificar dichas técnicas MAC, es según como se realice el acceso al me-

dio compartido: acceso por contienda, por reserva o de forma híbrida.

- **Acceso por contienda.** Se requiere que el nodo que quiera transmitir consiga el acceso exclusivo al canal. Existen aquí dos grandes familias MAC: las que usan protocolos para ganar el acceso, y las que acceden de forma aleatoria. Las técnicas basadas en protocolo, fijan unas reglas para evitar las colisiones en el momento de la transmisión de los datos.

Por su parte, las otras técnicas de acceso aleatorio se reducen a dos familias: Aloha y CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*). Ambas poseen mecanismos de recuperación de la transmisión en caso de colisiones.

- **Acceso por asignación estática.** En este caso, el nodo que quiere realizar una transmisión no tiene que ganar el medio de forma exclusiva, sino que se tiene un mecanismo arbitrado a priori que todos los nodos respetan a la hora de acceder al medio para realizar sus transmisiones.

Existen tres grandes familias de métodos en esta área, según se multiplexen las transmisiones en tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*), en frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*) o por código (CDMA, *Code Division Multiple Access*).

- **Acceso híbrido.** Son técnicas que intentan conjugar las ventajas de las otras dos familias: por contienda y por asignación a priori.

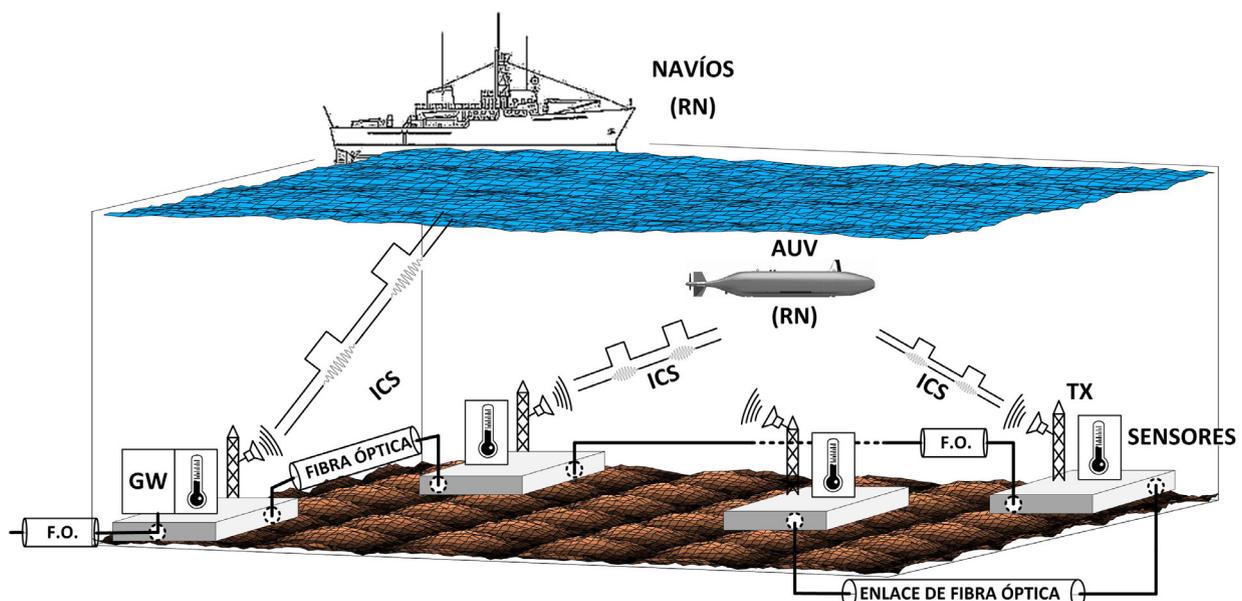


Fig. 1. Red de sensores para aplicaciones de vigilancia, radionavegación y localización. (Fuente: elaboración propia).

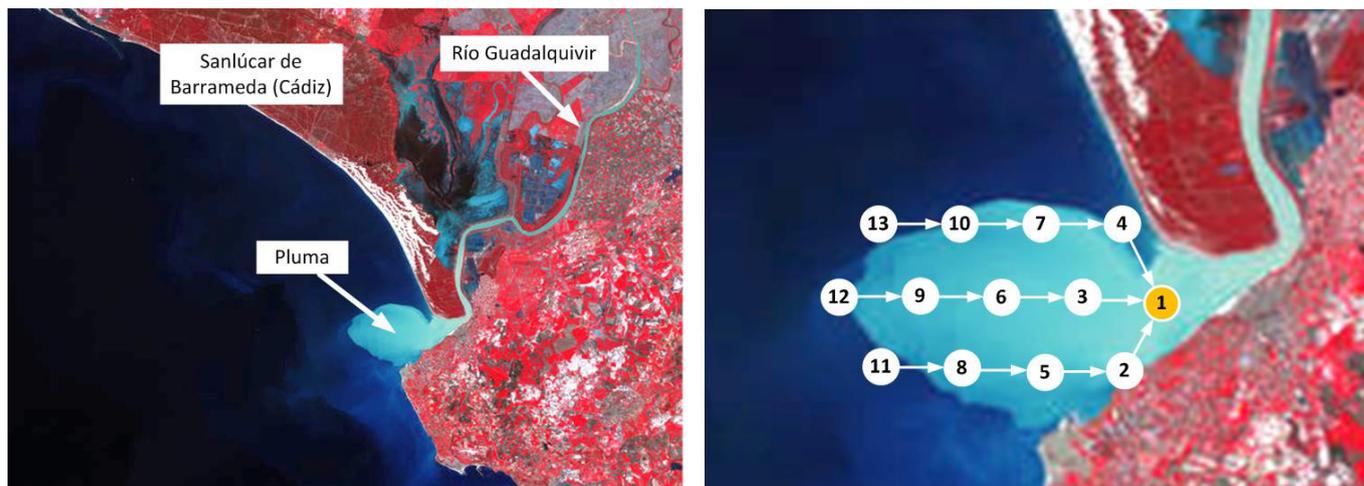


Fig. 2. Ejemplo de UWSN (13 sensores) para monitorización de plumas fluviales en la desembocadura del río Guadalquivir. (Fuente: Deimos Imaging, an UrtheCast Company).

### Acceso MAC por contienda

En lo que a las técnicas por contienda se refiere, un primer grupo lo constituyen las técnicas de acceso aleatorio: Aloha y CSMA. Aloha es la técnica más simple, en la que un nodo transmite a medida que tiene datos disponibles para enviar. De esta forma, se producirían muchas colisiones, haciendo que la utilización del canal no sea superior al 18%, por lo que existen variantes que mejoren sus prestaciones. Por ejemplo, las técnicas basadas en Aloha ranurado [2] obligan a comenzar la transmisión al comienzo de intervalos temporales. Respecto al grupo de variantes CSMA, un ejemplo representativo es CSMA/CA [3], donde un nodo escucha primero el canal y, si está libre, comienza a transmitir.

La otra gran familia de técnicas que realizan competición por obtener el canal, se basan en una reserva del canal dinámica, que requiere arbitrar un mecanismo de solicitud antes de realizar la transmisión. Algunos, priman la eficiencia de energía consumida, como *Slotted FAMA* [4], que ha surgido como una mejora adaptada al medio marino de un protocolo existente para paquetes radio (FAMA). Otros protocolos se centran en paliar los efectos del alto retardo, como MACA-U (*Multiple Access Collision Avoidance for Underwater*) [5].

Existe otra línea de actividad importante en hallar protocolos que consigan un alto rendimiento conservando un criterio de equidad, es decir, no tratar a ciertos nodos de manera favorable frente a otros, por ejemplo, al estar más cerca del *Gateway*. Se puede citar el protocolo SF-MAC [6] (*Spatially Fair Multiple*

*Access Control*) que consigue mejor *throughput* que MACA-U.

### Acceso MAC por asignación estática

Existen aquí tres familias: FDMA, TDMA y CDMA. En el caso de FDMA, el ancho de banda total disponible se divide en sub-bandas de frecuencia, y se asignan a los nodos para transmitir. Sin embargo, dado el estrecho ancho de banda disponible al usar la banda de audio, afectan mucho los efectos de desvanecimiento (*fading*) y multicamino del canal marino sobre cada sub-banda. Por ello, esta técnica tal cual se ha definido no es apropiada en redes UWSN, aunque existen mejoras como usar múltiples sub-portadoras ortogonales (OFDMA) que se solapan en frecuencia, aprovechando así mejor el ancho de banda y atenuando el efecto multicamino. Un ejemplo lo constituye la técnica UW-OFDMAC, que además consume poca energía.

La aproximación de CDMA, permite a todos los nodos de la red realizar sus transmisiones simultáneamente en toda la banda de frecuencias. Mediante la aplicación de códigos únicos por destino a la señal binaria a transmitir, un receptor puede seleccionar solo los mensajes dirigidos hacia él aplicando su código asignado, pareciendo que el resto señales son falso ruido. El principal problema es el efecto cerca-lejos (*near-far*): cuando una señal es más potente que el resto (por ej. un nodo cercano) se hace muy difícil recuperar cualquiera de las demás señales más débiles. Como ejemplo, CDMA-B [7] (CDMA-based MAC) destaca por hacer transmisiones por niveles establecidos según la

distancia al nodo *Gateway*, iniciándose en el más lejano y concluyendo en el más cercano.

Si se comparte el tiempo entre todos los nodos, surgen las técnicas TDMA que asignan ranuras temporales para las transmisiones. Su principal ventaja es ser simples y flexibles, mientras la principal desventaja es requerir sincronismo para que los nodos ajusten los intervalos de tiempo. Su clasificación radica en el parámetro principal que se quiere mejorar en la red:

- **Rendimiento (*throughput*).** Estas técnicas TDMA incrementan las transmisiones con éxito en el canal. Por ejemplo, ACMENET (*Acoustic Communication network for Monitoring of Environment*) se sirve del alto retardo para evitar colisiones, dividiendo a los nodos entre maestros y esclavos. En el caso de SYNC-MAC [8] (*SYNChronization MAC*), se permite mantener comunicaciones con vehículos AUV, donde la red está compuesta de nodos recolectores de datos en superficie, que actúan como nodos principales de cada clúster, y vehículos AUV que van tomando medidas submarinas y envían sus datos al nodo principal de su clúster. En [9], se incrementa el rendimiento haciendo transmisiones simultáneas (S-TDMA, *Spatial-TDMA*) de aquellos nodos que sean compatibles entre sí para evitar colisiones, a la vez que se garantiza un comportamiento equitativo entre nodos.
- **Retardo.** Como ejemplo, WA-TDMA [10] (*Wave-like Amendment-based TDMA*) establece una planificación de transmisiones flexible y distribuida,

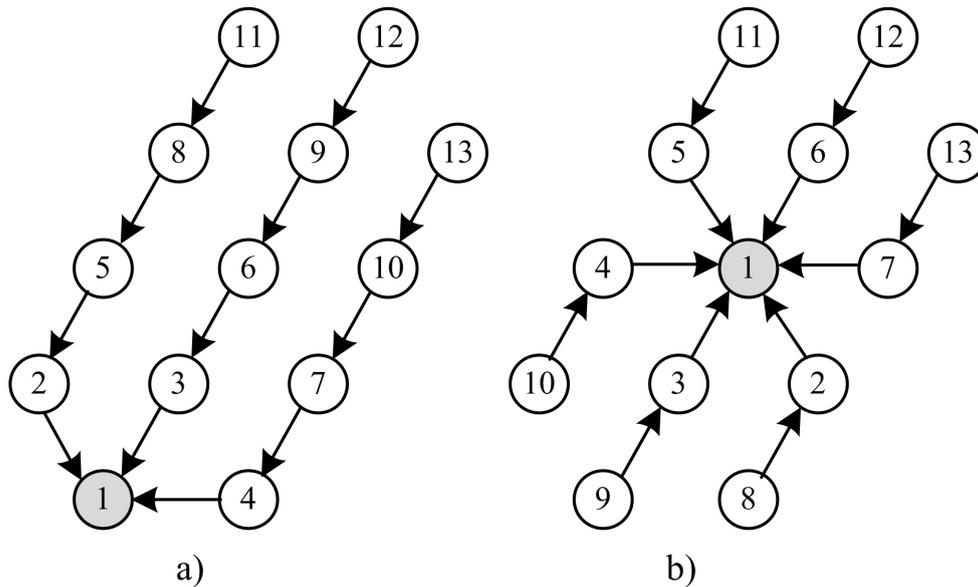


Fig. 3. Topología UWSN para vigilancia (13 nodos): a) con Gateway en una esquina, b) con Gateway en el centro. (Fuente: elaboración propia).

entre cada pareja de nodos compañeros, a partir de un nodo inicial que comienza el proceso para toda la red. De esta forma, se reduce el retardo que sufren los paquetes hasta llegar al Gateway.

- **Sincronismo.** En TDMA es importante mantener el sincronismo de tiempo entre nodos. Una de las técnicas que lo consigue es UWAN-MAC [11] (*Underwater Wireless Acoustic Networks MAC*), donde se repite una fase de sincronismo inicial cada cierto tiempo, añadiendo en cada paquete información útil (ej. lista de nodos vecinos que no transmiten).

**Acceso MAC híbrido**

Las técnicas híbridas pretenden conjugar los beneficios de varias técnicas diferentes. Por ejemplo, HSR-TDMA [12] (*Hybrid Spatial Reuse-TDMA*) pensada para clústeres de nodos, usa planificación TDMA con reutilización espacial (transmisiones simultáneas de varios nodos en el mismo intervalo) dentro del clúster, y CDMA para comunicación entre diferentes clústeres. Otro ejemplo híbrido que usa TDMA junto con acceso aleatorio, es H-MAC (Hybrid-MAC) [13]: plantea dos tipos de intervalos de tiempo, uno para transmisión de datos (TDMA) y otro de acceso aleatorio para adaptarse a picos de tráfico.

**Retos**

Existen limitaciones que se deben superar para hacer que las redes UWSN puedan mejorar sus prestaciones en general [14], dos importantes son:

- **Despliegue de la red.** Diferentes topologías tienen repercusión en parámetros como el área cubierta, el tiempo de vida útil de los sensores, la complejidad de los algoritmos que se ejecutan en los nodos o la fiabilidad de la comunicación establecida. No existe un único criterio en que para una aplicación determinada se establezca una red UWSN distribuida o centralizada, con subredes (clústeres)

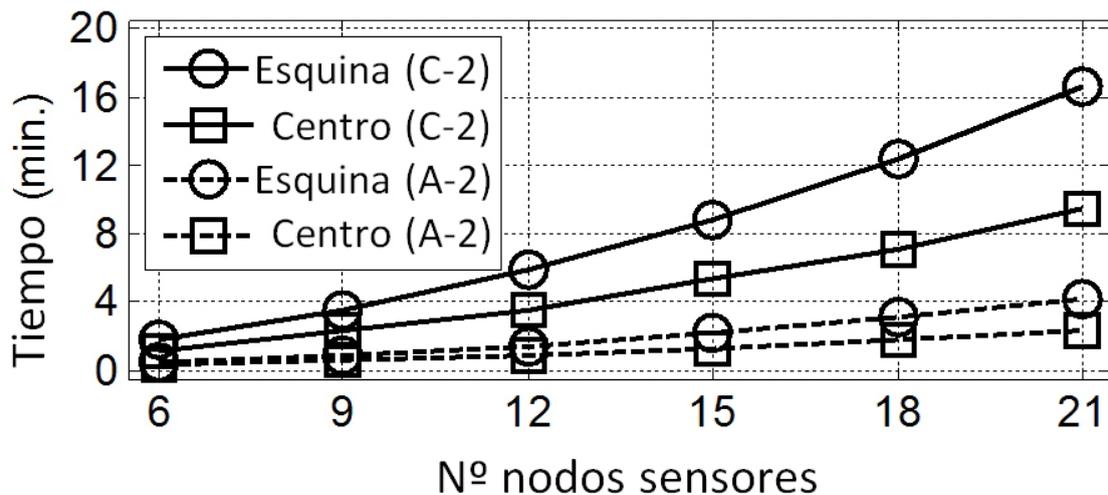


Fig. 4. Tiempo necesario para conseguir una imagen de cada nodo, para red con Gateway en el centro o en la esquina (Fig. 3), de hasta 21 nodos. Calidades de imagen (JPG): compresión 50%, relación de aspecto 16:9. Resoluciones: A-2 (320x180 píxeles), C-2 (640x360 píxeles). Velocidad de transmisión (módem): 31,2 kbps. Distancia entre nodos: 1 km. (Fuente: elaboración propia).

o con un único nodo *Gateway*. Trabajos recientes apuntan a introducir algoritmos que controlen la topología en las redes UWSN, según tres aspectos: control de potencia, control de administración del interfaz inalámbrico, y técnicas con ayuda de agentes móviles (ej. AUV). Como ejemplo, se propone en la figura 3 dos alternativas para una red de vigilancia con tres ramales, y el tiempo necesario (ver figura 4) para obtener una imagen de cada nodo en ambas redes.

- **Localización de nodos.** Conocer de forma exacta la posición de los nodos es muy importante porque afecta a diferentes aspectos de la red. En concreto, afecta al protocolo de encaminamiento, la detección de blancos para vigilancia/seguimiento marítimo, o el geo-etiquetado de los datos para mejorar su clasificación e interpretación posterior.

Asimismo, entre los retos futuros de las redes UWSN que no están cubiertos figuran:

- **Redes vulnerables.** Al estar localizadas en sitios donde puede existir actividad humana, es sencillo que sufran accidentes que degraden su normal funcionamiento, como daños por arrastre de anclas, interferencias en la comunicación por ruidos de hélices de embarcaciones cercanas, etc.
- **Escalabilidad.** Aumentar el tamaño de una red UWSN no es sencillo porque los algoritmos están adaptados a la topología de diseño para ser eficientes.
- **Sincronismo.** Hasta el momento, no existe un procedimiento que asegure el sincronismo en toda la red UWSN de forma distribuida.
- **Velocidad de transmisión.** La mayoría de los módems comerciales deben operar a velocidades inferiores a los 20 kbps por usar frecuencias acústicas (limitación del medio marino). Existen pocas alternativas para operar a mayor velocidad cuando se requieren alcances superiores a varios cientos de metros.
- **Energía.** El consumo de energía, mediante baterías usualmente, limita el tiempo de vida de los nodos de la red y hace más complicados los algoritmos de comunicaciones para alargarlo. Se requieren nuevas alternativas para incrementar la vida útil por consumo de energía.
- **Compatibilidad.** Existen muy pocos

estándares definidos tanto a nivel de hardware (nodos) como de operación en la red, que permitan garantizar la compatibilidad entre distintas soluciones que ofrezca el mercado, y poder así generar nuevos productos y servicios no propietarios. Uno de ellos aprobado recientemente (2017) es JANUS [15], desarrollado por el centro CMRE (*Centre for Maritime Research and Experimentation*) perteneciente a la OTAN.

Además, existe un gran reto en lo relativo a otro servicio, que comparte tecnologías con las comunicaciones acústicas submarinas:

- **Radionavegación acústica submarina.** Hasta la fecha no se han desplegado sistemas de ayuda a la navegación submarina. Los sistemas satelitales no son de utilidad debido a la prácticamente nula penetración de la onda electromagnética en el agua de mar. Hay estudios en la literatura técnica en los que se considera la posibilidad de desarrollar sistemas hiperbólicos similares al muy conocido LORAN C que se usó toda la segunda mitad del siglo XX en radionavegación, tanto aérea como marítima. Estos nuevos sistemas hiperbólicos usarían portadoras acústicas, lo que da lugar a que haya que diseñar por completo la arquitectura de sistema, al ser tan distintas ambas propagaciones.

### Referencias

[1] K. Chen, M. Ma, et al. A survey on mac protocols for underwater wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3):1433–1447, 2014.

[2] L.F.M. Vieira, J. Kong, et al. Analysis of aloha protocols for underwater acoustic sensor networks. *Int. Conf. On UnderWater Networks and Systems (WUWNet'06)*, Los Ángeles (USA), 2006, Sep.

[3] S.M. Smith, J.C. Park, and A. Neel. A peer-to-peer communication protocol for underwater acoustic communication. *Int. Conf. OCEANS'97, Vol.1*, pp. 268–272, Halifax (Canada), 1997, Oct.

[4] M. Molins, and M. Stojanovic. Slotted fama: a mac protocol for underwater acoustic networks. *Int. Conf. OCEANS'06*, pp. 1–7, Singapur, 2007, May.

[5] H.H. Ng, W.S. Soh, and M. Motani. Maca-u: A media access protocol for underwater acoustic networks. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM, IEEE)*, pp. 1–5, Nueva Orleans (EE.UU.), 2008, Nov.

[6] W.H. Liao, and C.C. Huang. Sf-mac: A spatially fair mac protocol for underwater acoustic sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 12(6): 1686–1694, 2012, Jun.

[7] J.-P. Kim, J.-W. Lee, et al. A cdma-based mac protocol in tree-topology for underwater acoustic sensor networks. *Int. Conf. On Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA'09, IEEE)*, pp. 1166–1171, Bradford (UK), 2009, May.

[8] N.Y. Yun, Y.P. Kim, et al. Sync mac protocol to control underwater vehicle based on underwater acoustic communication. *Int. Conf. Embedded and Ubiquitous Computing (IEEE)*, pp. 452–456, Melbourne (Australia), 2011, Oct.

[9] M.A. Luque-Nieto, J.M. Moreno-Roldán, P. Otero, and J. Poncela. Optimal Scheduling and Fair Service Policy for STDMA in Underwater Networks with Acoustic Communications. *Sensors*, 18(2), 2018, Feb.

[10] W. Lin, D. Li, et al. A wave-like amendment-based time-division medium access slot allocation mechanism for underwater acoustic sensor networks. *Int. Conf. On Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC'09, IEEE)*, pp. 369–374, Zhangjijajie (China), 2009, Oct.

[11] P. Casari, F.E. Lopiccirella, and M. Zorzi. A detailed simulation study of the uwan-mac protocol for underwater acoustic networks. *Int. Conf. OCEANS 2007, IEEE*, pp. 1–6, Vancouver (Canada), 2007, Sep.

[12] R. Diamant, and L. Lampe. A hybrid spatial reuse mac protocol for ad-hoc underwater acoustic communication networks. *Int. Conf On Communications Workshops (ICC, IEEE)*, pp. 1–5, Capetown (South Africa), 2010, May.

[13] K.B. Kredon II, and P. Mohapatra. A hybrid medium access control protocol for underwater wireless networks. In *2nd Workshop on Underwater Networks (WuWNet'07, ACM)*, pp. 33–40, Montreal (Canada), 2007, Sep.

[14] G. Tuna, and V.C. Gungor. A survey on deployment techniques, localization algorithms, and research challenges for underwater acoustic sensor networks. *Int. Journal of Communication Systems*, 30(17):1–21, 2017, Nov.

[15] J. Potter, J. Alves, et al. The janus underwater communications standard. *Int. Conf. Underwater Communications and Networking (UComms)*, pp. 1–4, Sestri Levante (Italia), 2014, Sep.