

Técnica de modulación obtenida a partir del efecto paramétrico: Aplicación a sistemas acústicos submarinos de comunicaciones



María Mercedes Campo Valera¹, Ivan Felis Enguix², Isidro Villó-Pérez¹

1. Universidad Politécnica de Cartagena

Plaza del Hospital 1, Antiguones, 30202 Cartagena, Murcia, España.

2. Centro Tecnológico Naval y del Mar (CTN), 30320 Fuente Álamo, Murcia, España.

maria.campo@edu.upct.es

PACS: 43.25.Lj

Resumen

Desde hace años, en el campo de la acústica submarina, se ha desarrollado una línea de investigación con especial relevancia para aplicaciones de vigilancia ambiental y seguridad marítima que explora las posibilidades de los fenómenos no lineales de propagación del sonido, especialmente el referido al efecto paramétrico. Este artículo muestra los resultados de utilizar una nueva técnica de modulación basada en señales de barrido senoidal. Para esta modulación se presenta una cadena de información de 16 bits, con una frecuencia portadora de 200 kHz y mediante la aplicación del método de la correlación cruzada, se evalúan las limitaciones y mejoras de esta técnica de procesamiento. Esto permite alcanzar mejoras en la discriminación de los bits. Finalmente, se realiza una simulación de la influencia de la propagación en una señal acústica para un dispositivo acústico convencional y paramétrico.

Palabras clave: acústica no lineal, acústica submarina, comunicaciones acústicas paramétricas, detección por correlación.

Abstract

For years, in the field of underwater acoustics, a line of research with special relevance for applications of environmental monitoring and maritime security has been developed that explores the possibilities of non-linear phenomena of sound propagation, especially the referring to the so-called parametric effect or self-modulation. This work shows the results of using a new modulation technique based on sine-sweep signals. For this modulation, a 16-bit strings of information is presented with 200 kHz carrier frequency and, by applying the cross-correlation method, the limitations and improvements of this processing technique are evaluated. This allows to achieve improvements in the discrimination of the bits used in underwater parametric acoustic communications. Finally, a simulation of the influence of propagation on an acoustic signal is performed for a conventional and a parametric acoustic device.

Keywords: nonlinear acoustic, underwater acoustic, parametric acoustic communications, correlation detection.

1. Introducción

La acústica no lineal enfocada a la generación paramétrica ha despertado gran interés desde que Westervelt publicó su artículo en 1963 [1]. Posteriormente, se ha popularizado en el campo de la acústica submarina respecto al procesamiento de señales de arrays paramétricos. Estas fuentes acústicas paramétricas se están empezando a utilizar gradualmente en sonares de detección y sonares de comunicaciones en aguas poco profundas [2-6].

Estas comunicaciones paramétricas permiten reducir el efecto multitrayecto, lo que permite simplificar el análisis de la señal enviada cuando, por ejemplo, se opera

remotamente un sistema conformado por vehículos submarinos ROV desde una fuente emisora. Por otro lado, reduce la interferencia entre los usuarios logrando una operación a mayor escala.

Las comunicaciones acústicas submarinas paramétricas utilizan los efectos no lineales que se generan en el canal submarino, para la transmisión de datos. Cuando un medio es excitado por una señal bifrecuencia con frecuencias primarias ω_a y ω_b , existe una interacción mutua entre ellas debido a la no linealidad, formándose ondas secundarias de frecuencias que son combinaciones lineales suma y diferencia de las frecuencias primarias.

Por otra parte, los efectos disipativos del medio atenúan las ondas de mayor frecuencia haciéndolas desaparecer. Como consecuencia, la señal diferencia $\omega_a - \omega_b$, es la que se propaga a mayor distancia. Este efecto se conoce con el nombre de *efecto paramétrico*.

Otro método para generar señales paramétricas es mediante el uso de una señal primaria de banda ancha, en cuyo caso, un número infinito de frecuencias interactúan generando una señal paramétrica de banda ancha. El beneficio más importante del efecto paramétrico es el hecho de que se logra una alta directividad.

Berktag en 1965 [7-8] estudió el efecto paramétrico de banda ancha. Propuso una solución a la ecuación de Westervelt [1] empleando señales de banda ancha, aplicando una modulación AM. Esta modulación, consiste en emitir una onda primaria de frecuencia portadora ω_p , modulada en amplitud A_p , con una envolvente de modulación $E(t)$, mostrado en la expresión (1), cuya demodulación se da en el medio a través de los efectos no lineales que se generan, creando una frecuencia secundaria con $p_2(x, t)$, tal como lo presenta la expresión (2).

$$p_1(t) = A_p E(t) \sin \omega_p t \quad (1)$$

$$p_2(x, t) = \frac{\beta p_o^2 a}{16 \pi \rho_o c_o^4 \alpha x} \frac{\partial^2 E^2(\tau)}{\partial t^2} \quad (2)$$

Donde β es el coeficiente de no linealidad, a , es el área del transductor, ρ_o , es la densidad del medio, c_o , es la velocidad de propagación de la señal, α , es el coeficiente de absorción, x , es la distancia a la fuente y $E(t)$ es la envolvente de la modulación.

La solución propuesta por Berktag es una aproximación para haces directivos en campo lejano. Las propiedades del campo acústico paramétrico establecen que la amplitud de la presión de la señal demodulada (frecuencia secundaria paramétrica) es proporcional a la segunda derivada en el tiempo de la envolvente al cuadrado de la señal enviada. Además, es proporcional al radio α del transductor.

De la expresión (1), se aportan los esquemas de modulación que se usan comúnmente en comunicaciones acústicas submarinas.

2. Modulación

Modular consiste en transportar información sobre una señal llamada portadora, alterando algunas de sus características tales como: amplitud, frecuencia o fase,

en función de otra señal conocida como moduladora. De la expresión (1) de Berktag se asume que la señal portadora es una forma de onda armónica modulada en amplitud, expresada según la ecuación (3):

$$x(t) = A_p E(t) \cdot \sin(2\pi f_p t) \quad (3)$$

Donde A_p es la amplitud de la señal portadora, $E(t)$ es la envolvente de la modulación definida por la señal moduladora como, $\sin(2\pi f_m) t$ y $\sin(2\pi f_p) t$ es la señal portadora. Se tiene que la señal modulada $x(t)$ es el resultado del producto de la señal la moduladora y portadora.

A continuación, se analizan algunas de las técnicas de modulaciones de entre las cuales sea posible su representación paramétricamente a través del envío y recepción de una cadena de bits (unos y ceros) y se estudia su capacidad de detección. Se presenta aquí solo la modulación por amplitud utilizando un barrido senoidal en frecuencia.

2.1. Modulación por barrido senoidal (sweep)

En estos análisis, las técnicas de modulación se basan en la concatenación de señales analógicas tipo seno. Con esta técnica, se ha desarrollado un tipo de modulación que consiste en la secuencia de varias señales de banda ancha tipo sweep (barridos en frecuencia de señales tipo seno), donde para el bit 1 se tiene una señal moduladora con sweep ascendente (f_{m1} hasta f_{m2}) y para el bit 0 otra señal moduladora con sweep descendente (f_{m2} hasta f_{m1}).

La Figura 1, muestra un ejemplo de modulación de la señal que representa un bit. En este caso el bit 1, que corresponde a un sweep ascendente desde 10 hasta 50 kHz con una duración 1000 μ s y con una señal portadora senoidal f_p de 200 kHz.

3. Análisis de resultados por el método de la correlación cruzada

La correlación cruzada es una operación matemática que se utiliza para medir el grado de semejanza entre dos señales para poder extraer cierta información deseada. Esto es, si existe cierto parecido en el perfil de dos señales $x(t)$ e $y(t)$ [9]. Las señales en estudio se trabajan en tiempo discreto, por lo que la correlación entre las dos señales discretas $x[n]$ e $y[n]$ con un número de muestras N se expresa mediante la ecuación (4):

$$r_{xy}[l] = \sum_{n=1}^N x[n] y[n+l] \quad (4)$$

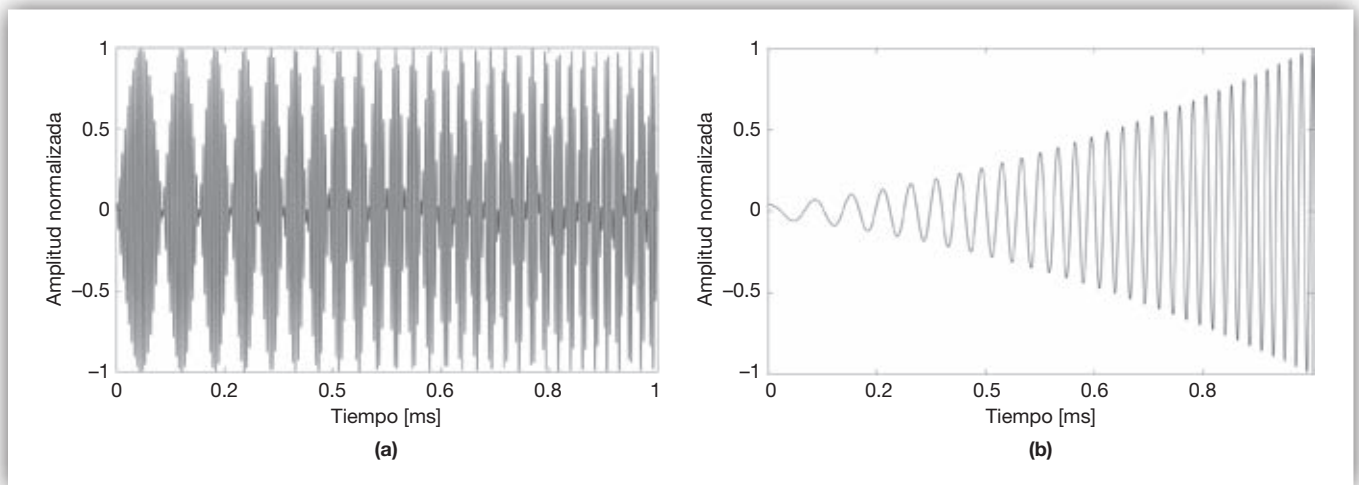


Figura 1. Ejemplo de señal modulada para el bit 1. (a) Señal modulada enviada; (b) señal paramétrica que corresponde a la segunda derivada de la envolvente al cuadrado de la señal modulada enviada.

Para su aplicación en este trabajo, se ha supuesto que la señal digitalizada por el transductor emisor es $x[n]$ y la señal digitalizada que registra el hidrófono (receptor) es $y[n]$, donde $l = 1, 2, \dots, n$, son el número de muestras en que $y[n]$ se retrasa respecto a $x[n]$. Así, la función de correlación cruzada se determina para un número de valores l y la estimación del tiempo de retardo o, de manera análoga, del tiempo de llegada (en muestras) de la señal recibida corresponderá al valor l en los que la función de correlación es máxima. Conociendo la velocidad de propagación del sonido en el medio (agua) donde se transmite la señal se determina la distancia que existe entre la emisión y la recepción.

Los fenómenos acústicos que se tratarán conllevan en muchas ocasiones, una componente de señal directa y otra reflejada, pudiendo llegar a haber solape entre ambas señales. En este sentido, el procesado en el dominio de la correlación ofrece una ventaja significativa que supone la diferenciación entre dicha señal directa y la primera reflexión, así como la obtención de la amplitud de las frecuencias que contiene ambas señales [10].

A continuación, se presentan los resultados del estudio realizado de una cadena de 16 bits organizada de la siguiente manera [01101111 01101011] que corresponde a la palabra “ok”. Se analizan los resultados de detección y discriminación de esta cadena de bits para una señal sweep paramétrica desde los 10 hasta los 50 kHz a $1000 \mu\text{s}$ y una señal portadora con frecuencia de 200 kHz, tal como se comentó en el apartado 2.

3.1. Detección por correlación cruzada de la modulación por barrido senoidal (sweep)

En una búsqueda de nuevas técnicas de modulación que permitan tanto detectar temporalmente cada uno de

los bits 1 y 0, como discriminarlos entre ellos, se aplica la modulación de barrido senoidal (sweep). Dada su robustez, estas señales se han utilizado recientemente como técnicas de comunicación acústica no lineal [6] [11-12]. Por lo tanto, para su análisis, se correla la señal recibida filtrada en bajas frecuencias aplicando un filtro paso bajo a las frecuencias del sweep paramétrico. Esta señal filtrada se correla con la segunda derivada de la envolvente al cuadrado de la señal enviada para así obtener la señal paramétrica. La Figura 2 muestra esta señal en el dominio del tiempo.

Con este procedimiento se analiza la señal conformada por los 16 bits que consiste en la concatenación del bit 1 (sweep ascendente) y el bit 0 (sweep descendente), para determinar si la detección por correlación sigue siendo apropiada para este tipo de señales.

En la Figura 3 se observa que la detección de los picos por correlación es clara tanto para el bit 1 como para

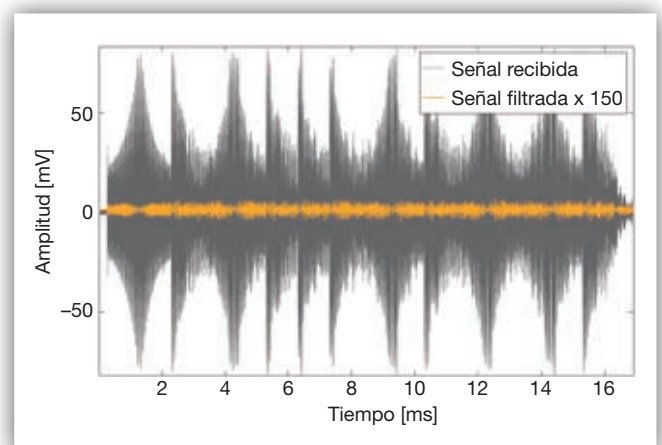


Figura 2. Señal sweep paramétrico en cadena bit recibida. Señal recibida (gris) y recibida filtrada (amarilla) en las frecuencias del sweep.

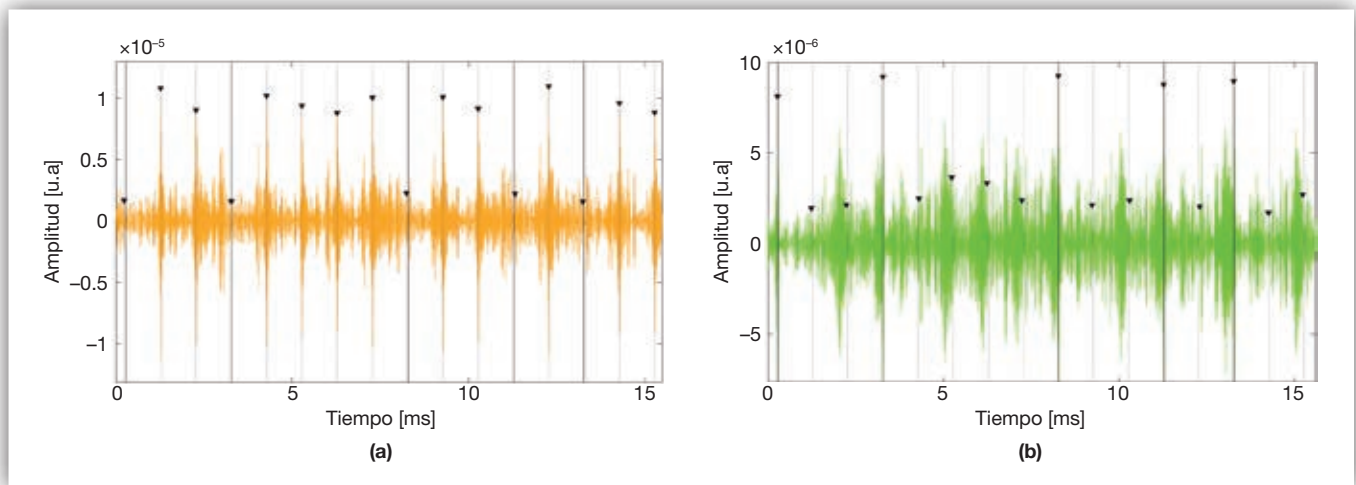


Figura 3. Correlación cruzada de la señal recibida filtrada de barrido senoidal (sweep) con cadena de bits [01101111 01101011], duración por cada bit 1000 μ s. (a) Detección por correlación para el bit 1 (sweep de 10 a 50 kHz); (b) Detección por correlación para el bit 0 (sweep de 50 a 10 kHz).

el 0. En la Figura 3a se tiene que el valor de las amplitudes de la correlación para cada una de las posiciones del bit 1 (11 en total, línea continua) es de un orden superior respecto a la amplitud de los bits que no se deben detectar (línea discontinua). Igualmente, la Figura 3b presenta que las amplitudes de correlación para cada una de las posiciones del bit 0 (5 en total, línea continua) es de un orden superior respecto a los bits que no se deben detectar (línea discontinua).

Además, se tiene que los picos de correlación se detectan muy cercanos respecto de los tiempos esperados, teniendo en cuenta el tiempo de vuelo inicial donde se espera ser recibida dicha señal. El comportamiento de la correlación y el ancho de los picos resultantes tiene consecuencias tanto en la detección como en la discriminación de bits.

4. Influencia de la propagación en una señal acústica

La generación de las múltiples trayectorias que sufre una señal en el mar está condicionada por dos efectos: la reflexión de la señal entre la superficie y el fondo y/o cualquier objeto y la refracción del sonido en el agua. Esta última es consecuencia de la variabilidad de la velocidad del sonido en el agua. La velocidad del sonido depende de la temperatura, la salinidad y la presión, magnitudes que a su vez varían con la profundidad y la localización. Los rayos de la señal tienden a inclinarse hacia la región con menor velocidad de propagación. Cerca de la superficie, la velocidad tiende a ser constante dado que la temperatura y la presión también lo son. En zonas con temperaturas templadas, la temperatura disminuye a medida que la profundidad aumenta. Sin embargo, el aumento de la presión no es suficiente para

compensar el efecto en la velocidad del sonido. Así, la velocidad del sonido disminuye en la región llamada termoclina principal. Después de cierta profundidad, la temperatura alcanza un valor aproximadamente constante de 4 °C y, a partir de ahí, la velocidad del sonido aumenta con la profundidad. De esto se tiene que cuando una fuente emite una señal, esta seguirá un camino ligeramente diferente debido a los efectos descritos y el receptor recibirá no solo la señal directa sino cada una las reflexiones. En la Figura 4 se presenta un ejemplo del perfil típico de la velocidad del sonido en el medio marino.

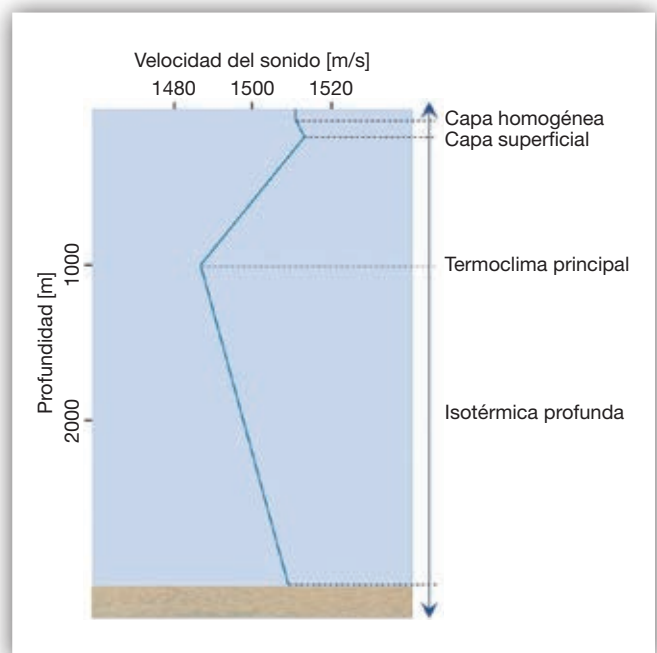


Figura 4. Perfil típico de la velocidad de sonido en el agua de mar. Hasta los 300 metros se tiene la capa superficial, desde los 300 m y hasta los 1000 m se comprende la capa termoclina y a partir de los 1000 m la capa isotérmica.

4.1. Resultados de la comparación de la propagación entre una fuente convencional y paramétrica

La Figura 5 muestra dos ejemplos del campo acústico generado por un emisor acústico considerando dos haces de directividad diferente. La simulación se implementó con el modelo Bellhop para un perfil batimétrico constante de 50 m de profundidad.

En la Figura 5a se muestra el perfil de velocidad del sonido de propagación de 1500 m/s aproximadamente para aguas poco profundas. En la figura 5b, el campo acústico con fuente omnidireccional (directividad de $\pm 90^\circ$), en él se observa, que las reflexiones serán mayores dado que la señal viaja en todas las direcciones y en 5c se presenta, el campo acústico con una fuente

direccional de $\pm 10^\circ$. Esta figura muestra una menor influencia de las reflexiones, además de, zonas de sombras que se pueden aprovechar en comunicaciones cuando no se desea que el mensaje sea interceptado. El ancho de haz de la directividad de $\pm 10^\circ$ hace referencia a estudios previos de los autores sobre el comportamiento de la directividad medida experimentalmente en [6].

Otra forma de analizar cómo la directividad permite obtener un campo con menor efecto de múltiples reflexiones es dibujando el campo acústico en una dirección horizontal, con el transductor e hidrófono ambos, a la misma profundidad. La Figura 6 muestra este campo acústico para diferentes directividades de fuente. Se ha añadido una línea que corresponde a una extensión esférica sin ningún reflejo.

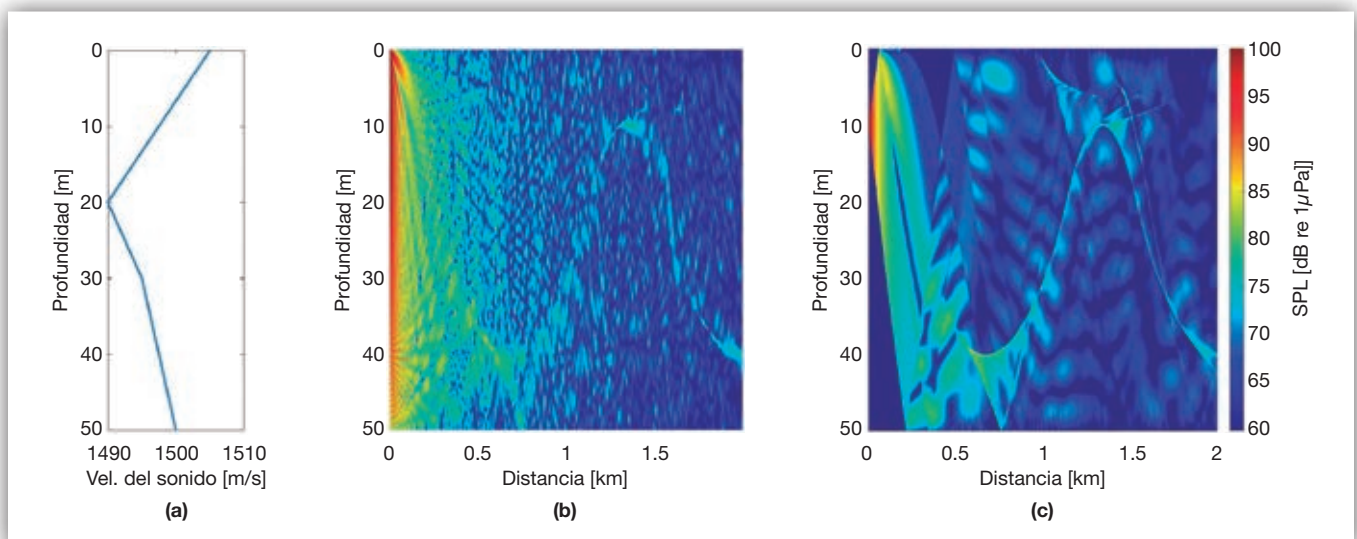


Figura 5. (a) Perfil de velocidad del sonido en aguas poco profundas; (b) e influencia de la propagación para una fuente convencional y una fuente paramétrica (c).

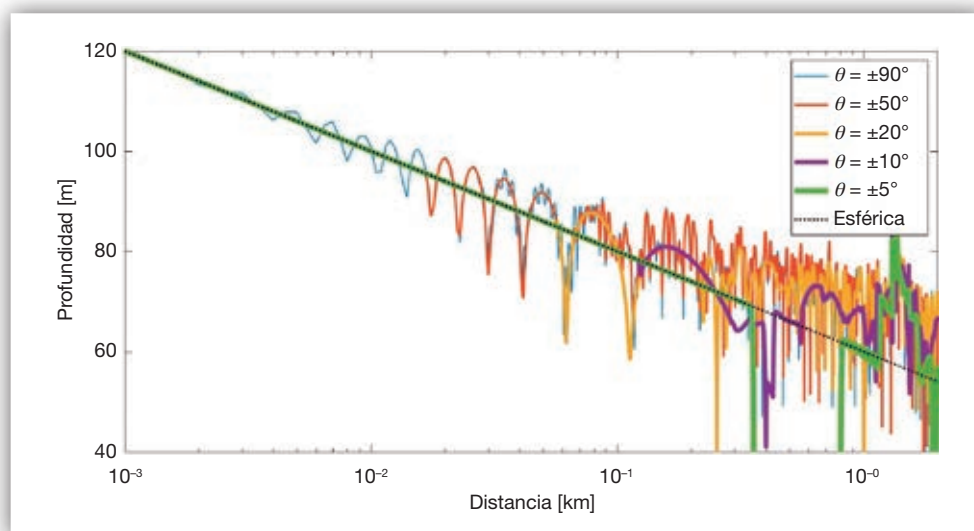


Figura 6. Niveles de presión sonora a lo largo de una dirección a la misma profundidad de la fuente acústica, considerando diferentes directividades.

Se observa cómo la directividad influye en el campo sonoro. Para el caso omnidireccional, el efecto espejo de la superficie (efecto de Lloyd) se observa a distancias cercanas de la fuente, mientras que para la fuente direccional, este efecto desaparece y el campo se presenta más homogéneo. En ambos casos se observa un pequeño canal acústico.

De lo anterior se tiene que cuando una fuente emite un señal, esta seguirá caminos diferentes debido a los efectos mencionados. Sin embargo, con la utilización del efecto paramétrico, se pueden obtener señales de baja frecuencia altamente directivas ($\pm 10^\circ$) lo cual reducirá el efecto de las reflexiones en aguas poco profundas (confinadas). Además, estas bajas frecuencias podrán propagarse durante una mayor distancia.

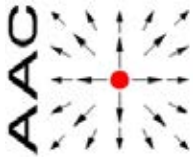
5. Conclusiones

Se ha presentado un estudio general de una técnica de modulación aplicada a la generación paramétrica enfocada al ámbito de la transmisión en las comunicaciones acústicas submarinas. Se ha descrito la técnica o el método desde un punto de vista teórico y se ha aplicado el análisis por el método de la correlación cruzada a una señal medida experimentalmente. En base a ello, se ha obtenido la correlación cruzada para un mensaje de 16 bits (1 y 0) que forman la palabra "ok" con una señal de barrido senoidal (sweep paramétrico), obteniendo así el pico máximo de correlación para cada una de las posiciones de bits. En este sentido, se obtuvieron picos de correlación bastantes estrechos y bien definidos en cada uno de los tiempos esperados.

Con el uso de fuentes acústicas paramétricas en aguas poco profundas se obtiene un rendimiento significativo en la recepción de la señal dado que los haces que se emiten son altamente directivos. Esta técnica disminuye o reduce los múltiples trayectos de la señal lo que se traduce en una mejora de la interferencia entre símbolos.

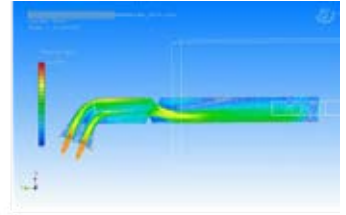
6. Referencias

- [1] P. J. Westervelt, "Parametric Acoustic Array," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 35, no. 4, pp. 535–537, 1963.
- [2] M. Moffett and P. Mello, "Parametric acoustic sources of transient signals," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 66, no. 4, pp. 1182–1187, 1979.
- [3] M. Saldaña-Coscollar, "Acoustic System Development for Neutrino Underwater Detectors," Universitat Politècnica de València. EPSG. Gandía.: Phd, 2017.
- [4] S. Li, "Pre-processing methods for parametric array to generate wideband difference frequency signals," in *IEEE*, 2008.
- [5] L. Kopp, D. Cano, G. Loubet, F. Vial, and A. Essebbar, "Parametric Transmission of Wide-band Signals," *IEEE*, pp. 839–844, 1996.
- [6] M. Campo-Valera *et al.*, "Acoustic Parametric Signal Generation for Underwater Communication," *Sensors*, vol. 18, no. 7, pp. 1–11, 2018.
- [7] H. O. Berktaý, "Possible exploitation of non-linear acoustics in underwater transmitting applications," *J. Sound Vib.*, vol. 2, no. 4, pp. 435–461, 1965.
- [8] H. O. Berktaý and B. V. Smith, "End-fire array of virtual acoustic sources produced by the interaction of cylindrically spreading acoustic waves," *Electron. Lett.*, vol. 1, no. 7, p. 202, 1965.
- [9] J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Tratamiento Digital de Señales*, 4a. ed., vol. 53, no. 9. España: Pearson-Prentice Hall, 2007.
- [10] S. Adrián-Martínez *et al.*, "Acoustic signal detection through the cross-correlation method in experiments with different signal to noise ratio and reverberation condition," *Ad-hoc Networks Wirel.*, vol. 8629, pp. 66–79, 2015.
- [11] M. Campo-Valera, M. Ardid, I. Felis, D. D. Tortosa, C. D. Llorens, and J. A. Martínez-Mora, "Underwater Communication Using Acoustic Parametric Arrays," in *4th International Electronic Conference on Sensors and Applications*, 2018, pp. 1–7.
- [12] M. M. Campo-Valera, "Técnicas acústicas no lineales para las comunicaciones submarinas," Universidad Politècnica de Cartagena: Phd, 2020.



AAC Centro de Acústica Aplicada SL, es una ingeniería y consultoría independiente y privada, con más de 20 años de recorrido y amplia experiencia.

AAC Centro de Acústica Aplicada es además laboratorio de ensayo con un amplio alcance, acreditado por ENAC desde 1996. Amplia experiencia en proyectos de I+D+i, fruto del carácter innovador que ha caracterizado a la empresa desde su creación que también impulsa su proceso de internacionalización.



ACÚSTICA

RUIDO

VIBRACIONES

AEROACÚSTICA

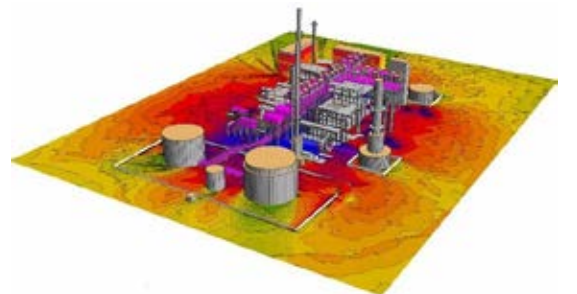
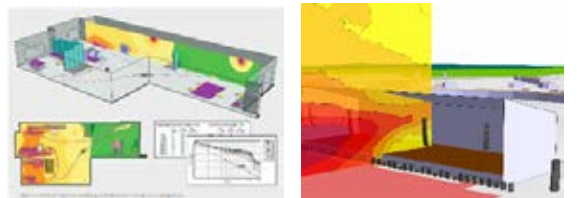
CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

Distribuidores para España y Portugal de SoundPlan

El modelo más completo para mapas de ruido en exteriores e interiores

Novedades de la nueva versión 8.2:

- **Building Acoustics Outside** completamente revisado según ISO 12354-3:2017 y DIN 4109:2016 / 2018, para obtener y optimizar **niveles en el interior** de los edificios **a partir de los niveles calculados en fachada**, teniendo en cuenta la transmisión que se produce con los aislamientos de la fachada, ventanas, etc.
- **Herramienta integral**. Única herramienta capaz de calcular:
 - Niveles en exterior a partir de focos en exterior
 - Niveles en interior a partir de focos en interior
 - Niveles en interior a partir de focos en exterior
 - Niveles en exterior a partir de focos en interior
- **Cálculos de conjuntos de altavoces** desde d&b audiotechnik GmbH, teniendo en cuenta la interferencia
- Las últimas normativas, incluyendo **CNOSSOS-EU**



La mejor solución para todas las necesidades de modelización del ruido:

SoundPLANnoise

SoundPLANessential