



COMPARACIÓN DE SEÑALES DE BANDA ANCHA PARA POSICIONAMIENTO ACÚSTICO SUBMARINO

Álvaro Lloret Gaona^{1*}
Víctor Espinosa Roselló¹
Isabel Arjona Pérez¹
Carlos David Llorens Álvarez¹

¹Universitat Politècnica de València

RESUMEN

La presente comunicación tiene como objetivo principal la revisión y comparación de señales para el uso de posicionamiento y comunicación para dispositivos submarinos. Las señales con un uso extendido para este tipo de aplicaciones destacan por estar incorreladas con el ruido de fondo. Principalmente se utilizan señales pseudoaleatorias como la MLS, y barridos frecuenciales. Existen otro tipo de señales no tan comunes, pero que pueden presentar ciertas ventajas frente a las señales más convencionales. En este experimento se ha optado por estudiar una señal TSP (Time-Stretched Pulse). En la comunicación se presenta una simulación para estudiar el comportamiento de la amplitud de correlación de distintas longitudes de señal para distintos valores de SNR y distintas longitudes de señal. Además, se ha realizado un montaje experimental para validar los resultados de la simulación.

ABSTRACT

The main objective of the following article is reviewing and comparing signals for positioning and for underwater device communication. The primary highlight that these signals present when commonly used for these type of applications is being uncorrelated with the background noise. Mainly, pseudo-random signals like MLS and frequency sweeps are used. There are other types of signals which are not as common, but which can provide certain advantages in comparison with the most conventional ones. In this experiment, a TSP (Time-Stretched Pulse) has been examined. In the article, a simulation is used in order to study the behaviour of the amplitude of the correlation between the length of different signals for contrasting different SNR values and different lengths of signals. Furthermore, an

experimental setup has been made with the objective of validating the results of the simulation.

Palabras Clave— Correlación, posicionamiento acústico, TSP, Chirp, MLS.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas ha ido creciendo la preocupación por el cuidado de los entornos marinos y se han invertido muchos recursos en ello y se han realizado diversos estudios en distintos campos. Es importante para facilitar la toma de datos en campañas de medidas que exista una comunicación eficiente entre los dispositivos y el instrumental científico utilizado.

Un sistema de comunicaciones eficiente puede tener diversos usos como: transmitir datos desde sensores ubicados en el mar sin necesidad de su extracción, envío de ordenes a los distintos dispositivos, posicionamiento mediante balizas acústicas, etc...

La comunicación entre dispositivos en el medio submarino es más compleja que en el aire. Esto se debe en parte a que las señales electromagnéticas utilizadas en aire sufren una mayor atenuación en el agua y por tanto su radio de cobertura y su robustez frente al ruido disminuyen [1,2].

Como alternativa a las ondas electromagnéticas diversos autores proponen el uso de ondas mecánicas para la comunicación entre dispositivos [3,4]. Estas ondas sufren una menor atenuación. Según el alcance en el que se desea trabajar se define un rango frecuencial. El alcance puede ir

* **Autor de contacto:** allogao@upv.es

Copyright: ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

desde varios kilómetros para bajas frecuencias hasta un centenar de metros para altas frecuencias.

2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

El tipo de señales con un uso extendido para aplicaciones comerciales y de investigación son señales moduladas también utilizadas en aire como: FSK, PSK, y OFDM [1]. En este proyecto se presenta la comparación de tres señales menos convencionales para la comunicación submarina de dispositivos.

Una característica importante que deben tener las señales empleadas para comunicación es su robustez frente al ruido de fondo. Las señales deben poder recuperarse o identificarse en ambientes ruidosos. Existen diversos tipos de señales que están incorreladas con el ruido ambiente. Estas señales presentan una alta amplitud de pico en la correlación cruzada entre la señal emitida y recibida.

Las señales empleadas en esta comunicación son tres señales de banda ancha. En primer lugar, se ha utilizado una señal chirp, que se caracteriza por realizar un barrido frecuencial. Estas señales tienen mayor uso en aplicaciones submarinas para posicionamiento y comunicación [5]. Una señal chirp se define según la Ec. 1, y presenta un alto pico en la correlación cruzada. Además, otra característica destacable es que está incorrelada con otra chirp definida en otro rango frecuencial o invertida.

$$x = \sin\left(\phi_0 + 2\pi\left(\frac{f_1 - f_0}{2T}t^2 + f_0t\right)\right) \quad (1)$$

Donde ϕ_0 es la fase inicial, f_0 es la frecuencia final, f_1 es la frecuencia final, y T la duración de la señal.

Las señales MLS (Maximum Length Sequence) son señales pseudo-aleatorias con una amplitud binaria, es decir, su amplitud puede tener dos valores. En 2011 se probaron las señales MLS para obtener la respuesta al impulso y después emitir señales moduladas [6].

Por otro lado, las señales TSP (Time Stretched Pulse) [7] son señales utilizadas en acústica de salas para obtener la respuesta al impulso. La definición de la señal TSP viene dado por la Ec. 2. Es una señal definida en frecuencia y para obtener la señal temporal se realiza la transformada inversa de Fourier.

$$H(k) = \begin{cases} e^{jpk^2}, & 0 \leq k < \frac{N}{2} \\ 1, & k = \frac{N}{2} \\ H^*(N - k), & \frac{N}{2} < k < N \end{cases} \quad (2)$$

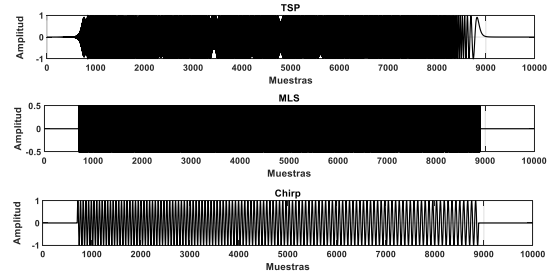


Figura 1. Forma de onda de las señales TSP, MLS, y Chirp.

Existe un método que permite determinar el tiempo de vuelo (ToF, de sus siglas en inglés) mediante la correlación cruzada entre la señal recibida y la señal emitida [8]. En esta correlación aparecerá un máximo pico de correlación desplazado respecto al centro de la correlación. Este retardo en las muestras está directamente relacionado con el tiempo que transcurre entre la emisión y recepción de la señal. Al dividir el retardo por la frecuencia de muestreo se obtiene el tiempo de vuelo de la señal.

$$ToF [s] = \frac{MPCC - \frac{LCC}{2}}{F_s} \quad (3)$$

Donde $MPCC$ es la muestra donde se ubica el pico máximo de la correlación cruzada, LCC es la longitud de la correlación cruzada, y F_s es la frecuencia de muestreo en hertzios.

Conociendo el tiempo de vuelo Ec. 3 y calculando la velocidad del agua, Ec. 4 [9] se puede deducir la distancia existente entre el emisor y receptor, Ec. 5.

$$c \left[\frac{m}{s} \right] = 1449 + 4.6 \cdot T - 0.055 \cdot T^2 \dots + 0.0003 \cdot T^3 \dots \\ + (1.39 - 0.012 \cdot T) \cdot (S - 35) + 0.017 \cdot p \quad (4)$$

Donde T es la temperatura del agua en $^{\circ}C$, S es la salinidad en porcentaje, y p es la profundidad en metros.

$$d[m] = c \cdot ToF \quad (5)$$

Donde c es la velocidad de propagación en el agua en metros por segundo, y ToF es el tiempo de vuelo en segundos.

3. METODOLOGÍA

3.1 Sistema de emisión y adquisición.

En este experimento se ha diseñado un sistema capaz de emitir y registrar señales de banda ancha en el agua. El

sistema planteado dispone de una parte de emisión que consta de: un ordenador, una RedPitaya, un amplificador EPA-104, y un transductor SX30-FR. Para la generación de las distintas señales se ha utilizado una RedPitaya conectada por cable ethernet al ordenador y controlada por el software Matlab. Las señales generadas son amplificadas por el amplificador EPA-104 y se transmiten al transductor emisor SX30-FR. La salida del amplificador está monitoreada por el osciloscopio RTM3004, que a su vez registra la señal en el ordenador.

Por otro lado, la parte de recepción se conforma por: un hidrófono B&K 8103, una Nexus, y el osciloscopio RTM3004. El hidrófono percibe las señales y estas son adaptadas por la Nexus. La salida de la Nexus con la señal adaptada queda registrada en el segundo canal del osciloscopio y envía los datos al ordenador.

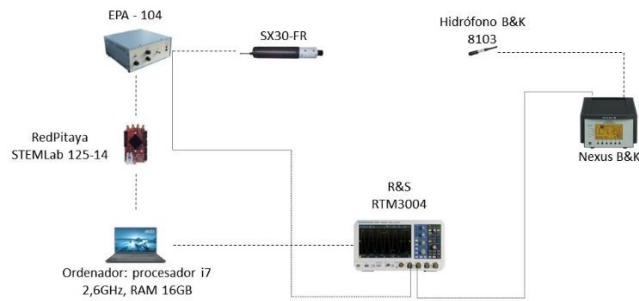


Figura 2. Esquemático del sistema de emisión y recepción diseñado.

3.2 Medidas realizadas.

Se han realizado una serie de medidas con el sistema de adquisición y emisión mencionado previamente. Las medidas se han llevado a cabo en una piscina de dimensiones 8mx4mx1.3m llena de agua dulce. Dicha piscina cuenta con un sistema de ejes que permite controlar las posiciones de emisor y receptor. Para este experimento se ha colocado el emisor en el centro del ancho de una de las paredes y el receptor enfrentado a la distancia mínima que permitían los ejes. Se han establecido cuatro posiciones de medida del receptor respecto al emisor de 2.6, 3.6, 5.1, 7.1 metros. Para cada una de las posiciones se ha repetido la medida 6 veces. Tanto el hidrófono como el transductor emisor estaban sumergidos a la máxima profundidad que permitían los cables, es decir, 10 cm respecto a la superficie. En el momento de hacer el experimento la piscina contaba con un metro de altura para la columna de agua y una temperatura del agua de 27.81 °C.

3.3 Señales utilizadas.

Se han utilizado tres señales distintas: TSP, MLS, y Chirp. Las tres señales utilizadas se han definido con una longitud de 8192 muestras y una duración de 10 ms. La señal chirp utilizada realiza un barrido frecuencial comprendido entre 30 kHz y 40 kHz, esta elección de frecuencias viene dada por las frecuencias de trabajo del transductor consultadas en la hoja de fabricante. La señal TSP y Chirp han sido emitidas con el mismo voltaje, mientras que la señal MLS con la mitad de amplitud.

3.4 Simulación.

Además de las medidas experimentales, se ha realizado una simulación para comparar las tres señales y validar los resultados. La simulación ha consistido en recrear las cuatro posiciones del montaje experimental y comprobar para distintos valores de SNR si se puede determinar la posición correctamente.

Se han utilizado las señales teóricas con amplitudes similares tanto en emisión como en la recepción. A las señales de recepción se les ha añadido un retardo correspondiente con las cuatro distancias de medición.

A las señales de recepción se les ha añadido de ruido blanco con un SNR asignado. Esto se ha realizado mediante la función `awgn()` del software Matlab. No se han tenido en cuenta la interacción de las señales con las múltiples reflexiones.

4. RESULTADOS

4.1 Resultados experimentales.

Para este experimento se han calculado dos parámetros para poder comparar las tres señales. El primer parámetro calculado se trata de la relación entre la amplitud de correlación obtenida y la amplitud de la señal emitida en voltios. Con este parámetro se pretende observar la eficiencia de las señales en función del voltaje suministrado.

En la siguiente figura se puede observar el primer parámetro mencionado para las tres señales en función de las distintas posiciones. Se extrae de la tabla que la señal MLS ha proporcionado la mayor relación entre amplitud de correlación y energía suministrada al transductor. En segundo lugar, la señal TSP presenta valores similares pero inferiores a la MLS. Por último la señal chirp muestra valores inferiores para las dos primeras posiciones y superiores para las dos últimas.

Es de esperar que la tendencia de los valores obtenidos sea decreciente en función de la distancia. Esto ocurre para las

señales TSP y MLS. Sin embargo, aparece no aparece una tendencia clara para la señal chirp.

Esto puede estar ocasionado por dos razones. La primera es que la amplitud de correlación de la señal chirp esta estrechamente ligada con el ancho de banda de esta y el rango de trabajo del transductor emisor. Generalmente cuanto mayor ancho de banda mayor amplitud. También es posible

Este experimento se ha realizado en un entorno altamente reverberante. Teniendo en cuenta la duración de las señales (10 ms) y la velocidad de propagación calculada para las condiciones del experimento. Se puede determinar que toda reflexión cuyo camino indirecto recorra una distancia menor a 15 metros se va a superponer con la señal del camino directo.

Bajo estas condiciones parece ser que la señal chirp se ve mucho más afectada por las reflexiones que el resto de las señales.

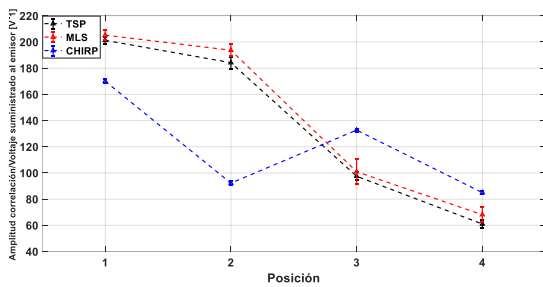


Figura 3. Resultados experimentales de la amplitud de correlación en función del voltaje suministrado para las tres señales empleadas.

El segundo parámetro calculado en esta comunicación es la distancia obtenida a través del método de correlación cruzada. Esta distancia, como se observa en la figura siguiente, se ha comparado con la posición exacta del hidrófono dada por los ejes.

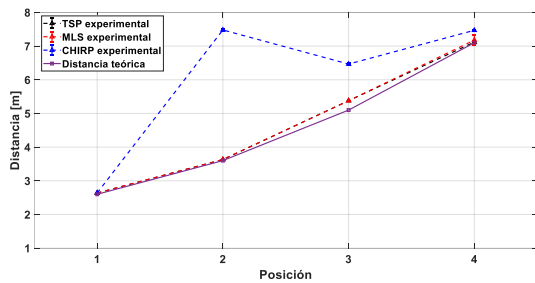


Figura 4. Resultados experimentales del cálculo de la distancia para las tres señales empleadas.

Las señales TSP y MLS presentan una diferencia prácticamente nula entre sí para los resultados de distancia obtenidos. Estas dos señales se aproximan mucho a los valores de distancia reales, donde la máxima diferencia se encuentra en la tercera posición con un valor aproximado de 0.2 metros.

No existe casi desviación en los datos calculados de distancia de ninguna de las tres señales. Esto se debe a la elección de la frecuencia de muestreo. Con una frecuencia de muestreo lo suficientemente alta aumenta la probabilidad de que el pico de correlación se encuentre en la misma muestra.

Se observa que para la señal chirp las posiciones 2 y 3 no se han podido recuperar, mientras que las posiciones 1 y 4 si se asemejan al valor real de distancia. Esto puede deberse al desplazamiento del pico máximo de correlación en la señal. El desplazamiento del máximo indica que el método de correlación está considerando como máximo de la señal una reflexión tardía en vez del sonido directo.

4.2 Resultados simulación.

Los resultados obtenidos de la simulación se presentan en la Figura 5 y Figura 6. Se han probado varios valores de SNR para las tres señales hasta el nivel más bajo con el cual se puede detectar 6 veces el pico de correlación correcto.

Los valores de las tres señales para la simulación son similares a los valores de las distancias reales. La señal MLS presenta una mayor capacidad para obtener el valor de distancia correctamente en entornos más ruidosos, hasta un valor de SNR de -15 dB. Mientras que la señal TSP y chirp han alcanzado el mismo valor mínimo de SNR de -12 dB.

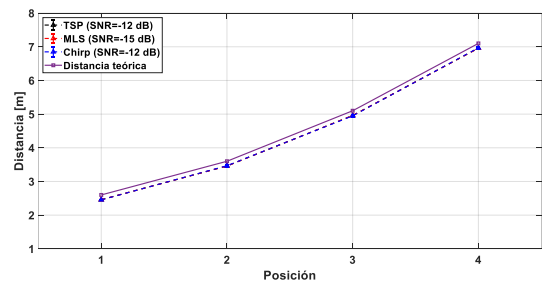


Figura 5. Resultados de la simulación para las distancias calculadas para las tres señales.

Los resultados de las amplitudes difieren notablemente de los valores obtenidos en los resultados experimentales. Esto se debe mayoritariamente a que se ha trabajado con la misma señal con un cambio de amplitud, es decir, no existe la deformación de la señal al ser transmitida por el transductor y recibida por el hidrófono. Además, en la simulación no se tienen en cuenta las múltiples reflexiones de la piscina.

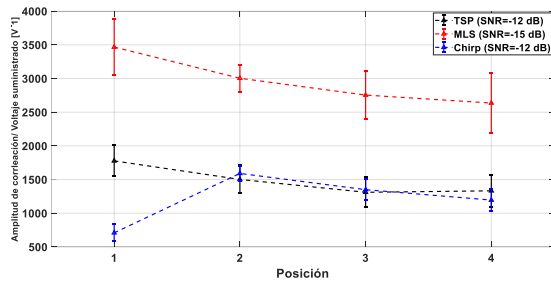


Figura 6. Resultados de la simulación para la amplitud de las tres señales.

Se observa una tendencia decreciente para las tres señales en función de la distancia, menos para la posición 1 de la señal chirp. Esta medida no se debe tener en cuenta ya que se desconoce el porque del resultado. La señal MLS muestra una amplitud claramente superior a las otras dos señales en un entorno más ruidoso.

5. CONCLUSIONES

Como conclusión de los datos experimentales realizados se extrae que las señales de banda ancha TSP y MLS pueden utilizarse para el posicionamiento acústico. Las dos ofrecen amplitudes de correlación parecidas, aunque es la MLS la que ofrece valores de amplitud más altos en función del voltaje suministrado. Por otro lado, no se ha podido discernir de forma correcta la distancia con la señal chirp.

En cuanto a los datos obtenidos en la simulación podemos validar que la señal MLS ofrece la mayor amplitud de correlación en función del voltaje suministrado. Las señales chirp y TSP muestran valores similares de amplitud. También se extrae de los datos que la MLS permite calcular de forma correcta la distancia para niveles de SNR menores que las otras dos señales.

Como conclusión general de esta comunicación cabe destacar que las reflexiones tienen una clara influencia en las medidas experimentales. Especialmente en la señal chirp. Podemos confirmar esto comparando los datos de la simulación donde no se han contemplado las reflexiones y los resultados experimentales.

En un ambiente sin reflexiones la señal MLS es la mejor opción, mientras que en un entorno donde si aparecen reflexiones las señales TSP y MLS aportan resultados similares tanto en amplitud como en el cálculo de la distancia.

Esta comunicación sirve como base para futuros experimentos como: la comparación de las señales en un entorno real y con mayores distancias, estudio de la influencia

de las reflexiones en la amplitud de correlación para distintos valores de tensión, y además la codificación de las tres señales para el uso en aplicaciones de comunicación.

6. AGRADECIMIENTOS

Esta comunicación se ha podido llevar a cabo gracias a la financiación del proyecto LIFE15 IP ES 012 con el nombre "INTEGRATED, INNOVATIVE AND PARTICIPATORY MANAGEMENT FOR THE MARINE NATURA 2000 NETWORK IN SPAIN".

7. REFERENCIAS

- [1] Jiang, S., & Georgakopoulos, S. (2011). Electromagnetic wave propagation into fresh water. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2011.
- [2] Murad, M., Sheikh, A. A., Manzoor, M. A., Felemban, E., & Qaisar, S. (2015). A survey on current
- [3] Zia, M. Y. I., Poncela, J., & Otero, P. (2021). State-of-the-art underwater acoustic communication modems: Classifications, analyses and design challenges. *Wireless personal communications*, 116, 1325-1360
- [4] Sendra, S., Lloret, J., Jimenez, J. M., & Parra, L. (2015). Underwater acoustic modems. *IEEE Sensors Journal*, 16(11), 4063-4071.
- [5] Lei, W., Wang, D., Xie, Y., Chen, B., Hu, X., & Chen, H. (2012, May). Implementation of a high reliable chirp underwater acoustic modem. In *2012 Oceans-Yeosu* (pp. 1-5). IEEE]
- [6] Kočańska, I., & Lasota, H. (2011). Application of OFDM technique to underwater acoustic data transmission. *Hydroacoustics*, 14, 91-98.
- [7] Suzuki, Y., Asano, F., Kim, H. Y., & Sone, T. (1995). An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(2), 1119-1123
- [8] Herter, S., Youssef, S., Becker, M. M., & Fischer, S. C. (2021). Machine Learning Based Preprocessing to Ensure Validity of Cross-Correlated Ultrasound Signals for Time-of-Flight Measurements. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 40(1), 1-9
- [9] Hovem, J. M. (2007). Underwater acoustics: Propagation, devices and systems. *Journal of Electroceramics*, 19, 339-347.