



Universidad
de La Laguna

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería

Sección de

Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval

Área de Conocimiento de Ciencias y Técnicas de La Navegación

Trabajo de Fin de Grado

***“Propagación de ondas acústicas en espacios
subacuáticos”***

Autor: Aaron Isaac López Tacoronte

Tutores: José Ángel Rodríguez Hernández

G. Nicolás Marichal Plasencia

Julio 2017

Resumen

Las comunicaciones en medios subacuáticos se han vuelto un campo de investigación de gran interés en estos últimos años. Por ello, el desarrollo y realización de redes de sensores submarinos han experimentado un importante aumento en las tecnologías de transmisión inalámbricas en los sistemas de comunicaciones subacuáticas.

Estas redes son proyectadas para permitir el progreso de aplicaciones como recolección de datos oceanográficos, registro de datos climáticos, prevención de desastres, estudio de la vida marina, la monitorización de contaminación ambiental, exploración de recursos naturales submarinos, ayuda a la navegación, misiones de búsqueda, comunicaciones entre vehículos submarinos autónomos, buzos y submarinistas, etc.

La transmisión de información en medios subacuáticos se basa en sistemas acústicos ya que las ondas sonoras se ajustan mejor en este tipo de medios. Sin embargo, la propagación de dichas ondas en el canal acústico subacuático tiene limitaciones importantes a causa del ancho de banda limitado, el multitrayecto extendido, el desvanecimiento severo, las propiedades refractivas del medio, las variaciones de tiempo rápidas, y los grandes desplazamientos Doppler.

Las Redes de Sensores Inalámbricas Subacuáticas es un tipo tecnología que originará un impacto en múltiples áreas de trabajo como la acuicultura, la explotación de recursos lejos de la costa, la monitorización biológica o el control de la

contaminación, de la actividad sísmica y las corrientes marinas. La aplicación de las redes necesarias en este tipo de tareas requiere del montaje de un número elevado de nodos que ayuden a la monitorización ambiental a través de la obtención de datos. El gran desafío tecnológico actual es el desarrollo de módems con estructuras sencillas, robustas y con alta eficiencia que tengan un bajo precio.

El canal acústico subacuático necesita de técnicas espectralmente eficientes y robustas con el fin de obtener una transmisión digital de alta velocidad en lo que se refiere a sistemas de comunicaciones inalámbricos fiables. La modulación adaptativa se presenta como una solución para elevar la tasa de datos que puede transmitirse fiablemente sobre canales con desvanecimientos.

Abstract

Communications in underwater environments are becoming a field of research of great interest in recent years. Therefore, the development and realization of submarine sensor networks have experienced a significant increase in wireless transmission technologies in underwater communication systems.

These networks are projects that allow the progress of applications such as oceanographic data collection, climate data logging, disaster prevention, marine life study, environmental pollution monitoring, underwater natural resource exploration, navigation aid, search missions, communications between autonomous underwater vehicles, divers, etc.

The transmission of information in underwater media is based on acoustic systems and that the sound waves are better adjusted in this type of media. However, propagation of advertisements in the underwater acoustic channel has significant limitations due to limited bandwidth, extensive multipath, severe fading, medium refractive properties, fast time variations and large Doppler shifts.

Subsea Wireless Sensor Networks is a type of technology that has an impact on multiple areas of work such as aquaculture, offshore resource exploitation, biological monitoring or pollution control, seismic activity and marine currents. The main technological challenge today is the development of modems with simple, robust and high efficiency structures, which also have a low price.

The underwater acoustic channel requires spectrally efficient and robust techniques in order to obtain high-speed digital transmission for reliable wireless communications systems. Adaptive modulation is presented as a solution to raise the rate of data that can be transmitted reliably over channels with fading.

Índice

	<u>Pág.</u>
1 Introducción	8
2 Historia de la acústica submarina	12
2.1 Redes inalámbricas de sensores	14
3 Estado de arte	16
4 Tecnologías Inalámbricas en el medio subacuático	18
4.1 Ondas de radiofrecuencia	18
4.2 Ondas ópticas	19
5 Comunicaciones acústicas subacuáticas	20
5.1 Ondas sonoras	23
5.2 Velocidad de propagación	24
5.3 Impedancia acústica	26
5.4 Ondas esféricas	27
6 Propagación acústica en el medio subacuático	28
7 Pérdidas de propagación	32
7.1 Absorción	32
7.2 Dispersión Geométrica	33
8 Ruido	34
8.1 Relación señal-ruido	35
9 Multitrayecto	35

10 Efecto Doppler	37
11 Modulación	38
11.1 Modulaciones no coherentes	39
11.2 Modulaciones coherentes	41
11.3 Frecuencia portadora	47
12 Modelado del canal acústico submarino	48
12.1 Modulación adaptativa y codificación	50
12.1.1 Técnicas adaptativas	52
13 Diversidad	53
13.1 Diversidad espacial en recepción	55
13.2 Técnica de diversidad MR C.	57
14 Módem acústicos	57
14.1 Potencia normalizada	59
14.2 Características de un módem acústico	61
14.3 Arquitectura de un Módem Acústico de una Red Acústica de Sensores	62
14.3.1 Transductor Piezoeléctrico	63
14.3.2 Acondicionamiento de la Señal	63
14.3.3 Unidad de procesamiento y Control	66
14.3.4 Sincronización	68
14.3.5 Sistema de Gestión de Energía	69
14.3.6 Interfaz de usuario y programación	70
15 Aplicaciones y conclusiones	70

1. Introducción

Vivimos en una sociedad ligada al conocimiento y la información. Todo a nuestro alrededor está relacionado con dispositivos electrónicos que permiten mejorar la calidad de vida de las personas.

Estas facilidades con las que contamos actualmente tienen mucho que ver con el avance tecnológico producido en el campo de las telecomunicaciones. Hoy en día ya somos capaces de realizar comunicaciones por voz, imágenes y datos desde, prácticamente, cualquier lugar de la Tierra sin que sea indispensable la conexión mediante cables.

En las últimas décadas las comunicaciones submarinas han ganado importancia. Estas han estado presentes en la monitorización de diversos parámetros medioambientales, transmisión de voz entre submarinistas, análisis del fondo marino, SONAR, o control de vehículos submarinos. Como las comunicaciones por cables son caras y resultan poco prácticas en la mayoría de los casos, la solución a ello ha sido la implementación de comunicaciones inalámbricas.

El uso de ondas acústicas para establecer las comunicaciones resulta la mejor opción, ya que las ondas de radio sufren una atenuación muy alta en el agua y las comunicaciones ópticas tampoco se presentan como una buena solución.

Las características del medio subacuático y el uso de ondas acústicas restringen las comunicaciones, pues establecen limitaciones en lo que se refiere a distancias y tasa binaria de transmisión. Este canal tiene dos grandes problemas: por un lado, la velocidad de propagación del sonido en el agua no es constante y hace que la

trayectoria de los rayos sonoros no sea curva; y por otra parte, las ondas acústicas se encuentran encerradas entre el fondo marino y la superficie, lo que se traduce en una reflexión prácticamente total a causa del fuerte cambio de impedancia. Estos inconvenientes hacen que al receptor lleguen ecos con diferentes retardos y atenuaciones, afectando seriamente a la calidad de las comunicaciones. Los retardos llegados al receptor son mayores que los que se producen con ondas electromagnéticas. No obstante, en los últimos años se ha producido un mayor interés por las comunicaciones submarinas que en un principio sólo se encontraban en el ámbito militar, alcanzando objetivos de interés social y empresarial.

Actualmente, se está investigando sobre la implementación de nodos submarinos de manera que se pueda constituir una red subacuática de comunicaciones que se asemeje a Internet. La implementación de nodos submarinos va a requerir una organización similar a las redes de comunicaciones móviles.

De este campo nacen las Redes Inalámbricas de Sensores (RIS), que utilizan varios sensores sencillos organizados de forma que subsistan a sensores de mayor complejidad. Cada una de estas unidades básicas distribuidas se conoce como nodos. Se constituyen por:

- Sensores. Elemento central del sistema. Un sensor se encarga de convertir el valor de una magnitud física (temperatura, humedad, presión, distancia, concentración, tiempo, etc.) en una señal eléctrica.

- Interfaz Inalámbrica. Este sub-sistema representa la principal diferencia entre las redes de sensores tradicionales y las RIS. La información registrada por los sensores se puede enviar a un elemento remoto sin desplegar una infraestructura previa.
- Bloque de Sincronización. Debido a que el acceso al canal compartido no es una tarea común, los diferentes han de establecer un protocolo de modo que la comunicación sea ordenada y eficiente.
- Bloque de Gestión de Energía. Los nodos se distribuyen de manera flexible, alimentados por baterías. Una opción más fiable y eficiente sería que estas redes trabajen a partir de fuentes renovables (sol, viento, mareas, etc.).
- Bloque de Control. Elemento que coordina el funcionamiento de los bloques anteriores. Los sistemas que se fundamentan en el control digital mediante microprocesadores empotrados se encuentran en casi la totalidad de sistemas que nos rodean. Debido a su simplicidad, flexibilidad y bajo precio.

Las redes de sensores inalámbricas se han extendido a entornos de trabajo submarinos (Redes Inalámbricas de Sensores Subacuáticas o RISS). Aunque las redes inalámbricas subacuáticas, al igual las terrestres, surgen en la mitad del siglo XX, la implantación en el medio subacuático es significativamente más lenta. Los avances en redes terrestres se basan fundamentalmente en la radiofrecuencia. Sin embargo, esta tecnología no se puede utilizar bajo el agua debido a la gran atenuación producida en agua salda. Por ello, las RISS son un reto en el que es preferible el uso de la comunicación mediante ondas acústicas que se propagan a una velocidad inferior a la luz (1500 m/s frente a 3×10^8 m/s).

Esta tecnología tiene una importante aplicación en los siguientes campos:

- **Monitorización ambiental.** Mediante esta tecnología se permite la medición de diferentes agentes (químicos, biológicos, etc.) que se aplican a la predicción meteorológica avanzada, detección del cambio climático, monitorización biológica (como la localización de microorganismos o bancos de peces), etc.
- **Exploración del fondo marino.** La detección de oleoductos y otras reservas, el despliegue y mantenimiento de cables submarinos, etc., se pueden realizar a través de datos recogidos con RISS.
- **Medición en entornos oceánicos.** La combinación de redes de sensores y vehículos no tripulados, aumentan la capacidad de observación y predicción de las características de dicho entorno.
- **Navegación asistida.** Las redes de sensores inalámbricas se pueden usar como balizas para la señalización de zonas peligrosas para la navegación. Además, en caso de navegación autónoma se puede utilizar este tipo de tecnología para asistir en el proceso de localización.
- **Prevención de catástrofes.**
- **Vigilancia táctica distribuida.** En combinación con robots subacuáticos no tripulados, se pueden implementar sistemas de vigilancia, reconocimiento y detección.

2. Historia de la acústica submarina

La historia de la acústica submarina se remonta hasta hace dos mil años atrás. Aristóteles (384-322 a.c.), fue el primero que descubrió que el sonido puede ser oído en el agua de la misma forma que en el aire. No obstante, no fue hasta el siglo XV cuando Leonardo da Vinci observó que los barcos pueden ser oídos a grandes distancias por debajo del agua. Aproximadamente 200 años más tarde se descubrieron los principios de la acústica submarina gracias a las leyes de vibración en cuerdas por Martin Mersenne y Galileo. En 1687, Isaac Newton estudió la propagación en el aire, descubriendo que dichos principios son aplicables al sonido en el agua, al tratarse también de un medio elástico aunque con diferentes características.

Las primeras medidas de la velocidad del sonido en el agua se realizaron a principios del siglo XIX. Usando un tubo para poder escuchar en el agua, como ya había sugerido da Vinci, científicos lograron calcular en 1826 la velocidad delo sonido en este medio. Este experimento fue realizado en el lago Geneva por Jean-Daniel Colladon y Charles-Francois Sturn usando una campana que era golpeada a la vez que se encendía un explosivo con pólvora, y un recetor situado a 10 millas. El tiempo ente la luz emitida por la explosión y el sonido llegado al barco por el agua fue usado para el cálculo de la velocidad del sonido. La velocidad resultó ser 1435 m/s (muy próximo a los resultados actuales, 1500 m/s).

Definido el primer parámetro más básico para la caracterización del canal submarino, que es la velocidad del sonido, se empezaron a desarrollar aplicaciones prácticas del uso del sonido en el agua. Una primera aplicación fue la de medir la

profundidad del mar mediante la medición del tiempo que tardaba en ir y volver una onda emitida. En 1877, el científico John Willian Strut, más conocido como Lord Rayleigh publicó *The Theory of Sound*, dos volúmenes considerados los principios de la acústica moderna.

Las primeras aplicaciones prácticas modernas se realizaron a principios de 1900. Debido al aumento del tráfico marítimo, se idearon sistemas que permitieron elevar la seguridad. Un ejemplo fue el de las campanas colocadas debajo de los barcos, de manera que su sonido pudiera ser detectado por receptores instalados en otros barcos. Estos receptores fueron diseñados por Thomas Edison y sus colaboradores para el teléfono, que introducido en una cápsula sumergible se convirtió en el primer hidrófono. Más adelante, se sustituyeron dichas campanas por generadores eléctricos que reproducían tonos y permitían transmitir en código Morse.

En 1912, tras el hundimiento del Titanic, L.R. Richardson desarrolló un sistema capaz de detectar objetos en el aire mediante ondas acústicas. Esto se convirtió poco después en otra patente que hacía uso de la misma técnica pero en el medio submarino. Sin embargo, a pesar de los buenos resultados que se obtuvieron con dicho sistema nunca se decidió comercializar el dispositivo.

En la I Guerra Mundial (1914-1918) surgió la necesidad de mejorar la acústica submarina para la detección tanto de minas como submarinos y barcos. Para detectar submarinos se utilizó un dispositivo, similar al fonendo de los médicos, que permitía localizar un submarino gracias al sonido de su motor.

Con el final de la I Guerra mundial, se comenzó a entender los principios fundamentales de la propagación del sonido. H. Liechte descubrió la refracción de las ondas acústicas en el agua, debido a la variación de la velocidad del sonido con la profundidad. Así, las sondas comenzaron a comercializarse, siendo utilizados para evitar que los buques llegaran a zonas poco profundas.

En la II Guerra Mundial (1941-1945) se incrementaron las investigaciones en el campo de la acústica submarina. Durante esta época se comenzó a emplear el término de SONAR (*Sound Navigation And Ranging*).

En la Guerra Fría, a principios de la década de los 50, Frederick Hunt propuso el canal SOFAR (*Sound Fixing And Ranging*), que permitía detectar submarinos a cientos de kilómetros al escuchar el sonido de sus motores. El proyecto final se denominó SOSUS (*Sound Surveillance System*) y consistía en un conjunto de hidrófonos situados a distintas profundidades cuya información era obtenida y procesada en busca de determinadas frecuencias. La efectividad de este sistema se vio disminuida totalmente debido a que se silenciaron los submarinos.

Al finalizar la Guerra Fría, la armada estadounidense permitió el uso de este sistema a la sociedad civil con fines de investigación.

2.1. Redes Inalámbricas de Sensores

Las Redes de Inalámbricas de Sensores (RIS) ha sido un campo de investigación prometedor en la última década del siglo XX. Los primeros antecedentes de las redes

de sensores son sistemas con una larga trayectoria y se han convertido en una tecnología muy consolidada.

En un principio la investigación de esta tecnología se orientó, principalmente, a aplicaciones militares. Por ello, las redes de radares aparecidas durante la Guerra Fría son el inicio de las actuales redes de sensores. Estas redes crecieron a lo largo de los años incluyendo aerostatos y sistemas de control y aviso del tráfico aéreo.

Sin embargo, la investigación moderna en redes de sensores se inicia alrededor de 1980 con el programa estadounidense DSN (Distributed Sensor Networks), en la agencia DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), también encargada del desarrollo inicial de lo que hoy se conoce como Internet. Se pretendía desarrollar una red de nodos sensores de bajo coste, distribuidos espacialmente y que colaboraran entre ellos para operar de una manera autónoma, transmitiéndola información al nodo que mejor uso pudiera hacer de la misma. Como se publicó en 1978, DSN consiguió tasas de transferencia de entre 300 y 9600 baudios con enlace acústico, donde colaboraron prestigiosas instituciones como la Carnegie Mellon University (CMU) de Pittsburgh, el Massachusetts Institute of Technology (MIT) y la Advanced Decision Systems (ADS) de Mountain View. A partir de ese momento y hasta la actualidad, se han desarrollado una gran cantidad de aplicaciones de RIS para aplicaciones militares.

Entre los primeros sistemas de comunicación acústica encontramos el “Gertrude” o la comunicación de voz entre submarinos desarrollado por los Estados Unidos al final de la Segunda Guerra Mundial (1945) y todavía en uso. El sistema

propuesto utilizaba una modulación analógica en amplitud con una banda de frecuencia que abarcaba entre los 2 y los 15 kHz.

En la década de los 60 se investigaron la señalización y la modulación para canales imperfectos. Se descubrió la limitación del ancho de banda en canales no compensados con respecto a la dispersión del retardo de propagación de la señal. De esta manera, debido a la naturaleza de la reverberación existente en el canal acústico en océanos, la tasa de transmisión sin ningún tipo de procesado se mostraría muy pobre siendo necesarias otras técnicas energéticamente costosas para aumentarlo.

3. Estado del arte

Las aplicaciones de las comunicaciones submarinas son infinitas, aunque presentan un gran reto a causa de las características del canal submarino. No obstante, en los últimos años se han conseguido grandes avances como un mayor rango y velocidad de envío de datos, transmisiones de vídeo a grandes profundidades (6500 km), telemetría horizontal en distancias de hasta 200 km y uso de robots inalámbricos para tareas peligrosas.

El avance es claro y se tiende a configuraciones de red en las comunicaciones en sustitución de las tradicionales comunicaciones punto a punto, acercándose cada vez más hacia la implementación de un Internet Submarino.

Las comunicaciones submarinas evoluciona cada vez más hacia una red formada por nodos fijos y estacionarios cuya función será la de realizar las tareas de

enrutamiento de los datos o información. Todos estos nodos serán accesibles mediante un radioenlace que conecta con un primer nodo en la superficie marina.

No obstante, el desarrollo de nodos submarinos que permitan construir una red de comunicaciones no es nada sencillo, debido a los múltiples problemas con los que se cuenta a la hora de implementar esta idea:

- **Coste**. La complejidad y la necesidad de una protección adecuada que soporte las condiciones existentes en un medio subacuático aumentan el precio de estos nodos submarinos.
- **Despliegue**. A diferencia que en el ámbito terrestre en el medio marino aumenta la dificultad a la hora de distribuir un número elevado de sensores.
- **Potencia**. Al aumentar la distancia, la complejidad del proceso se incrementa debido a las técnicas de procesamiento necesarias para compensar la señal, aumentando así la potencia requerida, que será mayor que en las radiocomunicaciones.

Por otra parte, en función de las características del canal se suman problemas (que serán estudiados con mayor detenimiento posteriormente) como los siguientes:

- Pérdidas de transmisión.
- Ruido.
- Multitrayecto.
- Retardo.
- Efecto Doppler.

4. Tecnologías Inalámbricas en el medio subacuático

La Acústica es la tecnología que mayor potencial presenta a la hora de propagar una señal inalámbrica en el medio submarino. Para demostrar esta afirmación se analizarán las tecnologías más convenientes tanto en el ámbito terrestre como en el subacuático que son: las ondas de radiofrecuencia, las comunicaciones ópticas y las comunicaciones acústicas.

4.1. Ondas de Radiofrecuencia

Las ondas de radiofrecuencia son aquellas ondas electromagnéticas que tienen una frecuencia menor a los 300 GHz. Dichas ondas se propagan como una variación del campo electromagnético cuando las cargas eléctricas oscilan o se aceleran.

Este tipo de tecnología en su aplicación en el ámbito subacuático, y especialmente el marino o el oceánico, presenta como principal dificultad la conductividad del agua salada.

A pesar de que el agua pura es un aislante, el agua que encontramos en la naturaleza contiene partículas en suspensión como, por ejemplo, sales minerales disueltas que la convierten en un conductor eléctrico.

Cuanto más elevada es la conductividad de un material mayor es la atenuación de las ondas de radiofrecuencia que lo atraviesan. Esto se produce ya que las ondas que se propagan, según las Leyes de Maxwell, son la combinación de la propagación de una onda eléctrica y una onda magnética que oscilan perpendicularmente entre si y en un plano ortogonal a la dirección de avance la onda.

La atenuación varía en función de la frecuencia empleada. Por ello, las ondas con frecuencias comprendidas entre los 30 y 300 Hz son las más indicadas para su aplicación en un medio subacuático. No obstante, esto obliga a que el tamaño de las antenas utilizadas sea excesivo para poder conseguir una eficiencia de radiación excelente.

Sea Text fue el primer módem comercial que fue lanzado en 2006 por la compañía Wireless Fibre System. Se han conseguido alcanzar velocidades de 100 bps en enlaces de varias decenas de metros. Esta compañía junto otras empresas líderes del sector, Tritech [Tri] y Konsberg [Kon], han proyectado el módem de RF SeaTooth, capaz de cubrir enlaces de un metro con velocidades de 156 kbps.

4.2. Ondas ópticas

Las comunicaciones ópticas se basan en la transmisión de ondas electromagnéticas en el espectro visible con longitudes de onda comprendidas entre 400 nm (luz azul) y 700 nm (luz roja).

La atenuación va a depender tanto de la absorción del agua ($\alpha(\lambda)$) como de la turbidez ($\zeta(\lambda)$). Esta última medida recoge la dispersión de la luz producida por las partículas en suspensión en el agua sin tener en cuenta la dispersión por parte de las moléculas de agua y la absorción originada por los elementos en suspensión.

$$K(\lambda) = \alpha(\lambda) + \zeta(\lambda)$$

A la absorción del espectro cercano al color rojo (700 nm) debido a la absorción del propio H₂O, se le suman otras sales disueltas como NaCl, MgCl₂, Na₂SO₄, CaCl₂ y

KCl que absorben otras frecuencias determinadas. En la banda de transmisión entre los 400 y 500 nm (la región entre el verde y el azul) podríamos esperar un mayor rendimiento debido a la menor absorción de la misma.

Sin embargo, la atenuación también está ligada con la turbidez del agua. La existencia de partículas orgánicas e inorgánicas suspendidas en el agua que ayudan a la dispersión del haz de luz. En 1976, N. G. Jerlov realizó una clasificación de la claridad del agua. Esta escala clasifica las aguas en oceánicas o profundas (grupos I a III) y aguas someras o costeras (grupos 1 a 9), en orden decreciente de *transmitancia* (cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en la unidad de tiempo, potencia). En aguas costeras, con menor transparencia, menos diáfanas, más sucias, la atenuación es máxima, por lo que la comunicación no tendrá una potencia adecuada.

Los mejores resultados de investigaciones relacionados con esta tecnología son de enlaces de 100 metros en un tanque de agua y 10 metros en mar abierto con aguas poco turbidas con tasas de 10Mbps. Sin embargo, actualmente sólo se puede encontrar en el mercado dos módems subacuáticos basado en comunicaciones ópticas (AQUAmodem Op1 de la marca Aquatec Group y OM-1000 de la compañía Omni Instruments. Este tipo de tecnología no proporciona los resultados necesarios para la implementación de una RIS.

5. Comunicaciones acústicas subacuáticas

La Acústica es la *“parte de la Física que trata de la producción, control, transmisión, recepción y audición de los sonidos y también, por extensión, de los ultrasonidos”*. Por otra parte, desde el punto de vista de la ingeniería, los sonidos se

toman como, en el caso de que estos se den en fluidos, formaciones de ondas longitudinales de presión. La frecuencia de las ondas acústicas se encuentra en el rango de algunos Hz a una decena larga de kHz. Los ultrasonidos son de mayor frecuencia y, sin que exista convención alguna al respecto, se podría llevar el rango hasta varios centenares de kHz. A ambas ondas, sonoras y ultrasónicas, nos referimos con ondas acústicas. La velocidad de propagación de las ondas acústicas en el agua es de aproximadamente 1.500 m/s, es decir, unas 200.000 veces menor que la de la onda electromagnética en el aire.

Como ya hemos comentado, la onda acústica se prefiere como onda portadora en comunicaciones submarinas debido a que la absorción, por parte del agua de mar, de la energía de la onda electromagnética a las frecuencias de interés es mucho mayor que la de la energía de la onda acústica, lo que permite enlaces más largos.

El conocimiento de las numerosas técnicas desarrolladas en los últimos años en las comunicaciones inalámbricas tiene su aplicación en el medio subacuático, aunque no de manera inmediata ya que el canal acústico subacuático es muy diferente del canal aéreo radioeléctrico. Por tanto, estas técnicas son admisibles en comunicaciones submarinas pero con una clara diferencia en su aplicación.

Una de las principales diferencias es la gran variedad entre los valores de la velocidad de propagación. El pequeño valor de ésta en el agua tiene tres importantes consecuencias inmediatas:

- Retardos en la propagación, que aumenta el intervalo de tiempo entre el envío de la información y la disponibilidad de ésta en el receptor.

- El canal submarino es muy variante en el tiempo.
- Las longitudes de onda muy cortas. Podría compararse a los ultrasonidos con las “microondas acústicas”, ya que los fenómenos de reflexión, refracción y difracción son parecidos, desde el punto de vista geométrico, a estos fenómenos con ondas de radio.

Otras dos notables diferencias entre el canal acústico submarino y el radioeléctrico en el aire son:

- En ondas acústicas se utilizan frecuencias más bajas por la alta absorción del medio, lo que se traduce en que el ancho de banda utilizable para la transmisión de información es menor, sin que los canales sean planos en frecuencia.
- En radiofrecuencia la antena es la encargada de adaptar los equipos de transmisión y recepción con el medio físico. La antena convierte una onda electromagnética guiada en una onda de radio y viceversa. Sin embargo, en las comunicaciones acústicas el papel de adaptador lo realiza un transductor electroacústico.

En la propagación acústica submarina a causa del gradiente vertical de la velocidad de propagación, debido a su vez, a un gradiente vertical del índice de refracción, provoca la curvatura del rayo de la onda. En la propagación acústica, el gradiente vertical de la velocidad del sonido se debe, en gran parte, a la variación de la temperatura del agua con la profundidad y provoca la curvatura de los rayos de las ondas acústicas tendiendo a la velocidad mínima. En cualquier caso, queda claro que el canal submarino es uno de los más hostiles que se pueden encontrar en la propagación

inalámbrica. Por ello, en comunicaciones acústicas submarinas hay elegir cuidadosamente las técnicas de transmisión.

Los que se pueden conseguir mediante ondas ópticas o de radio son de distancias que no permiten el desarrollo de redes de sensores que cubran una distancia de unos cientos de metros con un consumo de energía reducido. Por ello, se puede concluir en que la tecnología más adecuada y en la que se ha puesto mayor interés es aquella basada en ondas acústicas.

5.1. Ondas Sonoras

Las ondas sonoras se generan a causa de la propagación de una perturbación mecánica en un medio elástico, como puede ser un fluido y ,en este caso, el agua. Dicha propagación se produce a una velocidad que varía en función de las características del medio.

Una onda sonora puede considerarse como la energía mecánica transmitida por la fuente desde partícula a partícula, propagada a través del medio a una velocidad igual a la velocidad del sonido en dicho medio. Parte de la energía mecánica de la onda sonora es absorbida por el medio en el que se propaga debido principalmente a rozamiento y a fenómenos resonantes. El sonido en el agua se propaga más rápido y tiene menores pérdidas que en el aire.

Diversos factores influyen en la distancia que el sonido puede viajar bajo el agua. Las partículas de agua de mar pueden reflejar, dispersar y absorber algunas frecuencias de sonido. El agua de mar absorbe 30 veces la cantidad de sonido absorbido por el agua destilada, atenuando su amplitud a ciertas frecuencias. Los

sonidos de baja frecuencia son capaces de pasar las pequeñas partículas y viajar mayores distancias sin sufrir, prácticamente, pérdidas por absorción o dispersión. Además, la propagación de las ondas se refractará hacia arriba o hacia abajo en función de los cambios de salinidad, temperatura y presión, que afectaran a la velocidad de la propagación del sonido bajo el agua, variando entre 1450 y 1540 m/s.

Una onda sonora es caracterizada por: la distancia de cada partícula al punto de equilibrio, la velocidad de propagación, la velocidad de la partícula y la presión acústica.

5.2. Velocidad de propagación

La velocidad de propagación de una onda acústica puede ser expresada a través de las características del medio en el que se propaga. Éstas son la densidad (ρ) y el módulo de elasticidad (E).

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Se puede tomar como valor de la densidad del agua $\rho=1030 \text{ kg/m}^3$, aunque variará con el tipo de sedimento.

En el agua, la velocidad de propagación del sonido, como ya hemos mencionado anteriormente, se puede considerar $c=1500 \text{ m/s}$ como valor medio. No obstante, la velocidad de propagación del sonido experimentará grandes variaciones en función de la presión, temperatura y salinidad.

$$c = 1449.2 + 4.6T - 5.5 \times 10^{-2} T^2 + 2.9 \times 10^{-4} T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 1.6 \times 10^{-2} D$$

ó

$$c = 1448,96 + 4,591T - 5,304 \times 10^{-2} T^2 + 2,374 \times 10^{-4} T^3 + 1,340(S - 35) + 1,630 \times 10^{-2} D + 1,675 \times 10^{-7} D^2 - 1,025 \times 10^{-2} T(S - 35) - 7,139 \times 10^{-13} D^3$$

T es la temperatura entre 0°C y 35°C, S es la salinidad entre 0 y 45 partes por mil y D es la profundidad entre 0 y 1000 m. La velocidad de propagación aumenta con la temperatura, la salinidad y la profundidad. Tanto la temperatura como la salinidad cambian según la profundidad. Sin embargo, la variación de la velocidad se debe principalmente a la temperatura en la zona más próxima a la superficie y a la presión en las zonas más profundas.

En general, el océano se divide en capas horizontales. La capa superficial se calienta por el efecto del sol, cuya temperatura en función de la estación del año y de su situación geográfica. En profundidades medias, el agua se mezcla debido a las olas y las corrientes originando una capa mixta. A mayores profundidades, se encuentra la capa de transición denominada termoclina principal donde las temperaturas caen con la profundidad y el descenso de la temperatura disminuyendo, por ende, la velocidad del sonido.

A partir de 600 metros de profundidad los cambios en la temperatura son pequeños, por lo que la presión es el factor más influyente en la velocidad del sonido, y a medida que aumenta también lo hace ésta.

Las señales acústicas con las que normalmente se trabaja son caracterizadas por su frecuencia (f) en Hz o su periodo (T) en segundos. La longitud de onda (λ) corresponde al periodo espacial de la señal y se puede expresar mediante la velocidad de propagación (c) y el periodo (T).

$$\lambda = cT$$

Es relevante tener en cuenta los órdenes de magnitud de frecuencias y longitudes de onda en múltiples aplicaciones de la acústica submarina, ya que son fundamentales a la hora de establecer una comunicación entre dos puntos. Las frecuencias altas, como ya sabemos, producen atenuaciones elevadas a causa de la absorción del agua a pesar de que permitan transmitir a velocidades binarias mayores.

5.3. Impedancia Acústica

La impedancia característica del medio se define como el producto ρc , siendo ρ la densidad del medio y c la velocidad de propagación a través del mismo. Esta impedancia se mide en Rayl que relaciona la presión acústica con el movimiento de las partículas. En física, rayl es una de las dos unidades de impedancia acústica, que equivale a la presión del sonido de una DINA/cm², dividida por la velocidad de 1 cm/s.

Material	Densidad (Kg / m ³)	Vel. Sonido (m/s)	Impedancia (Rayl)
Aire	2700	6420	17,3x10 ⁶
Agua	1030	1531	1,6x10 ⁶
Aluminio	1,2	331	397

Tabla 1. Impedancias acústicas en diferentes medios. Se puede apreciar como las velocidades de propagación en aluminio y agua son mayores que en el aire, ya que se tratan de medios más densos.

Como una onda sonora puede experimentar un cambio de medio es importante explicar cómo va a influir la incidencia en una frontera agua-aire en las propiedades de la onda. Teniendo en cuenta una propagación inicialmente en el agua, se produce un cambio importante en la impedancia, concretamente de mayor impedancia a menor, por lo que el coeficiente de reflexión se aproximará a la unidad. Por esta razón, cuando una onda sonora llegue a la superficie, gran parte de la energía se reflejará y continuará su propagación en el agua, experimentando una pérdida de energía que se considera despreciable.

5.4. Ondas esféricas

Se considera la propagación de ondas esféricas como una propagación en tres dimensiones de la onda. Ambos modelos de propagación, ondas planas y esféricas, son útiles aunque las ondas planas son más fáciles de manejar.

En ocasiones, cuando se trabaja lejos de la fuente sonora se puede llegar a considerar una onda inicialmente esférica como una onda plana.

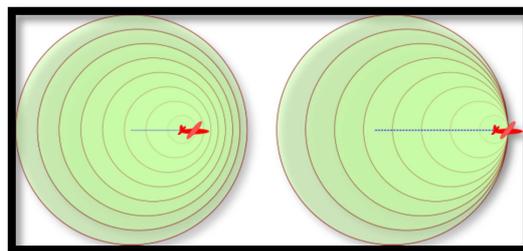


Figura 5.1. Propagación de ondas esféricas. [4]

Este modelo se ajusta más a la realidad en lo que se refiere a la acústica submarina y acústica en general, pues una onda a medida que se propaga pierde energía de manera proporcional al inverso de su distancia.

6. Propagación acústica en el medio subacuático

La propagación acústica submarina se caracteriza por cambios importantes dependientes de la frecuencia y la baja velocidad de propagación en comparación a la de propagación electromagnética en la atmósfera. Las pérdidas de transmisión y ruido son los principales factores que determinan el ancho de banda disponible, distancia y relación señal a ruido para el funcionamiento de un sistema de comunicaciones. Además, la baja velocidad de propagación de las ondas acústicas conlleva a la aparición del fenómeno del multisenda o multitrayecto que varía en el tiempo e influye en el diseño y procesamiento de la señal, suponiendo limitaciones severas en la realización del sistema.

Las pérdidas de transmisión engloban tres mecanismos de atenuación que afectan a las ondas acústicas submarinas: radiación de energía, absorción y reflexión del sonido. Mientras que las pérdidas por radiación de energía dependen sólo de la distancia de propagación, las pérdidas por absorción aumentan no sólo con la distancia sino también con la frecuencia, fijando el límite en el ancho de banda disponible.

La generación de ondas acústicas produce un aumento de la cantidad fija de energía transmitida por la fuente hacia grandes áreas externas a ella. Dicha dispersión espacial de la energía se considera una atenuación geométrica, en la que la energía disminuye en función de r^{-k} , donde r es la distancia y k es el factor de dispersión que describe la geometría de propagación. La radiación para distancias cortas se puede considerar como propagación esférica con $k = 2$, y para distancias largas como propagación cilíndrica con $k = 1$, debido a que las ondas no pueden propagarse

indefinidamente en dirección vertical por la existencia de los límites que forman el fondo marino y el interfaz con el aire de la atmósfera. El segundo mecanismo de atenuación son las pérdidas por absorción, causado por la perturbación mecánica producida en el fluido a través del movimiento de las partículas lo que produce una conversión de la energía de la onda propagándose en calor.

Las ondas sonoras son parcial o totalmente reflejadas en función de la frecuencia, la velocidad del sonido y el tipo de obstáculo encontrado.

El ruido observado en los mares y océanos depende en gran medida de la frecuencia y la situación geográfica. Normalmente, en los entornos cercanos a la costa existe mucho más ruido que los océanos profundos debido a las fuentes artificiales de ruido que crea el hombre. A diferencia del ruido artificial, la mayoría de las fuentes naturales de ruido ambiente (turbulencias, oleaje y ruido térmico molecular) puede ser modelada por un espectro continuo y ruido Gaussiano coloreado.

El ruido ambiente sumado a las pérdidas de transmisión dependientes de la frecuencia determinan la relación entre la distancia, el ancho de banda y la relación señal a ruido (SNR Signal-to-Noise Ratio) disponibles a la entrada del receptor.

Se pueden clasificar los sistemas de comunicaciones acústicas subacuáticas en base a la distancia como sistemas de *largo*, *medio*, y *corto* alcance. Para sistemas de largo alcance se opera sobre 10-100 km y el ancho de banda está limitado a unos pocos kHz. En los sistemas de medio alcance opera sobre 1-10 km y presentan un ancho de banda del orden de 10 kHz. En los sistemas de corto alcance por debajo de 100 m, se pueden conseguir más de 100 kHz. Como el ancho de banda está limitado

existe la necesidad de analizar diferentes métodos de modulación eficientes en el ancho de banda si se quiere transmitir más de un bps/Hz sobre este tipo de canales acústicos.

En la mayoría de los casos las señales acústicas están sujetas a la propagación mediante un canal subacuático, cuyas propiedades son variantes en el tiempo y están fuertemente ligadas a la localización del transmisor y receptor.

La estructura depende de la configuración del enlace de transmisión, ya sea horizontal o vertical en función de las posiciones del transmisor y receptor. Por otra parte, los enlaces verticales tienen un tiempo de dispersión pequeño pero los enlaces horizontales pueden experimentar un retardo de dispersión mayor. La mayor parte de los canales de largo y medio alcance presentan alta dispersión que origina una degradación severa de las señales de acústicas en la comunicación.

La propagación multitrayecto está bastante relacionada con la profundidad de los océanos: En el caso de aguas profundas se forman multicaminos debido a la curvatura de los rayos que tienden a zonas donde se encuentra la velocidad de propagación menor (a la línea que sigue el rayo de la onda acústica se le denomina eje del canal sonoro profundo); y en el caso de aguas someras se produce debido a las reflexiones en la superficie y fondo del mar junto con un posible camino directo. En canales de aguas profundas, la refracción provocada por el gradiente vertical de la velocidad de propagación en la columna de agua permite la aparición de zonas de sombra en las que la señal llega con baja energía, pudiéndose perder la conexión con el receptor; mientras que en aguas someras estas zonas de sombra son casi inexistentes.

El diseño de los sistemas de comunicaciones subacuáticas se realiza mediante el uso de modelos de propagación para predecir la estructura multicamino. La teoría de rayos y la teoría de modos normales facilitan las bases para tales modelos de propagación.

Las duras condiciones del canal subacuático crece con el grado de movilidad de todos los elementos presentes en el sistema de comunicaciones, por lo que se ocasiona un desvanecimiento multitrayecto rápido.

Resumiendo, la señal acústica se propaga en un entorno muy hostil en el que es muy complicado conseguir una modulación espectralmente eficiente debido a los diferentes problemas que aparecen en el canal submarino. Los principales desafíos que dificultan el desarrollo y funcionamiento de los sistemas de comunicaciones submarinas son:

- El ancho de banda está bastante limitado.
- Ruido ambiente.
- Los retardos de propagación son elevados. La velocidad de transmisión de las ondas acústicas en agua salada es alrededor de 1500 m/s, por lo que el retardo de propagación en el canal subacuático es muy significativo pues tiene profundas implicaciones en la sincronización del tiempo.
- La respuesta al impulso del canal tiene variaciones temporales y espaciales. Las características del canal varían con el tiempo y dependen mucho de la localización del transmisor y receptor. La naturaleza fluctuante del canal causa que las señales

recibidas sean fácilmente distorsionadas. Existen dos tipos de caminos de propagación: los caminos determinísticos causados tanto por la reflexión de las ondas en los límites como la superficie y el fondo del mar, como por la curvatura de los rayos acústicos causada por la variación del índice de refracción del agua con la profundidad del mar; y los caminos aleatorios causados principalmente por las olas en la superficie, que contribuye a la mayor parte de la variación temporal. La señal sufrirá con frecuencia dispersión debido a la propagación multicamino.

7. Pérdidas de propagación

En la propagación del sonido a través de un medio existen pérdidas de transmisión debido a diversos factores. Las pérdidas de propagación de la onda acústica en el medio subacuático se deben principalmente a dos fenómenos: la absorción y la dispersión geométrica. Estas pérdidas son fundamentales para poder establecer una comunicación entre dos puntos, ya que la relación SNR en el receptor va a depender, de manera indirecta, de las pérdidas de transmisión. Altos valores de TL (*Transmission Loss*) se traducirá en valores bajos de SNR empeorando la calidad del receptor. Por otra parte, también se dan pérdidas causadas por heterogeneidades en el medio como pueden ser animales o plantas, difracción en ciertas zonas y reflexiones en superficie, fondo y capas de agua.

7.1. Absorción

La absorción, tanto para las ondas de radiofrecuencia como para las ópticas, ha sido un factor determinante a la hora de seleccionar las ondas acústicas como la

tecnología predominante en el ámbito de las redes inalámbricas de sensores subacuáticas.

El agua del mar es un medio de propagación que absorbe parte de la energía transmitida por la onda, que es disipada debido a la viscosidad y los procesos de relajación (los procesos de relajación iónica del sulfato de manganeso y el ácido bórico solo se dan en agua salada).

En general, se puede aproximar el coeficiente de absorción del agua utilizando la ecuación empírica de Thorp.

$$10 \log(a(f)) = \frac{0,11 f^2}{(1 + f^2)} + \frac{44 f^2}{(4100 + f^2)} + 0,000275 f^2 + 0,0003$$

; dónde f es la frecuencia de la señal acústica [kHz] y “ a ” es la atenuación.

7.2. Dispersión Geométrica

Las pérdidas debidas a la dispersión geométrica son debidas a la dispersión de la onda acústica a medida que el frente de onda avanza, cubriendo mayores superficies.

$$A(l, f) = l^k a(f)^l$$

Estas pérdidas se pueden modelar con el factor l^k , donde l es la distancia de transmisión (m), y el factor k modela las pérdidas geométricas con un valor entre 1 y 2,

dependiendo de si estamos ante un frente de onda cilíndrico o esférico respectivamente.

8. Ruido

El ruido ambiente (N) que podemos encontrar en el medio subacuático tiene una fuerte relación con el entorno en el que se trabaja. Por ello, para el entorno oceánico, se tienen fórmulas empíricas que definen las principales fuentes de ruido: turbulencias (N_t), tráfico marítimo (N_s), olas (N_w) y ruido térmico (N_{th}).

$$10\log N_t(f) = 17 - 30\log f$$

$$10\log N_s(f) = 40 + 20(s - 0,5) + 26\log(f) - 60\log(f + 0,03)$$

$$10\log N_w(f) = 50 + 7,5w^{1/2} + 20\log f - 40\log(f + 0,4)$$

$$10\log N_{th}(f) = -15 + 20\log f$$

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f)$$

Con dichas fórmulas se puede estimar la densidad espectral de potencia de las cuatro fuentes de ruido anteriormente nombradas, expresadas en dB (referencia $1\mu\text{Pa}$) por Hz en función de la frecuencia f expresada en kHz.

- A muy bajas frecuencias, las fuentes de ruido predominante son las turbulencias y el ruido producido por los barcos.
- Hasta frecuencias de alrededor de 100 kHz, el ruido producido por el viento tiene una importancia considerable.
- Cuando se trabaja en alta frecuencia, el ruido predominante es el térmico.

8.1. Relación Señal-Ruido

Se debe calcular el impacto global sobre la señal recibida, tanto de las pérdidas de propagación como la densidad espectral de ruido $N(f)$ a distintas frecuencias. Se considera que la señal transmitida (SL) es de 0 dB y que el ancho de banda de la señal (BW) es de 1 Hz.

$$SNR (dB) = SL - TL - NL = SL - 10\log(A(f)) - 10\log(N(f)) \cdot BW$$

Los resultados demuestran que para redes poco densas es más conveniente la utilización de frecuencias por debajo de 20 kHz. No obstante, para redes de densidad media o alta, el uso de frecuencias más altas.

9. Multitrayecto

El medio submarino se encuentra limitado por la superficie y el suelo por lo que las señales experimentan reflexiones en su propagación. Esto hace que cada rayo emitido tenga una trayectoria diferente hasta llegar al receptor.

Diferentes caminos conllevan distintas distancias recorridas por la señal y, por ende, la aparición de retardos variables. Para un único pulso transmitido, al receptor llegan distintas réplicas con una atenuación y retardo concreto con respecto al pulso original. Este fenómeno, como ya se ha mencionado, es uno de los factores más problemáticos y determinantes en el momento de llevar a cabo una comunicación entre dos puntos.

El multitrayecto se pone de manifiesto de manera mayor cuando la fuente emisora es poco directiva. Por ello, con fuentes omnidireccionales los rayos se emiten en más direcciones y en el receptor se captarán un mayor número de retardos. Por otra parte, con fuentes directivas, a determinadas profundidades, se puede evitar las reflexiones en el suelo y la superficie, por lo que el multitrayecto se producirá únicamente por la refracción, concentrando por un tiempo los ecos llegados al receptor.

El rayo principal, con mayor amplitud, no tiene que ser el primero en llegar al receptor debido a la variación de velocidad en diferentes capas. Esto puede ocasionar que un rayo que aun habiendo recorrido una distancia mayor llegue antes por haber pasado por capas con mayor velocidad de propagación. Se pueden diferenciar tres partes en la respuesta temporal: pre ecos, señal directa y eco. No siempre todas las partes se dan en todos los perfiles de velocidad.

En el caso de que al receptor llegue una misma señal de manera prácticamente simultánea se originará un fenómeno conocido como fading o desvanecimiento. El desvanecimiento consiste en la atenuación repentina a ciertas frecuencias debido a la variación aleatoria de la amplitud producida a causa del multitrayecto. Este fenómeno es usual en las ondas de radio debido al elevado valor de la velocidad de la luz que hace que los retardos sean muy cortos. En cambio, en la acústica submarina, la reducida velocidad de propagación hace que los ecos sean más distinguibles y difíciles de controlar que con ondas de radio.

10. Efecto Doppler

El efecto Doppler es un fenómeno que se produce cuando existe un movimiento relativo entre la fuente emisora y el receptor. Este efecto produce un desplazamiento de frecuencia en la onda que se emite.

Para explicar este fenómeno imaginemos un emisor s_0 que se mueve a una velocidad v_0 transmitiendo ondas de una frecuencia f_0 y a un receptor r_0 que se encuentra en reposo. Debido al movimiento relativo que existe ambos puntos se origina un desplazamiento en frecuencia que, como ya hemos indicado, se conoce como efecto Doppler. De esta manera, el receptor r_0 ya no recibe f_0 si no que se produce un desplazamiento en frecuencia en función de la velocidad relativa del emisor v_0 , en relación a la velocidad de propagación del medio c .

En el caso de que la fuente se acerque al receptor tenemos que el desplazamiento de frecuencia es el siguiente:

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v_0}{c}\right)$$

Y para el caso en el que la fuente se aleje del receptor:

$$f = f_0 \left(1 - \frac{v_0}{c}\right)$$

En comunicaciones submarinas el efecto Doppler tiene gran importancia, ya que la baja velocidad del sonido en el agua (1500 m/s) hace que las velocidades de una fuente originen elevados desplazamientos de frecuencia.

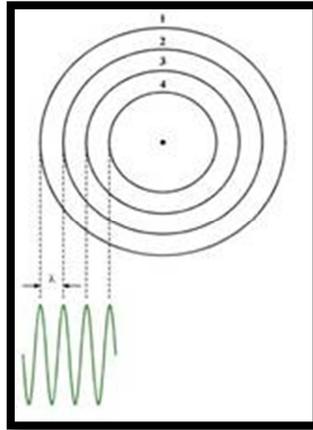


Figura 10.1. Fuente emisora y observador están fijos.
La frecuencia emitida es la misma percibida. [5]

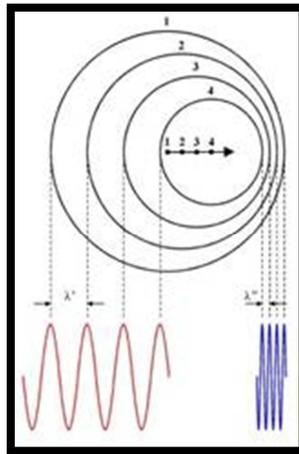


Figura 10.2. Fuente en movimiento.

Hacia atrás se percibe menor frecuencia; hacia adelante, se percibe mayor frecuencia. [5]

11. Modulación

La modulación de una señal se define como la alteración de una o más propiedades de una onda periódica, conocida como portadora, en función de otra señal, conocida como señal moduladora. Las propiedades a modificar pueden ser la amplitud, la fase o la frecuencia de la onda portadora. Haciendo uso esta técnica el espectro frecuencial (conjunto de frecuencias en las que una señal determinada

transporta una cierta cantidad de energía) de la señal moduladora se ajusta a las características del canal de comunicaciones utilizado.

Es primordial obtener una eficiencia espectral muy elevada para explotar al máximo el limitado ancho de banda del que se dispone en el canal acústico subacuático. Los procesos de modulación y de demodulación (proceso inverso a la modulación) deben cumplir con las restricciones energéticas que se imponen en este medio hostil.

Los esquemas de modulación se clasifican en dos grupos de acuerdo a si requieren de un sincronismo de fase con la onda portadora o no. Por tanto, las modulaciones pueden ser: modulaciones como coherentes o no-coherentes.

11.1. Modulaciones no Coherentes

Los primeros trabajos en comunicaciones acústicas se fundamentaron principalmente en las modulaciones no coherentes, desarrollándose demoduladores basados en detección de energía. La principal ventaja de estas modulaciones es su simplicidad y su factibilidad. Por ello, los módems desarrollados para este tipo de modulaciones no tienen un consumo excesivo de potencia ni requieren de unidades de procesamiento con elevadas capacidades de cálculo. No obstante, la eficiencia espectral que se obtiene con estas técnicas es muy baja debido a la interferencia entre símbolos y entre frecuencias generadas en el canal acústico submarino. Las modulaciones no coherentes son:

- Modulación en Amplitud. Proceso que consiste en cambiar la amplitud de la onda portadora (que tendrá una determinada frecuencia) de acuerdo a la amplitud de la señal moduladora (información). En los sistemas digitales se ha utilizado extensivamente la versión binaria basada en el encendido/apagado (on-off keying) de la interfaz inalámbrica del módem para transmitir un '1' o un '0' respectivamente.

$$y(t) = A \cdot x(t) \cdot \sin(2\pi f_c t)$$

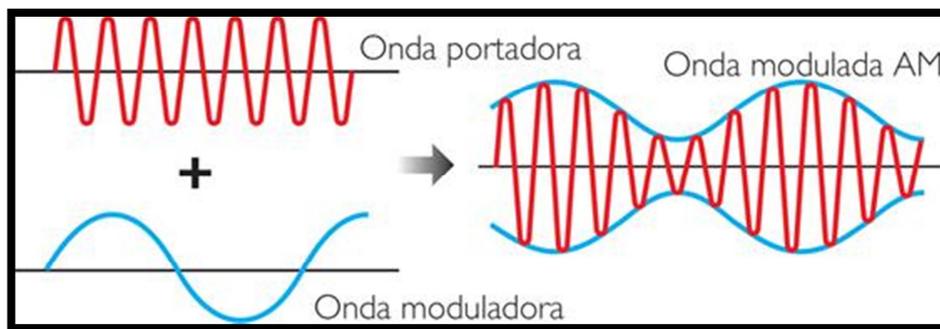


Figura 9.1. Modulación en Amplitud (AM). [6]

- Modulación en Frecuencia. En este caso la señal modulada mantiene fija su amplitud y el parámetro de la señal portadora que varía es la frecuencia, y lo hace de acuerdo a como varíe la amplitud de la señal moduladora. En otras palabras, la modulación en frecuencia (FM) es el proceso de codificar información en una onda portadora mediante la variación de su frecuencia instantánea de acuerdo con la señal de entrada.

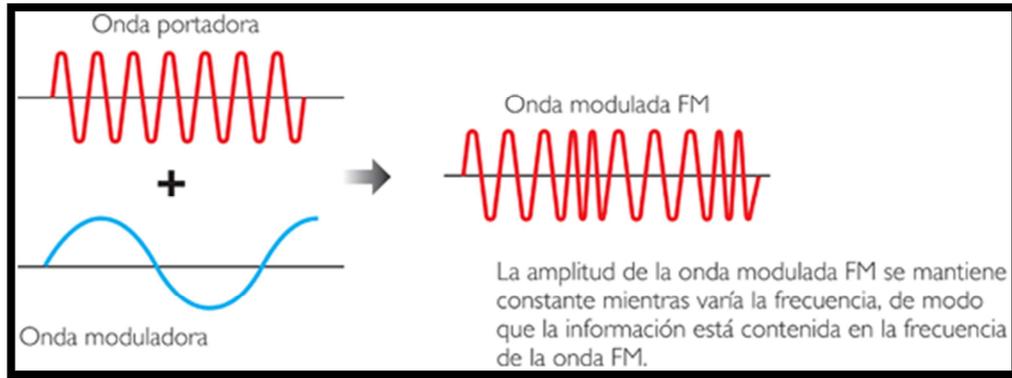


Figura 9.2. Modulación en Frecuencia (FM). [6]

Para la detección de las diferentes frecuencias asociadas a los distintos símbolos transmitidos se utilizan bancos de filtros con una serie de detectores de potencia asociados.

$$y(t) = A. \sin(2 \pi [f_c + B. x(t)]t)$$

11.2. Modulaciones Coherentes

Para aumentar la eficiencia espectral y el alcance de los módems, se hace uso de técnicas de modulación alternativas basadas en modulaciones con coherencia de fase, tales como modulación de fase (phase-shift keying o PSK) o la modulación de amplitud en cuadratura.

$$y(t) = A. \sin(2 \pi f_c t + B. x(t))$$

- Modulación en fase. La modulación PSK se trata de una modulación digital que consiste en variar la fase de la onda portadora entre un número de valores discretos. El número de valores depende del tipo de modulación M-PSK, donde M

es el número de símbolos existentes que coincide con el número de fases de la portadora y relaciona con el número de bits n que lleva cada símbolo.

$$n = \log_2(M)$$

Esta modulación agrupa la secuencia binaria a enviar en grupos de n bits a los que se le asigna un símbolo s_i con una determinada fase θ_i siendo i el subíndice correspondiente a cada uno de los posibles números.

Para calcular un símbolo s_i se utiliza la siguiente expresión:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos\left(\omega_c t + \frac{2\pi(i-1)}{M}\right) + \theta_0; 0 \leq t \leq T$$

Siendo T el periodo del símbolo y E la energía de cada símbolo, que se calcula mediante el periodo y la amplitud de la senoide A .

$$E = \frac{A^2}{2} T$$

Se define como constelación la representación en el plano complejo de los símbolos de una determinada modulación en términos de fase y amplitud. Los ejes del plano son I (*In phase*) y Q (*Quadrature*), y cualquier símbolo puede ser expresado como combinación lineal de los mismos.

$$\Psi_1 = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(\omega_c t)$$

$$\Psi_2 = -\sqrt{\frac{2}{T}} \sin(\omega_c t)$$

$$s_i = I_i \Psi_1 + Q_i \Psi_2$$

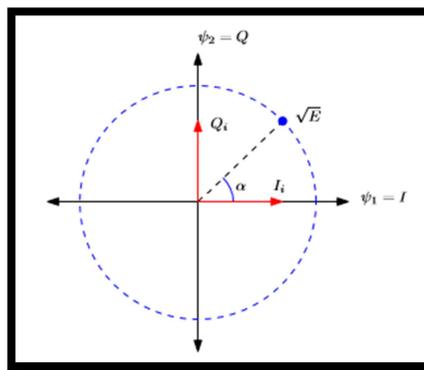


Figura 9.3. Constelación M-PSK. [3]

Por ejemplo, si se utilizan 2 bits por símbolo se obtiene como resultado una modulación QPSK ó 4-PSK que hace uso de cuatro portadoras diferentes con fases equi-espaciadas.

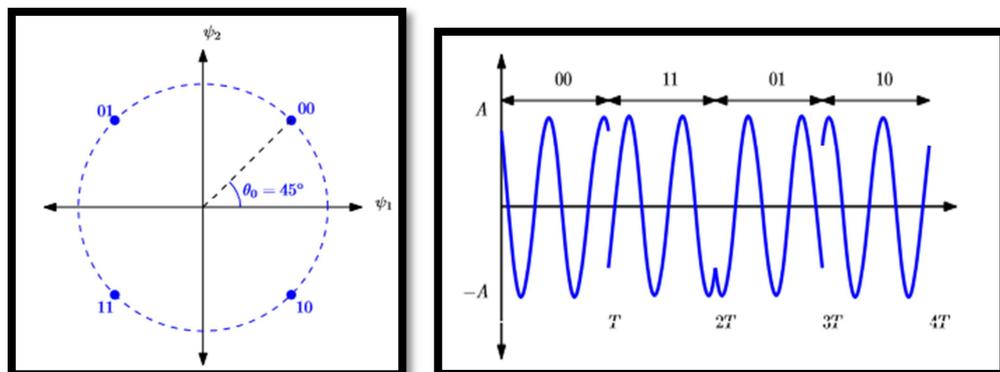


Figura 9.4. Constelación y símbolos en tiempo para QPSK. [3]

- Modulación en amplitud en cuadratura. La modulación QAM, en inglés Quadrature Amplitude Modulation, se trata de una modulación híbrida ya que varía la amplitud y fase de la onda portadora. En comparación con la modulación ASK que solamente cambia la amplitud de la portadora y la técnica PSK que solo modifica la fase, con QAM se puede representar cualquier punto en el plano IQ .

Un determinado símbolo s_i se puede expresar de la siguiente manera:

$$s_i(t) = I_i \cos(w_c t) - Q_i \sin(w_c t)$$

I_i y Q_i son las componentes en fase y cuadratura de cada símbolo y se expresan de la siguiente manera en función de la amplitud A y ϕ_i :

$$I_i = A_i \cos(\phi_i)$$

$$Q_i = A_i \sin(\phi_i)$$

$$A_i = \sqrt{(I_i^2 + Q_i^2)}$$

$$\phi_i = \arctan\left(\frac{Q_i}{I_i}\right)$$

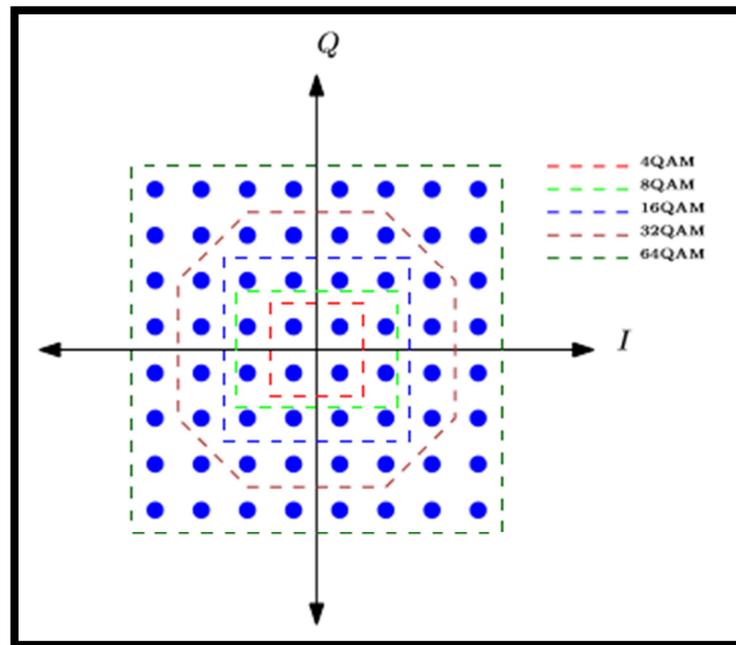


Figura 9.5. Constelaciones para MQAM. [3]

Para que el efecto de la dispersión de la señal en el canal acústico no produzca una pérdida importante en la eficiencia espectral, el receptor tiene que ecualizar las señales recibidas en función de la respuesta del propio canal para posteriormente decodificar la señal. El uso de este tipo de técnicas aumenta la complejidad del módem así como el consumo de energía asociado. Algunas de estas técnicas son:

- Ecualización del canal acústico. La limitación del ancho de banda en el canal acústico hace que la señal transmitida se distorsione causando que el símbolo transmitido en ese momento se extienda e interfiera en símbolos posteriores. Esto se conoce como interferencia entre símbolos (*inter-symbol interference* o *ISI*) y al proceso de filtrado de la señal recibida con el fin de eliminar la interferencia entre símbolos producida por la respuesta del canal se le conoce como ecualización. La interferencia entre símbolos causada por el efecto multicamino en los canales

subacuáticos se puede suprimir insertando bandas de guarda temporales entre símbolos sucesivos. Esta técnica es ideal para modulaciones no-coherentes en la que no se requiere de un sincronismo de fase. En el caso de las modulaciones coherentes se transmite una secuencia de entrenamiento para estimar la respuesta del canal y se hace uso de un filtro adaptativo para equilibrar el efecto del mismo. Sin embargo, un error en la estimación del filtro puede llegar a generar errores a fases siguientes, siendo necesarios algoritmos de corrección.

- Modulaciones digitales de espectro ensanchado (*digital spread spectrum o DSS*).

Gracias a esta técnica se consigue que el espectro de la señal original (B) se ensanche sobre un ancho de banda mayor (W) con una relación $L = W/B$. Para que se realice la citada dispersión la señal original se multiplica por una señal pseudo-aleatoria de longitud L . Luego, el receptor deshace esta dispersión con la misma secuencia pseudo-aleatoria. Además, se puede conseguir comunicaciones simultáneas y sin colisiones de diferentes usuarios con esta técnica, asignando una secuencia pseudo-aleatoria única de condiciones óptimas de auto-correlación y correlación cruzada a cada uno de los usuarios del canal. Finalmente, la atenuación de la señal en función de la frecuencia se ve reducida debido a la propia estructura del receptor que utilizan este tipo de sistemas. No obstante, el principal inconveniente que tiene esta técnica es que la eficiencia espectral es escasa y no se superan los 0.5 bps/Hz.

- Modulaciones multi-portadora. La propagación multicamino provoca que al receptor lleguen distintas réplicas de la señal original con diferentes retardos y amplitudes. Esto es bastante significativo en el canal acústico pues la dispersión

temporal entre dichas réplicas es elevada. Para restringir esta dispersión, especialmente para valores altos, se emplean las modulaciones multi-portadora que usan una cierta cantidad de sub-portadoras poco espaciadas en frecuencia para llevar información en diferentes flujos de datos o canales. Se utiliza un esquema de modulación convencional para cada uno de ellos. Un ejemplo de este tipo de técnicas es la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*orthogonal frequency division multiplexing* u *OFDM*).

- Sistemas múltiple entrada / múltiple salida (*multiple-input multiple-output* o *MIMO*). Otra técnica para eludir la dispersión multicamino es el uso de distintos transmisores y receptores con el fin de explotar la diversidad espacial. Se envían diferentes copias de la misma información por diferentes canales independientes de forma que aumente la probabilidad de que se reciba correctamente el mensaje original. Se puede incrementar la velocidad de transmisión efectiva del sistema sacando provecho de los diferentes canales espaciales para emitir varios flujos de información.

11.3. Frecuencia portadora

Una vez aclaradas los diferentes tipos de modulaciones utilizadas en el medio subacuático, se puede observar como en cada una de ellas existe una onda portadora. Esta portadora debe tener una frecuencia cuidadosamente elegida para mejorar lo máximo posible las comunicaciones.

En el espectro radioeléctrico aéreo existen leyes que determinan las diferentes bandas de frecuencia a distintos tipos de servicios y compañía, según el CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias). En cambio en la acústica submarina aún no hay ningún organismo regulatorio que asigne las bandas de frecuencia. Esto resulta ventajoso ya que se puede elegir la frecuencia de la onda portadora en función de los requisitos necesarios. No obstante, probablemente en los próximos años se comience a controlar el uso del espectro en los océanos debido al creciente interés en las comunicaciones submarinas.

Es de interés, como ya se comentaba, que se establezca una serie de normas y protocolos que permitan regular las comunicaciones submarinas de manera que estas puedan ser realizadas sin que interfieran con las de terceros. Además, se podrían añadir una serie de protocolos que permitan interoperabilidad entre dispositivos.

12. Modelado del canal acústico submarino

La caracterización del canal acústico subacuático es fundamental en el diseño y desarrollo de comunicaciones inalámbricas. Sin embargo, hoy en día no existe un acuerdo general sobre el modelo de canal más apropiado para canales submarinos, ya que existen numerosas alternativas en la literatura técnica.

Se han obtenido distintos modelos de acuerdo a las aproximaciones realizadas (teoría de rayos, teoría de modos normales, integración espectral, etc.) que se denominan modelos geométricos, ya que precisan de un conocimiento exhausto del medio. También se les puede denominar modelos deterministas, pues no introducen la

dinámica del canal. Estos modelos tienen poca utilidad para el diseño de sistemas de comunicaciones en los que se necesita de un conocimiento estadístico del canal. Por este motivo, se han propuesto modelos mixtos (geométricos y estadísticos) basados en el trazado de rayos, a la que se añade la dinámica del canal a través de algunas distribuciones estadísticas.

Otra solución posible para el modelado es la estadística, utilizada también en el canal radio para las comunicaciones móviles. La transmisión de banda estrecha se ve perturbada por una SNR variante en el canal, que produce multicamino con desvanecimientos con distribución plana en frecuencia. Se supone que el canal es plano en frecuencia (todas las componentes en frecuencia de una señal transmitida son atenuadas o amplificadas de la misma manera en el canal) cuando el ancho de banda de coherencia es grande comparado con el ancho de banda de la señal. En el dominio del tiempo, esto significa que la duración del símbolo modulado es mucho mayor que la dispersión de retardo de los caminos de propagación del canal.

Al igual que ocurre en el entorno de radio móvil, los modelos estadísticos para el canal subacuático proponen un modelo de ecos cuyas distribuciones de llegadas y atenuación se obtienen a través de medidas. Para modelar adecuadamente el desvanecimiento plano en aplicaciones de banda estrecha se acude frecuentemente a distribuciones estadísticas tales como Rayleigh, Rice o Nakagami. Las distribuciones de Rice y Nakagami son las que presentan una mayor similitud.

La distribución Ricean shadowed (RS) caracteriza el canal acústico desde un punto de vista estadístico y físico, lo que se traduce en ventajas teóricas y prácticas si se compara con otros modelos propuestos.

Para frecuencias de algunos kilohercios las longitudes de ondas acústicas son de fracciones de metro, de manera que se pueden estudiar como microondas acústicas, lo que permite el uso de la óptica geométrica para modelar su propagación.

12.1. Modulación adaptativa y codificación

Las técnicas de modulación y codificación que no se adaptan a las condiciones de desvanecimiento del canal, necesitan un margen fijo de conexión para mantener la realización aceptable cuando el canal es de baja calidad. Por ello, estos sistemas son desarrollados para las peores condiciones del canal que, en muchas ocasiones, da como resultado una utilización ineficiente del canal. En cambio, las técnicas de modulación y codificación adaptativas permiten realizar sistemas de transmisión robustos y espectralmente eficientes cuando las características del canal son variantes en el tiempo. La característica principal de estas técnicas radica en estimar la respuesta del canal en el receptor y enviar dicha estimación al transmisor mediante un canal de retorno para que el esquema de transmisión pueda adaptarse a las variaciones del canal. Esta estrategia adaptativa usa las condiciones favorables del canal para enviar tasas de datos mayores o disminuir la potencia transmitida y, de igual manera, reducir la tasa de datos enviada o incrementar la potencia cuando el canal degrada su calidad. Esto permite optimizar la eficiencia de energía y elevar la tasa media de transmisión sobre canales con desvanecimiento.

En un canal de comunicaciones la información enviada se ve afectada por desvanecimientos y provoca que el nivel de señal se encuentre, durante intervalos más

o menos largos, por debajo del nivel mínimo de umbral que permite la utilización de un servicio. Por ello, no es posible recuperar la información sin errores.

La codificación del canal consiste en una serie de transformaciones de la señal transmitida con el objetivo de encontrar y corregir los bits erróneos. El propósito principal es disminuir la probabilidad de error o la SNR necesaria para asegurar una cierta tasa de error.

En el teorema de Shannon se predice la posibilidad de reducir, simultáneamente, energía y ancho de banda mediante la codificación del canal. No obstante, los esquemas de corrección de errores habituales generan una ganancia de codificación a expensas de la reducción de la tasa de datos o el incremento del ancho de banda.

Existen ciertas limitaciones prácticas que cuestionan si es beneficioso o no el uso de técnicas de modulación adaptativa y codificación. Es necesaria la existencia de un canal de realimentación entre el transmisor y el receptor que puede no ser factible en algunos sistemas. El rendimiento de la técnica adaptativa es muy pobre si el canal cambia más rápido de lo que puede ser fiablemente estimado y realimentado al transmisor. Normalmente, se tienen diferentes cambios del canal con distintas escalas de tiempo, de forma que es posible que la modulación adaptativa y codificación sólo puedan compensar las variaciones del canal más lentas.

En el caso particular de las comunicaciones subacuáticas, se tiene que estudiar la escala de tiempo en las que ocurren las variaciones del canal acústico submarino, relacionadas con la frecuencia Doppler. Las limitaciones de hardware que incluye la

implementación de la técnica adaptativa permiten saber a qué ritmo el transmisor varía su tasa de transmisión y limitar las posibles ganancias.

12.1.1 Técnicas adaptativas

Las variaciones de SNR en el canal causan que cualquier constelación de la modulación y código del canal en el codificador sólo pueda garantizar una transmisión fiable en términos de BER para una fracción del tiempo y en el periodo de tiempo restante el sistema se bloquea.

Si se reduce la eficiencia espectral del sistema se consigue una BER baja para valores SNR más bajos del canal. Por tanto, si se disminuye la probabilidad de bloqueo se reduce la velocidad binaria de información de un sistema de comunicaciones inalámbricas. En un sistema tradicional haciendo uso de un codificador/descodificador simple no se pueden conseguir una probabilidad de bloqueo baja, eficiencia espectral alta y BER baja al mismo tiempo.

La transmisión adaptativa es un método que ayuda a eliminar la fluctuante calidad del canal. Un esquema óptimo de potencia y tasa de transmisión variable sumado a técnicas de diversidad en recepción significa un aumento de la capacidad del canal.

Los sistemas adaptativos pueden combinarse con otras técnicas tales como MIMO con el fin de elevar la tasa de transmisión y garantizar una BER objetivo.

13. Diversidad

El canal acústico subacuático, como ya hemos comprobado, tiene un comportamiento dinámico causado por el efecto multitrayecto y el ensanchamiento Doppler. Esto hace que se termine degradando seriamente el sistema de comunicaciones inalámbricas en términos de probabilidad de error. La solución trivial para el problema de desvanecimiento podría ser la de añadir un margen en el transmisor, pero no resulta eficiente. Una solución alternativa son las técnicas de diversidad, que eluden esta degradación a un coste relativamente bajo. Además, pueden implementarse de varias formas tanto en transmisión como en recepción.

La diversidad es un concepto muy conocido ya que la mayoría de los sistemas de comunicaciones actuales y emergentes lo utilizan contra los efectos del desvanecimiento multitrayecto. Las técnicas de diversidad aprovechan la naturaleza aleatoria del canal que es causada por el comportamiento estadístico del desvanecimiento. La señal se descompone en réplicas de la señal original y se transmite por distintos canales. Así, las diferentes copias recibidas son combinadas en recepción y enviadas a un circuito de demodulación.

Como en los canales independientes de la señal existen pocas posibilidades de experimentar desvanecimientos profundos simultáneamente, las técnicas de diversidad pretenden enviar los mismos datos sobre dichos canales independientes combinados de forma que se disminuya el desvanecimiento de la señal. Algunas de las formas de conseguir diversidad en los sistemas de comunicaciones inalámbricas son:

- Diversidad en frecuencia: Se transmite la misma información de la señal a través de distintas frecuencias portadoras separadas por el ancho de banda de coherencia del canal, de forma que las diferentes copias de la señal tengan desvanecimientos independientes. Este tipo de técnica requiere una potencia transmitida extra para poder transmitir la señal sobre múltiples bandas de frecuencia. Se obtendrá un rendimiento espectral muy pequeño y poco rendimiento energético.
- Diversidad temporal: Se transmite la misma señal en distintos periodos de tiempo, siendo la diferencia de tiempo mayor que el tiempo de coherencia del canal (el inverso del ensanchamiento Doppler del canal). Este tipo de técnica no necesita aumento de la potencia transmitida, aunque en la retransmisión de las señales se reduce la velocidad de transmisión efectiva y produce una considerable latencia a causa de que la separación temporal entre transmisiones de las réplicas debe ser mayor que la duración media de los desvanecimientos. Esto también se puede conseguir mediante una codificación combinada con entrelazado útil para canales con desvanecimientos en los que los errores asociados al demodulador se producen, normalmente, a ráfagas que corresponden a las veces en que el desvanecimiento del canal es profundo.
- Diversidad espacial: Se basa en el uso de varias antenas. Es la técnica de diversidad más utilizada contra los desvanecimientos en las comunicaciones inalámbricas. Este tipo de técnica precisa de antenas lo suficientemente separadas entre sí para que los canales equivalentes no se vean interferidos entre sí, sin un incremento en la potencia transmitida o el ancho de banda. Por ello, las amplitudes de los desvanecimientos correspondientes a cada pareja de antenas transmisora y

receptora sean, aproximadamente, independientes. La probabilidad de que todos los canales estén atenuados de manera simultánea es baja. Además, con esta redundancia espacial se consigue mejoras en las prestaciones del canal de comunicaciones. Sin embargo, se produce un aumento considerable de la complejidad del sistema.

13.1. Diversidad espacial en recepción

La diversidad espacial en recepción se clasifica de acuerdo a la forma de combinación utilizada en el receptor. Existen cuatro técnicas principales que dependen de las restricciones por complejidad del sistema de comunicaciones y de la cantidad de información del estado del canal disponible en el receptor. Estas técnicas son:

- Combinación de relación máxima (*MRC Maximum Ratio Combining*): Utiliza una combinación coherente lineal de las señales recibidas en cada una de las antenas con el objetivo de que la SNR a la salida sea máxima. Para conseguirlo, la señal que proviene de cada canal se pondera de acuerdo a su SNR y luego se suman todas las señales. Si no existen interferencias, MRC es el esquema de combinación óptimo a pesar de la complejidad.

El método de combinación de razón máxima genera una SNR a la salida igual a la suma ponderada de las SNR individuales. Esta técnica tiene la capacidad de producir una señal con una SNR aceptable aun cuando ninguna de las señales individuales la posea. Esta técnica proporciona la mejor reducción estadística de desvanecimiento de las técnicas de diversidad de combinación lineal.

- Combinación por ganancia constante (*EGC Equal Gain Combining*): En el caso de que no se disponga de la capacidad de ponderación variable de la técnica descrita anteriormente, todos los pesos se preestablecen como unitarios pero las señales son alineadas en fase, consiguiendo la diversidad por EGC. En la aplicación de esta técnica no es necesario la estimación de las amplitudes de los desvanecimientos del canal, por lo que presenta una complejidad menor en relación al esquema óptimo MRC.
- Combinación por selección (*SC Selection Combining*): A partir de las diferentes ramas, se selecciona la rama con mayor SNR. Se trata de una de las técnicas más sencillas puesto que sólo procesa una de las ramas de la diversidad. En su forma convencional, el combinador SC elige el canal con la SNR mayor. En caso que todas las ramas tengan la misma SNR media, la amplitud de la señal de salida del combinador simplemente es la magnitud de la señal más fuerte.
- Combinación por conmutación (*Switched Combining*): Método bastante similar a la diversidad por selección, aunque en este caso, en lugar de usar la mejor de las señales, los canales son observados en una cierta secuencia hasta encontrar uno con una envolvente superior al nivel umbral preestablecido. Este canal se mantiene hasta que cae por debajo del umbral y el proceso de búsqueda se reinicia. Las estadísticas de desvanecimiento son un poco inferiores a las obtenidas por SC, aunque su implementación es más sencilla ya que sólo requiere de un receptor.

La búsqueda del diseño adecuado para el sistema se consigue con un estudio exhaustivo de las combinaciones de los esquemas de modulación, codificación y diversidad.

13.2. Técnica de diversidad MRC

El método de combinación de razón máxima genera una SNR a la salida igual a la suma ponderada de las SNR individuales. Esta técnica tiene la capacidad de producir una señal con una SNR aceptable aun cuando ninguna de las señales individuales la posea. Esta técnica proporciona la mejor reducción estadística de desvanecimiento de las técnicas de diversidad de combinación lineal.

14. Módems Acústicos

Una vez justificado el uso de las ondas acústicas en el medio subacuático, corresponde realizar un estudio profundo de los módems acústicos que existen en el mercado y aquellos presentados por la comunidad científica en las diferentes publicaciones.

Las mayores dificultades a las que se ven sometidos este tipos de sistemas son: la restricción energética de los nodos inalámbricos debido a que no se dispone de una fuente de energía disponible, limitándose a la energía que les es capaz de suministrar las baterías; y el ancho de banda utilizable que se ve limitado por las características de señal, la propagación multicamino y el ancho de banda restrictivo de los transductores piezoeléctricos utilizados para la conversión de la onda eléctrica en acústica.

La eficiencia espectral ($\eta_{spectral}$) es el concepto que analiza cuantitativamente el aprovechamiento, por parte de un sistema de comunicaciones, del ancho de banda disponible. Se relaciona la velocidad binaria de transmisión y el ancho de banda requerido.

$$\eta_{spectral} = \frac{V_{binaria}(bps)}{Ancho_{Banda}(Hz)}$$

En una red inalámbrica, un nodo puede encontrarse en diferentes estados:

- Transmisión (TX): El módem acústico transmite información por el canal mediante la etapa amplificadora de potencia que excita el transductor instalado. Este estado supone el mayor consumo energético.
- Recepción (RX): En este estado el módem escucha el canal con el fin de captar y decodificar los datos recibidos.
- Activo: La unidad de procesamiento se encuentra realizando alguna actividad sin que se utilice la interfaz inalámbrica (por ejemplo, el procesado de la información).
- Midiendo: En una red inalámbrica de sensores los nodos de la red normalmente incluyen sensores de distintas magnitudes de los que se recoge la información de las medidas realizadas, que posteriormente son enviadas de manera inalámbrica. Por tanto, durante este estado, los sensores estarán activos.
- Inactivo: Estado en el que el consumo de potencia es el menor de todos los estados expuestos anteriormente. Los módems actuales utilizan los modos de funcionamiento de ultra-bajo consumo de las unidades de procesamiento actuales

con el objetivo de conseguir estas prestaciones. No obstante, en dicho estado el módem puede transmitir ni recibir información alguna mediante el canal inalámbrico. Se requiere de una adecuada sincronización de la red para conseguir una conectividad apta.

- Espera: Estos sistemas permiten un consumo de energía de las redes casi ideal, pero requieren de un sub-sistema que esté continuamente activo para estar a la espera de nuevos mensajes, lo que se traduce en un consumo energético crítico.

Este estado se considera como una relación entre el bajo consumo del modo inactivo del nodo (bajo consumo) y la capacidad de respuesta de la red ante un estímulo que otorga el estado de recepción. Por ello, el estado de espera, normalmente, sustituye al estado inactivo cuando se necesita de una capacidad de comunicación permanente, aunque no reemplaza al estado de recepción pues el estado de espera sólo pretende reactivar el nodo a partir de una señal muy sencilla que no sirve para transmitir datos de medidas.

14.1. Potencia Normalizada

El módem ideal es aquel que posee un menor ancho de banda, que tiene una mayor velocidad de transmisión o aquel que consume menor potencia. Se define como potencia normalizada ($P_{Normalizada}$):

$$P_{Normalizada} = \frac{P_{nodo}(W)}{Alcance \cdot Eficiencia_{espectral} \left(\frac{bps}{Hz} \right)}$$

- El consumo de potencia media del nodo inalámbrico (P_{nodo}). La energía es uno de los factores que limitan seriamente a los sistemas inalámbricos subacuáticos, por lo que cuanto menor sea la potencia consumida por el nodo mejor será la solución que cumpla con los requisitos del sistema. En el cálculo de la potencia media se ponderan las distintas potencias consumidas en los diferentes estados en base a las posibilidades de permanecer en un estado u otro.

$$P_{nodo}(W) = ATX \cdot PTX + ARX \cdot PRX + A_{espera} \cdot P_{espera}(W)$$

$$ATX + ARX + A_{espera} = 1$$

$$0 \leq ATX, ARX, A_{espera} \leq 1$$

El consumo en el estado de espera de los diferentes módems merece especial atención. No obstante, no todos los módems pueden permanecer en el estado de espera. En tal caso, se considera el protocolo STEM, en el que se considera que el sistema está un 25% del tiempo en el modo de recepción y el resto en un modo inactivo.

$$P_{espera}(\text{sin modulo espera}) = 25\% \cdot PRX + 75\% \cdot P_{inactivo}$$

- Distancia máxima alcanzada. Cuando hablamos de eficiencia energética no nos referimos únicamente a la potencia de funcionamiento del nodo, sino que también se tiene en cuenta la distancia máxima que se puede alcanzar con dicha potencia consumida. De manera general, cuanto mayor es la distancia que se quiere cubrir mayor es la potencia consumida. Así, el módem con mayor eficiencia energética es aquél que, con la menor potencia media consumida, consiga alcanzar la mayor distancia.

- La eficiencia espectral. El óptimo aprovechamiento del escaso ancho de banda disponible es esencial en el momento de realizar un análisis cuantitativo de las prestaciones de un módem. El parámetro que mejor describe dicho aprovechamiento es la eficiencia espectral. Por tanto, según lo explicado, el módem es más eficiente cuanto mayor velocidad de transmisión se alcance con el menor ancho de banda posible.

El módem que mejor se ajusta a los requisitos enunciados para las redes inalámbricas subacuáticas es aquél cuya potencia normalizada sea menor. Este parámetro dependerá del porcentaje de tiempo que el nodo permanece en los distintos ciclos de trabajo del nodo.

$$P_{Normalizada}(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{Normalizada} \left(\frac{W}{m} \frac{Hz}{bps} \right)}{1 \left(\frac{W}{m} \frac{Hz}{bps} \right)} \right)$$

14.2. Características de un Módem Acústico

Teniendo en cuenta las dificultades presentes en la tecnología inalámbrica de la acústica subacuática, las características fundamentales que se deben perseguir a la hora de diseñar un módem acústico son las siguientes:

- Consumo de energía reducido. Las unidades de procesamiento actuales permiten reducir el consumo de los sistemas del orden de μW en el estado de inactividad. También es de interés disminuir el consumo a un valor inferior de 1 vatio en los modos activos, especialmente en el de transmisión, para que los sistemas puedan aumentar su vida útil.

- Alcance moderado. No es necesario que el alcance de los nodos sea de kilómetros, sino de cientos de metros.
- Eficiencia espectral elevada. Se pretende alcanzar la mayor tasa de transferencia posible, aprovechando al máximo el espectro.
- Portabilidad. Se debe considerar la posibilidad de que los módem se puedan conectar con los distintos sensores, actuadores, interfaces analógicas, digitales y de comunicación estándar con periféricos. Además, los módem deben poder de ser capaz de interactuar con otros sistemas de computación.
- Fácil integración. El módem desarrollado tiene que gestionar de manera autónoma las tareas relacionadas con la comunicación acústica subacuática.
- Coste económico reducido. Como la principal aplicación de los módem subacuáticos son su integración en redes con un elevado número de nodos, el precio de estos dispositivos es primordial para el despliegue de una red definitiva.

La arquitectura debe ser lo suficientemente flexible de manera que se consiga un dispositivo final equilibrado en función de las características perseguidas. No obstante, la optimización no es una tarea fácil ya que la mayoría de los objetivos expuestos previamente entran en conflicto directo.

14.3. Arquitectura de un Módem Acústico de una Red Acústica de Sensores

La arquitectura fundamental de un nodo de comunicaciones inalámbricas está formada una serie de bloques que explicaremos con detalle en los siguientes sub apartados.

14.3.1. Transductor Piezoeléctrico

Para generar ondas acústicas a partir de señales eléctricas, se pueden utilizar micrófonos y altavoces con una baja eficiencia. Sin embargo, los resonadores piezoeléctricos son capaces de realizar dicha conversión con mayor eficiencia.

La piezoelectricidad es un fenómeno presentado por determinados materiales con poseen una estructura cristalina, de manera que al ser sometidos a una tensión mecánica aparecen en su superficie una diferencia de potencial y cargas eléctricas debido a una polarización eléctrica en su masa.

Este fenómeno también se produce a la inversa, es decir, estos materiales se deforman al ser sometidos a un campo eléctrico. Esta deformación es reversible y los cristales recuperan su forma original al desaparecer el campo aplicado y vice-versa. Por ello, los materiales piezoeléctricos son perfectos para la conversión entre energía mecánica-acústica y eléctrica.

Entre los transductores piezoeléctricos, es habitual encontrar hidrófonos en los módems acústicos pues su respuesta plana a lo largo de un gran ancho de banda. Pero como inconveniente está su precio elevado (del orden de cientos o miles de dólares), lo que hace inviable desplegar una RAS con decenas o cientos de nodos.

14.3.2. Acondicionamiento de la Señal

Las ondas acústicas, como ya hemos aclarado previamente, experimentan pérdidas en el canal subacuático, por lo que es necesario amplificar la señal, ya que de

lo contrario el rango de comunicación se reduciría y no sería factible el desarrollo de redes inalámbricas subacuáticas.

El proceso de amplificación es necesario en ambos extremos de la comunicación:

- El nivel de intensidad de la onda transmitida debe ser tal que la onda recibida en el receptor sea superior al ruido existente. La potencia de la onda se debe transmitir de manera eficiente desde las baterías del módem, evitando cualquier tipo de pérdida.
- Previamente a la decodificación de la señal, ésta ha de ser acondicionada. Se debe amplificar el nivel hasta un umbral en el que el decodificador pueda extraer la señal emitida. Además se tiene que filtrar el ruido existente fuera de la banda de funcionamiento. De esta manera se optimiza el proceso de decodificación y se aumenta la relación señal-ruido.

Amplificador de Potencia en Transmisión

Los amplificadores empleados en los transmisores de los módems acústicos, normalmente, responden a una de las categorías siguientes:

- Amplificador clase B. Aunque este tipo de amplificadores únicamente necesitan de un transistor de potencia, son extremadamente ineficientes ya que únicamente operan con valores positivos de la señal.
- Amplificadores clase AB. Estos amplificadores suponen una solución al problema planteado en el apartado anterior. No obstante, gran cantidad de energía se

malgasta cuando los transistores de la etapa de salida se conectan de manera simultánea.

- Amplificadores clase D. Estos amplificadores reducen el coste y aumentan la eficiencia energética, pero problemas como la interferencia electromagnética causada por la conmutación de alta frecuencia, las redes adicionales de filtrado y la limitación en frecuencia.
- Uso de transformadores. Esta opción consigue aumentar la tensión aplicada al transductor, pero su eficiencia es muy baja.

Una solución alternativa y de bastante interés es la creación y aplicación de amplificadores de alta eficiencia personalizados, como puede ser una combinación de un amplificador clase AB, con alta linealidad, y un amplificador de clase D, de alta eficiencia.

El objetivo de esta etapa es optimizar la eficiencia y generar ondas acústicas que se puedan decodificar a cientos de metros de distancia.

Pre-Amplificador en Recepción

Una vez recibida la onda con un nivel suficiente, esta tiene que ser pre-procesada en el receptor antes de ser decodificada. Se pretende disminuir la probabilidad de error de esta decodificación y aumentar, por ende, la relación señal-ruido en el receptor. Este pre-amplificador debe conseguir dos objetivos: maximizar el nivel de la señal y minimizar el nivel de ruido.

Para ello, se debe introducir una etapa de amplificación que aumente la ganancia efectiva del nivel de presión acústica recibido, convertida en una señal eléctrica de cierto nivel por el transductor. Además, se debe considerar la impedancia del transductor, siendo necesario diseñar una red de adaptación adicional. El ruido fuera de las frecuencias de interés debe ser eliminado. Para ello, este bloque cuenta con un filtro paso-banda.

14.3.3. Unidad de procesamiento y Control

En el mercado hay disponible una gran variedad de microcontroladores que facilitan la intercomunicación entre diferentes dispositivos y, en el caso que nos interesa, el desarrollo de las redes inalámbricas de sensores acústicos. Los nodos de una RAS requieren de interfaces analógicas, temporizadores, interfaces con buses de datos entre otras, así como unidades de procesamiento de la señal específicas. En este campo sobresalen los microcontroladores con unidad aritmética de coma fija, coma flotante o aquellos que poseen unidad de Multiplicación y Acumulación (MAC), operación de gran importancia en algoritmos de demodulación o filtrado.

Los Procesadores Digitales de la Señal (*DSP*) son la base de múltiples trabajos y su principal ventaja es la capacidad computacional con la que cuentan este tipo de controladores, fundamentales para el procesado de señales a tiempo real. No obstante, estos dispositivos necesitan de una potencia muy elevada.

Por otra parte, nos encontramos ante la utilización de dispositivos de lógica programable como las FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Estos dispositivos hacen posible la programación de dispositivos con una lógica personalizable y cuentan con un

hardware que se adapta perfectamente a cualquier aplicación. Sin embargo, esta interesante opción presenta la problemática de la reducción de la flexibilidad, un alto coste y un elevado consumo energético.

Las funciones básicas de las que se encarga realizar este bloque son:

- Modulación. La modulación, como ya sabemos, es el proceso que permite trasladar una señal digital en banda base de frecuencia central igual a 0 a una banda de frecuencia adecuada para la transmisión de la señal en el canal. En el receptor se realiza la operación inversa, la demodulación de la señal, con la que se obtiene la información enviada originalmente. La elección de un esquema de modulación acorde a la aplicación requerida es fundamental. Dos variables críticas en la tecnología de los módems acústicos están directamente relacionadas con esta selección:
 - ✓ La eficiencia espectral.
 - ✓ La complejidad del módem.
- Ecuilización. La velocidad de propagación del sonido en el agua, 1500 m/s, es bastante inferior a la velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío, 3×10^8 m/s. Como ya hemos explicado anteriormente, dicha velocidad puede variar de acuerdo a múltiples factores, como por ejemplo la profundidad o la temperatura. Esto sumado a la reflexión de la onda acústica en el fondo y en la superficie y el movimiento relativo entre el emisor y el receptor dan lugar a dos efectos que afectan a los módem subacuáticos: el efecto multitrayecto y el efecto Doppler, los cuales distorsionan la onda y provocan errores en la comunicación. Se disminuye la

velocidad de transmisión y, por ende, la eficiencia espectral. Por ello, se debe recurrir a mecanismos que ayuden a eliminar estos efectos que dificultan la comunicación acústica.

- Otros algoritmos. Los algoritmos de sincronismos también son de especial relevancia en la comunicación y se deben realizar en la unidad de procesamiento. El decodificador muestrea los símbolos en el momento adecuado, disminuyendo la interferencia entre símbolos contiguos así como los errores de decodificación (sincronismo de símbolo). Se tiene que localizar unidades de información reconocibles y procesables en las señales detectadas en el canal (sincronismo de trama) y se debe ser tolerante ante variaciones de fase y frecuencia (sincronismo de fase y de frecuencia).

14.3.4. Sincronización

Uno de los mayores retos a los que se enfrentan las redes inalámbricas de sensores subacuáticos es disminuir el consumo energético de sus nodos de forma que sea factible el desarrollo de redes cuyo mantenimiento no suponga una restricción, a causa del reemplazo de baterías.

Entre los modos de funcionamiento de un microcontrolador está el modo de inactividad, en el que se reduce el consumo al mínimo ya que se desconecta la unidad central de procesamiento (CPU) y el máximo número de periféricos posibles. En un funcionamiento normal, estos dispositivos suelen poder reactivarse tras un reinicio del sistema, la variación de uno ó varios puertos de entrada o gracias a un temporizador. Sin embargo, mientras el nodo permanezca inactivo se debe tener en cuenta que no se

puede realizar actividad alguna lo que implica no recibir ni enviar mensajes por la interfaz inalámbrica. Por ello, se requiere de un método para reactivar al microcontrolador y la actividad normal del módem.

Las estrategias para activar un nodo se agrupan en dos categorías: síncronas o asíncronas. Las estrategias de activación síncronas se basan en la sincronización y en el concepto de reloj global virtual. Por otro lado, las estrategias asíncronas en la detección de estímulos externos.

La finalidad de este bloque es disminuir el tiempo activo del nodo al mínimo indispensable para que el consumo de energía sea el adecuado.

14.3.5. Sistema de Gestión de Energía

La energía disponible es un elemento finito y crítico. Por esta razón, se debe prestar especial atención a la hora de elegir las estrategias adecuadas para un diseño que gestione la energía de manera eficiente. El sistema de gestión de energía tiene la tarea de alimentar adecuadamente todos los bloques descritos previamente.

El consumo estático se debe reducir lo máximo posible. Esto es posible gracias a mecanismos capaces de desactivar los diferentes bloques de manera individual o por unidades funcionales. Los bloques de control tienen que ser capaces de ajustar su funcionamiento y consumo energético a las necesidades computacionales de las tareas a realizar. Para ello, existen unidades avanzadas de gestión de consumo de los sistemas basados en procesadores. De esta manera se consigue regular tanto la frecuencia de funcionamiento como la actividad de los módulos dentro del microcontrolador en relación de la demanda.

Este bloque debe presentar una flexibilidad tal que permita la incorporación de fuentes de energía renovables. Para ello, es conveniente que se incorpore una circuitería adicional capaz de recolectar energía de fuentes ambientales renovables como solar, eólica, etc.

14.3.6. Interfaz de Usuario y Programación

Un módem, normalmente, no se considera un dispositivo autónomo y aislado que solamente interactúa con sus sensores y el resto de nodos de la red inalámbrica. Los datos obtenidos tienen que poder ser extraídos de alguna forma y, por otro lado, un usuario externo debe ser capaz de comunicarse con el módem y la red. Por ello, existe la necesidad de introducir una interfaz cableada, independiente de la inalámbrica, para que sea posible la interacción del módem con un elemento externo a la red.

Esta conexión puede ser local (UART, USB, JTAG de programación). ES conveniente que se pudiera realizar esta misma funcionalidad de manera remota mediante Internet, gracias a una conectividad ethernet.

15. Aplicaciones y conclusiones

En la actualidad los medios más utilizados en las comunicaciones submarinas son el cable y los módems acústicos. El cable presenta una solución ideal, si las condiciones de la zona lo permiten, para cubrir distancias relativamente cortas ya que son fiables, rápidos y seguros. No obstante, el cable no es adecuado para transmitir

información a largas distancias o cuando existe riesgo de arrastre. En estos casos, el módem acústico ofrece una alternativa de gran calidad.

Las tecnologías inalámbricas tales como poder consultar el correo electrónico y los mensajes en un smartphone, conectar un portátil a una red Wi-Fi o escuchar música con auriculares vía Bluetooth se han convertido en actividades cotidianas en la vida de prácticamente cualquier ciudadano. Sin embargo, este tipo de comunicaciones inalámbricas no son posibles aún bajo el agua. A pesar de que un teléfono, sellado en una bolsa a prueba de agua, pueda ser capaz de operar a unos pocos metros de profundidad, una vez que la superficie esté lo suficientemente lejos, la señal se pierde por completo. Lo mismo ocurre con otros equipos de comunicación, como la radio analógica VHF o simplemente el Wi-Fi. Por ello, no es factible el uso ondas electromagnéticas para comunicaciones subacuáticas como lo hacemos en tierra.

Actualmente existe gran interés en las comunicaciones inalámbricas en los océanos. Por ejemplo en la prevención del fraude en la pesca: sensores submarinos desplegados en zonas marinas protegidas pudieran detectar la presencia de embarcaciones no autorizadas, rastrear su movimiento y de forma inalámbrica comunicarlo a las autoridades para su intervención inmediata. En las zonas de perforación submarina de petróleo, sensores inalámbricos serían capaces de detectar accidentes como derrames o fallos de infraestructura e informar de manera “instantánea”.

Algunos sensores de este tipo ya existen hoy en día pero, como ya comentamos en un principio, son operados principalmente por medio de cables submarinos a prueba de agua que son muy costosos de obtener, implementar y mantener, limitando

la extensión del sistema. Las comunicaciones inalámbricas submarinas contribuirían a la teledetección y a la telemetría en general, al reducir enormemente los costes de infraestructura e implementación, logrando así el aumento de la extensión y la flexibilidad de los sistemas de detección submarinos. Este beneficio sería entonces de aplicación en la vigilancia del litoral, la ciencia del agua y la industria marítima.

Como ya se ha visto a lo largo del trabajo realizado, las ondas de radio no pueden ser empleadas para las comunicaciones subacuáticas, por lo que se ha recurrido al uso de otro medio muy natural: las ondas de presión, es decir, el sonido. De hecho, muchas especies de animales marinos hacen uso del sonido para la comunicación y para la localización de presas. El sonido, como hemos podido comprobar, tiene propiedades deseables bajo el agua y se propaga a grandes distancias. Esto ayudaría, entre muchas otras aplicaciones, a que los largos oleoductos y gasoductos submarinos y extensas áreas marinas protegidas pudieran ser cubiertos con sólo unos sensores. El sonido es suficientemente compatible con las comunicaciones digitales como para poder transferir la cantidad de datos típicamente requerida por las aplicaciones submarinas, por lo que es posible comunicarse mediante la extensión de técnicas bien desarrolladas de comunicación digital.

El sonido, como también hemos podido comprobar, tiene varios inconvenientes. Se propaga mucho más lento las ondas electromagnéticas en el aire, pes los patrones de propagación en el agua son complejos y están sujetos a muchos ecos y a la reverberación cuya intensidad depende en gran medida de la ubicación en el planeta, que varía a diario e incluso de manera estacional. Esto requiere un procesamiento de señal complejo con el fin de extraer un mensaje descifrable. La

velocidad nominal a la que pueden ser transferidos los datos, actualmente, es a lo sumo de unos pocos kilobits por segundo, 10.000 veces más lento que los sistemas ADSL, y más lentamente incluso que los módems de línea telefónica utilizados en los años 90.

En estas condiciones, donde la calidad de las comunicaciones varía considerablemente con el tiempo, el desarrollo de una red submarina autónoma y auto-organizada requiere resolver múltiples dificultades. Entre estos problemas se encuentra la heterogeneidad. Una red típica puede contener nodos fijos y nodos móviles, llamados Vehículos Submarinos Autónomos o AUV (*Automatic Underwater Vehicle*), que pueden estar densamente desplegados o escasamente desplegados. Los componentes de la red deben ser suficientemente autónomos como para ser capaces de detectar a sus vecinos y buscar su colaboración cuando detecten datos que han de ser transferidos a un destino lejano que no esté dentro del alcance del remitente inicial. La red debe estar preparada para reaccionar ante circunstancias específicas, como la detección de una intrusión o un evento peligroso para el medio ambiente y dar prioridad a la transmisión de los datos. Los nodos móviles, en el caso de estar presentes, deben optimizar su trayectoria para llevar a cabo su propia misión y favorecer el flujo de las comunicaciones en la red. Todos los nodos deben ser capaces de adaptarse a una calidad de comunicación propensa a errores y muy variable en el tiempo.

Un paso a conseguir en la comunicación y las redes submarinas es la capacidad de utilizar las comunicaciones para coordinar en tiempo real un grupo de vehículos submarinos autónomos de manera que se mantengan en formación para que

colaboren en una misión común o simplemente ayuden a la navegación y eviten obstáculos y colisiones.

Otro avance tecnológico hace referencia a los vehículos operados a distancia (ROV). Un ROV (*Remote Operated Vehicle*) es un robot submarino no tripulado y conectado a un barco en la superficie por medio de un cable largo, por el que pasan la energía y las órdenes enviadas mediante un mando a distancia. A través del cable se transmiten también los datos de las cámaras fotográficas del ROV, los datos de los sensores y de los sonares al centro de control del barco de la superficie. Estos sistemas son muy versátiles, pero también muy costosos. El cable puede limitar en gran medida la maniobrabilidad del vehículo. Por ello, una solución fiable para poder dirigir un ROV de forma inalámbrica a una distancia de hasta 100 metros son el uso de las comunicaciones acústicas. Esto supondría un gran avance para la industria y autoridades marítimas.

Investigadores de la Universidad de Buffalo, están desarrollando una manera de realizar comunicaciones de datos de manera inalámbrica bajo el agua, en concreto, el estudio se basa en conseguir una infraestructura común (framework) para convertir ondas acústicas en ondas de radiofrecuencia estándar y viceversa. Recientemente han estado realizando pruebas de un sistema piloto en el Lago Erie, al sur del Buffalo (Estado de Nueva York). Las pruebas consistieron en sumergir diversos sensores de 18 Kilogramos en el agua, para luego tratar de establecer comunicación inalámbrica con ellos desde un barco a través de un ordenador portátil. La prueba, que resultó un éxito, consistía en transmitir un comando desde el portátil recibiendo, unos segundos más tarde, la respuesta oportuna procedente del sensor.

Actualmente la tecnología de comunicación submarina, como la usada por la Armada Española o el Centro Tecnológico Naval y del Mar (Cartagena), se basa en el uso de ondas acústicas para la transmisión de datos. El proyecto desarrollado por el equipo de investigación, comandado por el profesor Tommaso Melodia, tiene como objetivo, servirse de la tecnología acústica de comunicación submarina, para desplegar una red de nodos bajo el agua y, mediante equipos RF especiales ubicados en superficie (boyas o similar), realizar una conversión de los datos para adaptarlos a las bandas de radiofrecuencia para transmisión de datos de manera “aérea”. Una vez convertidos, se realizaría la transmisión de los datos a la estación base más cercana mediante el uso de antenas o vía satélite.

En definitiva, se trata de crear una red submarina con pasarelas para interactuar con las diversas redes inalámbricas que tenemos desplegadas sobre la superficie, de manera que los datos recogidos por sensores desplegados por los océanos, se transmitan a través de la red submarina, para luego propagarse por las redes Wireless actuales (Internet) siendo accesibles, a un gran número de usuarios a nivel mundial.

Bibliografía y Webgrafía

- [1] Sánchez María, Antonio María. *Sistema de comunicación acústica para redes de sensores inalámbricas subacuáticas en aguas someras*. Octubre 2013.
- [2] Clemente Medina, María del Carmen. *Modulación adaptativa y diversidad en canales de comunicaciones subacuáticas*. Ingeniería de telecomunicación. Málaga 2013.
- [3] López Revuelta, Álvaro. *Modelado de la propagación acústica submarina para comunicaciones PtP*. Teoría de la Señal y Comunicaciones. Asturias 2014.
- [4] https://es.wikipedia.org/wiki/Onda_esf%C3%A9rica
- [5] http://www.profesorenlinea.cl/fisica/Efecto_Doppler_Formulas.html
- [6] <https://sltecnologia.wikispaces.com/La+Modulaci%C3%B3n>
- [7] <http://sbcnews.go.com/Technology/underwater-internet-make-ocean-wi-fi-friendly/story?id=20587056>
- [8] <http://tonicarpio.com/periodismo/submarinos-autonomos>
- [9] <https://rfingeniumantenas.wordpress.com/2013/11/29/cientificos-desarrollan-un-sistema-wifi-submarino-para-comunicaciones-en-aguas-profundas/amp/>