

Sistema OFDM para Canales Acústicos Subacuáticos

Pablo Cobacho-Ruiz, Francisco Javier Cañete, Unai Fernández-Plazaola, Eduardo Martos-Naya.

{pcobacho, francis, unai, eduardo}@ic.uma.es.

Communications and Signal Processing Lab, Instituto Univ. de Investigación en
Telecomunicación (TELMA), Universidad de Málaga.

Resumen—En este artículo se presenta el desarrollo de un sistema de modulación multiportadora de baja complejidad para comunicaciones acústicas subacuáticas de banda ancha en el rango ultrasónico, concretamente entre 32 kHz y 128 kHz. Los canales acústicos submarinos están reconocidos entre los canales de comunicación más hostiles debido a su fuerte selectividad temporal y frecuencial, haciendo que el diseño de sistemas de altas prestaciones sea un reto difícil de resolver actualmente con la tecnología más avanzada. El propósito de este sistema es alcanzar un régimen binario, de entre 40 y 50 Kbps, sobre estos canales permitiendo, por ejemplo, la transmisión de señales de vídeo de calidad limitada. Se describe un prototipo de modém OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con una configuración de parámetros y un diseño específico adaptado a la naturaleza del canal. Para ello, se han utilizado medidas reales en el mar Mediterráneo, en aguas someras, para evaluar el rendimiento del sistema y optimizar su diseño. Se presenta un análisis del sistema con varias configuraciones OFDM que conduce a la selección de la modulación QPSK (quadri-phase shift keying) diferencial y no diferencial como buenas candidatas.

I. INTRODUCCIÓN

El interés por las comunicaciones acústicas subacuáticas o Underwater Acoustic Communications (UAC) se ha incrementado en las últimas décadas de la mano de los avances tecnológicos, posibilitando el desarrollo de nuevas actividades e impulsando otras ya existentes. Entre ellas, podemos citar la monitorización de parámetros medioambientales, la observación de la fauna marina, la acuicultura, la detección de recursos minerales, etc. Aunque las soluciones cableadas pueden resultar más sencillas para los sistemas UAC desde el punto de vista tecnológico, pueden ser demasiado restrictivas para muchas aplicaciones, mientras que los sistemas de comunicación inalámbricos son más versátiles.

Las ondas acústicas sufren menos atenuación en el agua que las ondas electromagnéticas, tanto en el rango de radiofrecuencia como en el óptico, lo que convierte a las comunicaciones UAC en la mejor opción para muchas aplicaciones [1]. Sin embargo, la transmisión de señales a través de canales UAC es un reto tecnológico ya que existe una importante degradación de la señal que es difícil de compensar [2]. Debido a esto y al gran ancho de banda de nuestro sistema, no se puede conseguir una gran cobertura en estos sistemas UAC, aunque, por otra parte, ese limitado rango reduce el impacto sobre la fauna submarina [3].

Los canales UAC pueden modelarse como una clase de canales de comunicación estocásticos, que son selectivos en frecuencia y tiempo o, en el dominio dual, con una dispersión significativa de retardo y dispersión Doppler [4, 5]. El mecanismo de propagación en este canal se caracteriza por cuatro

factores principales: una alta atenuación, ruido subacuático, propagación multicamino y variación temporal.

El objetivo de este trabajo es conseguir un prototipo de sistema capaz de transmitir señales de velocidad de datos media, como las de vídeo de baja calidad, con una complejidad de implementación moderada. Para ello, empleamos banda ancha en el rango ultrasónico para compensar el uso de formatos de modulación simples con baja eficiencia espectral y aún así alcanzar una tasa de datos razonable.

Consideramos tanto la modulación QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) como la modulación QPSK diferencial (D-QPSK), ya que esta última evita la necesidad de estimación del canal y el uso de pilotos. Además, estudiamos dos tipos de D-QPSK: diferencial en tiempo (TD-QPSK), entre símbolos OFDM consecutivos, y diferencial en frecuencia (FD-QPSK), entre subportadoras consecutivas para hacer frente a la doble naturaleza selectiva en tiempo y frecuencia del canal.

Por otro lado, elegimos una implementación de la señal OFDM que evita la necesidad de sincronización de la frecuencia portadora.

En este trabajo se proponen una serie de configuraciones del sistema cuyas prestaciones, evaluadas mediante señales reales procesadas en tiempo diferido, son satisfactorias. Este análisis se ha realizado probando el sistema sobre cuatro canales medidos obtenidos a partir de una campaña realizada por los autores en julio de 2022 en la costa de Málaga [6, 7].

II. DESCRIPCIÓN DE MEDIDAS SUBACUÁTICAS

Hemos realizado varias campañas de medidas en aguas someras del Mar Mediterráneo, con el fin de caracterizar el canal UAC tanto en banda estrecha [8] como en una banda más ancha, a frecuencias ultrasónicas centradas en 80 kHz con una anchura de 96 kHz [5, 6, 7]. Concretamente, para este artículo se ha caracterizado la respuesta de cuatro canales distintos, utilizando dos embarcaciones para ubicar transmisor y receptor. Dichas embarcaciones estaban separadas diferentes distancias, en orden de proximidad: 86, 94, 128 y 136 metros; denominándolas del 1 al 4 respectivamente. No obstante, la distancia no es el único factor que determina las prestaciones del sistema, sino que influyen otros como el nivel de ruido, longitud de respuesta al impulso y la variación temporal de esta. La profundidad del agua variaba entre 15 y 20 metros y el tipo de fondo era arenoso con algunas rocas. Los transductores se encuentran tanto en el extremo transmisor, el proyector, como en el extremo receptor, el hidrófono, y sumergidos a una profundidad fija de 6 metros desde la superficie del agua.

La figura 1 muestra un esquema simplificado del hardware utilizado para dichas medidas, mientras que el equipo de

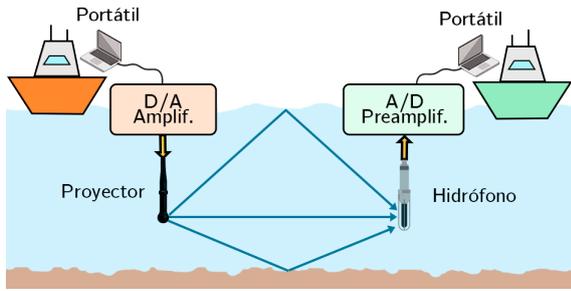


Fig. 1. Diagrama del escenario de medidas.

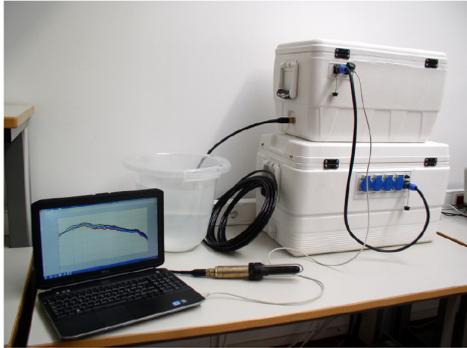


Fig. 2. Equipo de medidas para el receptor.

medidas se muestra en la fotografía de la figura 2. El referido hardware en el extremo transmisor incluye un ordenador portátil (para control, almacenamiento y procesamiento de la señal); un módulo de adquisición que se utilizó como convertidor D/A; un amplificador de potencia y un proyector. Por otro lado, el extremo receptor consta de un hidrófono de bajo ruido; un preamplificador; un módulo de adquisición que se utilizó como convertidor A/D y un segundo ordenador portátil. Se utiliza un software específico para obtener mediciones de forma automatizada, utilizando señales de sondeo de banda ancha que se post-procesan para caracterizar el canal UAC [7].

La figura 3 muestra un ejemplo de la respuesta al impulso variante en el tiempo medida de un canal UAC, en la que se puede observar la variación temporal del rayo principal (LOS), con el menor retardo, seguida de los demás rayos o ecos (debidos a las reflexiones en la superficie y en el lecho marino).

Una vez estimada la respuesta al impulso variante en el tiempo del canal, se ha compensado el retardo del rayo principal mediante la técnica de remuestreo detallada en [5], que sería equivalente a la sincronización necesaria para obtener las mejores prestaciones en un sistema OFDM.

Como se ha mencionado anteriormente, se han estimado cuatro respuestas de canal UAC para estudiar el rendimiento del sistema OFDM propuesto. Este rendimiento no depende exclusivamente de la separación entre emisor y receptor, sino de más factores, como el movimiento de las embarcaciones o las condiciones del mar. Hemos seleccionado estos cuatro canales porque los consideramos representativos del conjunto de los medidos en diferentes pruebas, emplazamientos y fechas.

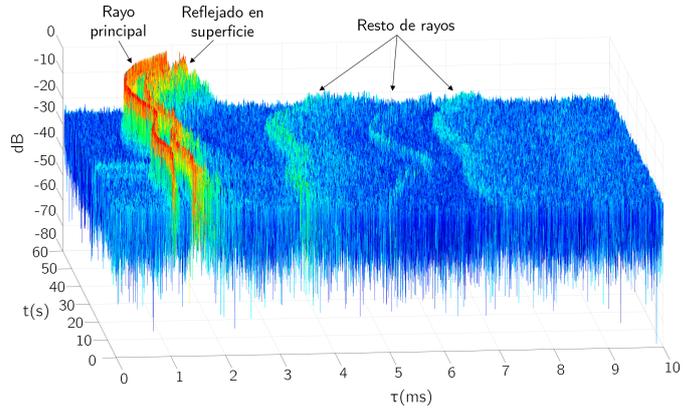


Fig. 3. Amplitud de la respuesta al impulso estimada $\hat{h}(t, \tau)$ como una función del retardo, τ , y del tiempo, t , a partir de las medidas tomadas.

III. MODELO DE SISTEMA

Esta sección describe brevemente el modelo del sistema y los aspectos más importantes del diseño del sistema OFDM.

A. Elementos básicos del sistema

Como se aprecia en la figura 4, el sistema está formado por el transmisor OFDM en el que se encuentra: el bloque "Codificador de canal", en el que, con el fin de reducir la BER (Bit Error Rate), hemos seleccionado un codificador convolucional no recursivo y no sistemático con una tasa de codificación de $1/2$ [6]; mapeo de símbolos QPSK, en el que hemos elegido modulaciones simples y robustas como QPSK y QPSK diferencial en tiempo (TD-QPSK) y frecuencia (FD-QPSK); los bloques "Pilotos" y "Síntesis de subportadoras" donde se ubica cada piloto y símbolo QPSK en su correspondiente subportadora y símbolo OFDM. Para modulación coherente, las portadoras piloto consisten en símbolos conocidos que se emplean para la estimación de canal en el receptor. El bloque IFFT y bloque "CP" (Cyclic Prefix) de inserción del prefijo cíclico. Dada la larga duración de las respuestas del canal medidas, hemos seleccionado un CP largo con respecto a otros sistemas OFDM para reducir la interferencia inter-simbólica (ISI) y entre portadoras (ICI).

El receptor OFDM está compuesto por: el bloque "Sincro" de sincronización de símbolo y de muestra, que se realiza mediante la técnica de remuestreo descrita en [5]; bloque de eliminación del prefijo cíclico; bloque FFT; bloque de selección de subportadoras, que extrae los símbolos QPSK de datos y, en el caso de modulación no diferencial, los pilotos; bloque de estimación de canal a partir de las portadoras piloto (sólo para no diferencial); bloque "FEQ" de igualación en frecuencia, para QPSK el FEQ compensa el efecto del canal [6]; bloque "Detector QPSK" que estima los símbolos QPSK para obtener los bits de información codificados y, finalmente, el decodificado de canal.

B. Principales parámetros del sistema

Como se muestra en la tabla I, la frecuencia de muestreo del sistema es de 500 kHz y se han probado FFTs de 8192 y 4096 puntos, para tener una separación espectral entre portadoras pequeña acorde al bajo ancho de banda de coherencia del canal UAC y optimizar, en la medida de lo posible, la eficiencia espectral. Se han utilizado dos valores para M ,

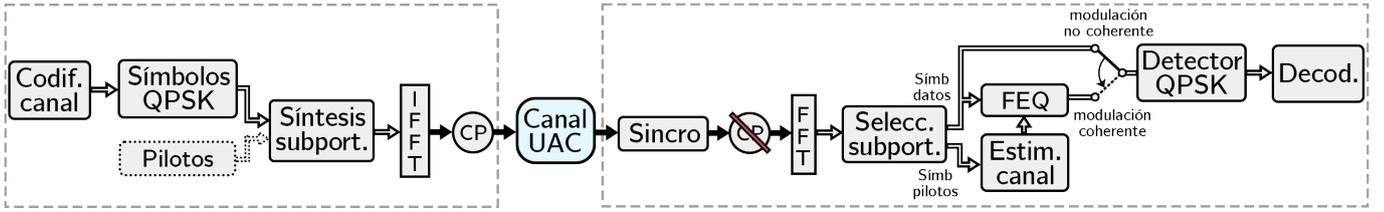


Fig. 4. Diagrama de bloques de los principales elementos en el sistema.

TABLA I
PRINCIPALES PARÁMETROS DEL SISTEMA OFDM.

Núm. de puntos FFT	N	8192, 4096
Núm. de portadoras activas	N_a	1576, 788
Núm. de muestras del CP	M	4096, 2000
Frec. de muestreo	f_s	500 kHz
Frec. central	f_c	80 kHz
Ancho de banda	BW	96 kHz
Banda utilizada	-	(32 - 128) kHz

el número de muestras del CP: 4096 y 2048. Con ellos, la duración del CP es mayor que la longitud efectiva de la respuesta al impulso del canal¹.

Se utilizan dos conjuntos de N , número de puntos de la FFT, 8192 y 4096 y N_a , número de portadoras activas, 1576 y 788, manteniendo ambos el mismo ancho de banda de 96 kHz.

En el caso de la modulación QPSK, para estimar el canal se insertan pilotos alternativamente con las portadoras de datos, utilizando la mitad de las portadoras activas como datos y la otra mitad como pilotos. Por otro lado, las modulaciones diferenciales no requieren portadoras piloto ya que, por naturaleza, compensan el desplazamiento de fase experimentado por las portadoras de datos. Así, todas las portadoras activas pueden utilizarse como portadoras de datos, con el consiguiente aumento de régimen binario.

Tras un análisis exhaustivo de las prestaciones del sistema, hemos seleccionado los siguientes dos conjuntos de parámetros N y M basándonos en el compromiso entre la variación del canal (que requiere usar un símbolo suficientemente corto) y la reducción de ISI-ICI (que requiere usar un CP suficientemente largo): la configuración 1 es con $N = 8192$ y $M = 4096$ y configuración 2 es con $N = 4096$ y $M = 2048$.

C. Regímenes binarios alcanzados

Debido a la inserción de pilotos para QPSK, esta modulación alcanzará la mitad de régimen binario, R_b , que TD-QPSK. R_b calculado para QPSK (con ambas configuraciones de parámetros N y M) es de 32.06 Kbps, mientras que con D-QPSK, para ambas configuraciones se puede alcanzar 64.13 Kbps [6].

D. Estimación de canal y ecualización en frecuencia

Dado que la distorsión predomina sobre el ruido en estos canales UAC medidos, se ha aplicado una igualación en frecuencia Zero-Forcing (ZF) modificada para evitar un realce

¹Consideramos la longitud efectiva a aquella que comprende el 98 % de la energía de la respuesta al impulso.

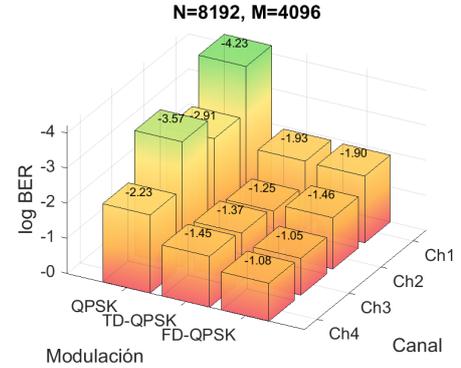


Fig. 5. Resultados de log BER con la configuración de parámetros 1 para las tres modulaciones seleccionadas y cuatro canales medidos.

excesivo del ruido cuando la atenuación de una portadora determinada es muy alta. El FEQ se calcula según la expresión:

$$FEQ[k] = 1/(H_{est}[k] + \delta), \quad (1)$$

donde $H_{est}[k]$ es la respuesta en frecuencia estimada a la frecuencia de las portadoras piloto, que luego se extrapola a las de datos, y δ es un pequeño offset constante. Así, la señal estimada tras la compensación del canal es:

$$\hat{X}[k] = FEQ[k] \cdot (X[k]H[k] + N[k]), \quad (2)$$

donde $X[k]$ es el símbolo transmitido, $H[k]$ la respuesta del canal y $N[k]$ es el ruido UAC registrado en la subportadora k -ésima, para mejorar la estimación se promedian varios símbolos iguales.

IV. PRESTACIONES DEL SISTEMA

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al evaluar el sistema propuesto sobre los cuatro canales medidos. Las medidas de canales y ruido han sido utilizadas para evaluar las prestaciones de un sistema OFDM completo, simulando distintas configuraciones del receptor. Aunque la SNR recibida en los canales no es constante en la práctica, se ha comprobado que el ruido no es el factor más limitante. En cualquier caso, en todas las simulaciones se ha fijado el nivel de ruido para hacer comparaciones y que la SNR a la entrada del receptor sea de aproximadamente 20 dB.

En las figuras 5 y 6 se muestra la BER obtenida mediante simulaciones para las tres modulaciones de las configuraciones de parámetros 1 y 2.

Como se observa, con la configuración 1 (Figura 5) y usando modulación QPSK se obtienen los valores de BER más bajos, mientras que las modulaciones diferenciales con esta configuración no ofrecen tan buenas prestaciones. Sin

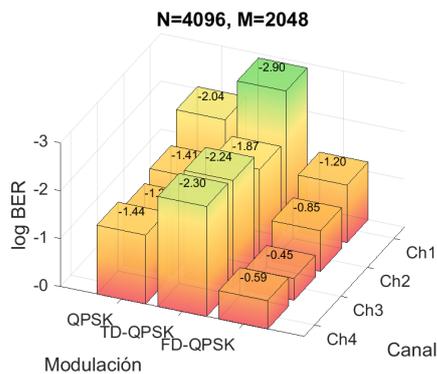


Fig. 6. Resultados de log BER con la configuración de parámetros 2 para las tres modulaciones seleccionadas y cuatro canales medidos.

embargo, no ocurre lo mismo en la configuración 2 (Figura 6), en la que destacan los buenos resultados de la modulación TD-QPSK, siendo más consistentes a lo largo de los cuatro canales que en el caso de QPSK. Esto es debido principalmente a que el símbolo OFDM para esta configuración es más corto ($N = 4096$ y $M = 2048$), sufriendo menos el efecto de la variación del canal. Además, es importante recordar que la modulación TD-QPSK consigue alcanzar el doble de R_b que QPSK (al no requerir de portadora piloto).

Por el contrario, la modulación QPSK empeora sus prestaciones en la configuración 2. Esto se debe a que la separación entre portadoras en esta segunda configuración es mayor que en la primera, empeorando la estimación del canal y, con ello, la BER. Algo similar ocurre con la modulación FD-QPSK, con unos peores resultados en la configuración 2 debido a la mayor separación entre portadoras que agrava el efecto de la variación de la respuesta en frecuencia del canal.

Finalmente, atendiendo al compromiso entre BER y régimen binario alcanzado para las configuraciones estudiadas, a pesar de que la modulación QPSK con la configuración 1 ofrece los valores de BER más bajos, esta configuración no es tan consistente, presentando en algunas simulaciones valores altos de BER. Aunque la modulación TD-QPSK no ofrece valores de BER tan bajos como QPSK, se consideran valores razonables, con la ventaja de un R_b mayor. Su principal ventaja es que permite comunicaciones con un régimen binario muy superior. Por último, aunque FD-QPSK ofrece el mismo R_b que TD-QPSK, generalmente presenta peores resultados de BER a lo largo de todas las simulaciones.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se han estudiado las comunicaciones acústicas subacuáticas evaluando el rendimiento de un sistema basado en OFDM operando en distancias de alrededor de 100 metros. Se ha probado un conjunto de configuraciones de un sistema OFDM en distintos canales utilizando codificación de canal, obteniendo resultados entre 10^{-3} y 10^{-4} , y R_b de hasta 64 Kbps. La banda utilizada se ha configurado entre los 32 kHz y los 128 kHz, ofreciendo una buena región en términos de ruido UAC [6] y un ancho de banda razonable. Tras comparar las prestaciones del sistema para las configuraciones estudiadas, se pueden resaltar los siguientes resultados:

- El efecto de la variación temporal es menos severo (una vez el retardo del rayo principal ha sido compensado)

que el de la selectividad en frecuencia, lo que hace que la modulación TD-QPSK ofrezca mejores prestaciones que FD-QPSK.

- Las modulaciones QPSK y TD-QPSK ofrecen valores de BER dentro de los objetivos planteados. Sin embargo, TD-QPSK no requiere de estimación de canal y puede utilizar todas las portadoras como datos, doblando así el régimen binario de la comunicación (llegando a alcanzar 64 Kbps) y simplificando el diseño del receptor.

Estos resultados allanan el camino para transmisiones de vídeo de baja calidad en prototipos de bajo coste para múltiples aplicaciones de explotación u observación del fondo marino. El sistema podría ser mejorado mediante el diseño de algoritmos de sincronización de complejidad moderada, ecualizadores más sofisticados o usando técnicas de codificación avanzadas tales como LDPC o turbo códigos, pero sin comprometer el objetivo de mantener la complejidad de la implementación a un nivel asequible para construir prototipos.

REFERENCIAS

- M. Stojanovic y J. Preisig. "Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization". En: *IEEE Communications Magazine* 47.1 (ene. de 2009), págs. 84-89. ISSN: 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.2009.4752682.
- Andrew C. Singer, Jill K. Nelson y Suleyman S. Kozat. "Signal processing for underwater acoustic communications". En: *IEEE Communications Magazine* 47.1 (2009), págs. 90-96. DOI: 10.1109/MCOM.2009.4752683.
- James J. Finneran y Brian K. Branstetter. *Effects of Noise on Sound Perception in Marine Mammals*. Ed. por Henrik Brumm. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, págs. 273-308. ISBN: 978-3-642-41494-7. DOI: 10.1007/978-3-642-41494-7_10.
- M. Stojanovic. "Underwater Acoustic Communications: Design Considerations on the Physical Layer". En: *2008 Fifth Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services*. Ene. de 2008, págs. 1-10. DOI: 10.1109/WONS.2008.4459349.
- J. López-Fernández et al. "Wideband Ultrasonic Acoustic Underwater Channels: Measurements and Characterization". En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69.4 (2020), págs. 4019-4032. DOI: 10.1109/TVT.2020.2973495.
- Pablo Cobacho-Ruiz et al. "OFDM System Design for Measured Ultrasonic Underwater Channels". En: *Sensors* 22.15 (2022). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22155703. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/15/5703>.
- Unai Fernández-Plazaola et al. "HW/SW Platform for Measurement and Evaluation of Ultrasonic Underwater Communications". En: *Sensors* 22.17 (2022). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22176514. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/17/6514>.
- F. J. Cañete et al. "Measurement and Modeling of Narrowband Channels for Ultrasonic Underwater Communications". En: *Sensors* 16.2 (2016). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s16020256.