

## SIMULADOR DE UN CANAL ACÚSTICO DINÁMICO SUBACUÁTICO

43.30.RE

Aparicio Sosa, Joaquín<sup>(1)</sup>; Álvarez Franco, Fernando J.<sup>(2)</sup>; Jiménez Martín, Ana<sup>(1)</sup>;  
Sanz Serrano, Rebeca<sup>(1)</sup>; García Núñez, Enrique<sup>(1)</sup>; Diego Guijarro, Cristina<sup>(1)</sup>  
Institución: <sup>(1)</sup> Universidad de Alcalá; <sup>(2)</sup> Universidad de Extremadura  
Dirección: <sup>(1)</sup> Campus Universitario. Ctra. Madrid-Barcelona, km. 33,600, CP: 28805, Alcalá de  
Henares, España. Tel: +34918856921, Fax: +34918856591. E-Mail: {joaquin.aparicio,  
ajimenez, rebeca.sanz, enrique.garcia, cristina.diego}@depeca.uah.es  
<sup>(2)</sup> Facultad de Ciencias. Edificio de Física. CP: 06006, Badajoz, España. Tel: +34924289300  
(86830), Fax: +34924289543. E-Mail: fafranco@unex.es

### ABSTRACT

It is crucial to know the channel characteristics for developing an efficient communication system. This work presents the simulation of a dynamic model of an underwater acoustic channel, where the swell effect is taken into account, as well as the physical properties of the underwater channel. This swell effect causes a time-varying reflection of the acoustic signal, that leads to a Doppler spread and a time-varying impulse response.

### RESUMEN

En un sistema de comunicaciones eficiente, resulta crucial conocer las características del canal, reflejadas en su respuesta al impulso. En este trabajo se presenta la simulación del modelo dinámico de un canal acústico subacuático, donde se tienen en cuenta, aparte de las características físicas del medio subacuático para la transmisión de señales acústicas, los efectos del oleaje en la superficie. Este oleaje provoca que la reflexión de la señal acústica sea variable, causando una dispersión Doppler y que la respuesta al impulso sea variable con el tiempo.

### 1. INTRODUCCIÓN

Debido a que en numerosas aplicaciones en entornos subacuáticos el uso de cables no es económico o práctico, las comunicaciones inalámbricas, especialmente acústicas, han sido la solución empleada más asiduamente.

Las ondas acústicas presentan un comportamiento más favorable en el medio subacuático que las ondas electromagnéticas. Estas últimas se ven afectadas notablemente por la absorción del medio, de manera que a una frecuencia de 30 kHz dicha absorción es 1000 veces mayor que para una onda acústica a la misma frecuencia. Las ondas electromagnéticas en frecuencias ópticas sufren además de *scattering* y dispersión, de manera que el medio se vuelve opaco más allá de unos 200 m [1].

De forma general y en lo que respecta a la propagación de las ondas acústicas, el medio subacuático presenta unos efectos análogos al atmosférico. Además de la atenuación de la señal por divergencia geométrica o absorción, existen pérdidas por rebotes, variaciones en la propagación de la señal por cambios de las características del medio, o una presencia importante del multicamino y de ruido [2]. Hay que conocer la respuesta del canal en base a estos efectos para establecer un sistema de comunicaciones eficiente.

En este trabajo se presenta un modelo de propagación acústica para entornos subacuáticos, desarrollado en Matlab, que tiene en cuenta los procesos de atenuación de la señal, así como el multicamino y los efectos dinámicos introducidos por el oleaje. En este modelo dinámico se simulará el comportamiento de una señal modulada en BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) y consistente en un código Kasami de 255 bits. El uso de codificación permitirá, en una situación real, determinar con mayor exactitud el tiempo de llegada de la señal mediante un proceso de correlación.

En la sección 2 se repasan los parámetros fundamentales de la propagación acústica subacuática, mientras que en la sección 3 se presenta el modelo de canal subacuático y en la sección 4 se muestran diversas simulaciones realizadas. Por último, la sección 5 recoge las conclusiones y el trabajo futuro.

## **2. PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LA PROPAGACIÓN ACÚSTICA SUBACUÁTICA**

Se puede considerar que los parámetros fundamentales de la propagación acústica subacuática son dos: la velocidad del sonido, que tendrá una importancia crucial en la forma en que se propagan las ondas por el medio, y las pérdidas de transmisión, que muestran cómo se atenúan dichas ondas. Ambos parámetros se revisarán en las siguientes subsecciones.

### **2.1 Velocidad Del Sonido**

De forma teórica, la velocidad del sonido  $c$  se obtiene en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a partir de la ecuación de ondas lineal, dada en (1) [1], donde  $\gamma$  es el índice adiabático,  $B_T$  el módulo de compresibilidad isotérmico y  $\rho_0$  la densidad de equilibrio:

$$c^2 = \gamma \frac{B_T}{\rho_0} \quad (1)$$

Sin embargo, estas tres magnitudes dependen a su vez de la temperatura y la presión, de manera que evaluar la velocidad del sonido en función de estas tres variables resulta bastante complejo. Por tanto, a lo largo de los años han surgido numerosas expresiones semiempíricas, obtenidas fundamentalmente en agua salada, que permitían obtener la velocidad del sonido en función de la temperatura, la presión y la salinidad.

En el modelo desarrollado se ha empleado la ecuación de Chen y Millero (2) [3] por su amplio rango de validez, que permite emplearla incluso en agua dulce, además de ser el estándar reconocido por la UNESCO:

$$c(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P) \cdot S + B(T, P) \cdot S^{3/2} + D(T, P) \cdot S^2 \quad (2)$$

Donde  $S$  es la salinidad,  $T$  la temperatura y  $P$  la presión. Se recomienda consultar [3] para consultar el valor de las funciones  $C_w$ ,  $A$ ,  $B$  y  $D$ . Esta ecuación es válida para temperaturas entre 0°C y 40°C, salinidades entre 0‰ y 40‰ y presiones entre 0 bar y 1000 bar.

Una vez que se conoce el valor de la velocidad del sonido respecto a estas variables y conociendo como varían éstas respecto a la profundidad, se puede obtener la variación de la velocidad del sonido respecto a la profundidad, lo que se conoce como perfil de la velocidad del sonido. La Figura 1 muestra un perfil típico para latitudes medias en el océano, donde se obtienen diferentes regiones, en función del comportamiento que tenga la velocidad del sonido.

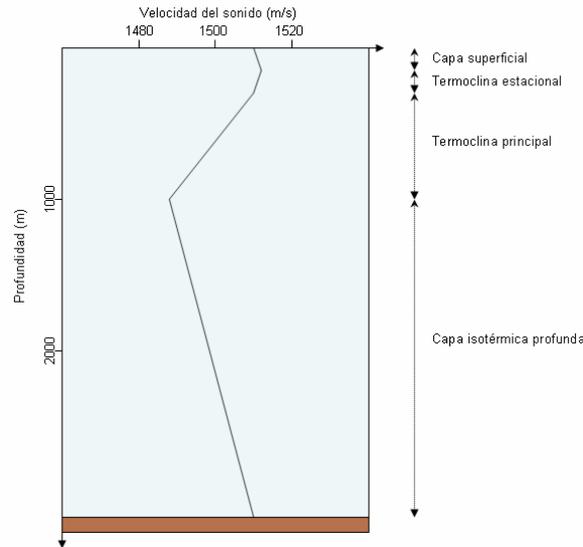


Figura 1. Típico perfil para latitudes medias en el océano

## 2.2 Pérdidas de transmisión

Mientras la señal acústica se propaga por el medio subacuático, perderá energía debido fundamentalmente a tres procesos: divergencia geométrica, absorción y rebotes tanto con la superficie como con el fondo.

La divergencia geométrica puede ser de dos tipos, en función de la forma en que se distribuya la energía por el canal: esférica o cilíndrica. Estas pérdidas por divergencia geométrica,  $TL_{geo}$ , se calculan en dB según (3) [4], donde  $k$  es una constante cuyo valor es 20, si la divergencia es esférica, o 10 si es cilíndrica, y donde  $r$  es la distancia que separa al emisor del receptor:

$$TL_{geo} = k \cdot \log r \quad (3)$$

Las pérdidas por absorción,  $TL_{abs}$ , se deben a la transferencia de energía de la onda al medio, en forma de calor. Estas pérdidas dependerán de la distancia que recorra la onda en metros,  $r$ , y del coeficiente de absorción del medio,  $\alpha$ . La ecuación (4) proporciona estas pérdidas en dB, donde el coeficiente de absorción empleado en el modelo ha sido el calculado de forma semiempírica por Francois y Garrison [5], dado en (5) en dB/km:

$$TL_{abs} = \alpha \cdot r \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (5)$$

Donde  $A_i$  y  $P_i$  son funciones que pueden depender del pH, salinidad, profundidad, temperatura y velocidad del sonido;  $f_1$  y  $f_2$  son las frecuencias de relajación del ácido bórico y el sulfato de magnesio en kHz, respectivamente, y  $f$  es la frecuencia de la señal también en kHz. Esta fórmula es válida para frecuencias entre 100 Hz y 1 MHz y está especialmente indicada para agua salada, pero a distancias de centenares de metros, el error cometido en las pérdidas de transmisión al considerar agua dulce es pequeño, del orden de milésimas o centésimas de dB.

La última contribución a las pérdidas viene dada por los rebotes de la señal acústica en la superficie y el fondo. Una de las expresiones más sencillas para calcular las pérdidas en la superficie,  $TL_{sur}$ , es la ecuación de Beckmann-Spizzichino (6) [6], que proporciona dichas pérdidas, en dB, a partir de la frecuencia de la señal en kHz,  $f$ , la velocidad del viento en la superficie en nudos,  $w$ , y el ángulo de incidencia de la señal respecto a la horizontal en grados,  $\theta$ .

$$TL_{sur} = 10 \cdot \log \left( \frac{1 + (f/b_1)^2}{1 + (f/b_2)^2} \right) - \left( 1 + \frac{90-w}{60} \right) \cdot \left( \frac{\theta}{30} \right)^2 \quad (6)$$

Donde  $b_1 = \sqrt{10} \cdot b_2$  y  $b_2 = 378 \cdot w^{-2}$ . Por otra parte, la expresión más sencilla para calcular las pérdidas de transmisión en el fondo,  $TL_{bot}$ , viene dada por el modelo de Rayleigh (7) [7]. Las pérdidas se obtienen en dB a partir de la densidad del agua  $\rho_1$ , la densidad del fondo  $\rho_2$ , la velocidad del sonido en el agua  $c_1$ , la velocidad del sonido en el material del fondo  $c_2$  y el ángulo de incidencia  $\theta$ .

$$TL_{bot} = 10 \cdot \log \left[ \frac{q \cdot \sin \theta - (n^2 - \cos^2 \theta)^{1/2}}{q \cdot \sin \theta + (n^2 - \cos^2 \theta)^{1/2}} \right]^2 \quad (7)$$

Donde  $q = \rho_2/\rho_1$  y  $n = c_1/c_2$ . Teniendo en cuenta todas estas contribuciones, las pérdidas de transmisión totales se calculan según (8), donde el signo negativo en  $TL_{geo}$  y  $TL_{abs}$  corrige el valor positivo de estas magnitudes:

$$TL = -TL_{geo} - TL_{abs} + TL_{bot} + TL_{sur} \quad (8)$$

### 3. DESARROLLO DEL MODELO DINÁMICO DE CANAL SUBACUÁTICO

Existen diversos modelos matemáticos empleados a lo largo de las últimas décadas para modelar la propagación acústica subacuática, como trazado de rayos, modos normales o ecuación parabólica. En [4] se puede consultar un resumen de los fundamentos de dichos modelos matemáticos.

En este trabajo se ha empleado un modelo basado en trazado de rayos. El modelo de trazado de rayos asume que la energía de la onda acústica se distribuye en caminos, por lo que se puede pensar en rayos en lugar de ondas. Esto será válido siempre y cuando la velocidad del sonido y la amplitud no varíen mucho en una longitud de onda, por lo que este modelo proporciona mejores resultados cuanto mayor sea la frecuencia. Se ha considerado aquí un modelo de trazado de rayos simplificado, dejando a un lado la matemática en que se basa por una versión puramente geométrica. Esto se ha podido hacer debido a que se asume que la profundidad no será mayor que unos 200 metros (aguas poco profundas), por lo que las variaciones de temperatura, salinidad y presión se pueden considerar despreciables, y por tanto la velocidad del sonido será constante, lo que provocará que los rayos tracen líneas rectas [8].

La velocidad del sonido, constante, se calcula según (2), mientras que las pérdidas de transmisión totales se computan según (8), donde se tienen en cuenta las contribuciones anteriormente descritas, y donde hay que notar que se ha considerado un fondo y una superficie planas, además de una divergencia geométrica esférica.

Se ha considerado también que la distancia entre emisor y receptor es lo suficientemente grande como para que lleguen múltiples caminos al receptor. De todos estos caminos, se consideran únicamente cinco, que serán los que sufren menos de tres rebotes entre las superficies, y son: camino directo, rebote en fondo, rebote en superficie, rebote en fondo y superficie y rebote en superficie y fondo. La distancia recorrida por estos rayos se puede obtener por trigonometría debido a que son líneas rectas y aplicando el método de las imágenes, según se muestra en la Figura 2, donde aparece el cálculo de la distancia para un camino directo,  $d_0$ , un rebote en superficie,  $d_1$ , y un rebote en el fondo,  $d_2$ ; las distancias para los otros dos caminos se calculan de forma análoga. Una vez que se conoce la distancia recorrida por cada rayo,  $d_i$ , se puede obtener el tiempo de propagación para cada uno,  $t_i$ , según (9):

$$t_i = \frac{d_i}{c} \quad (9)$$

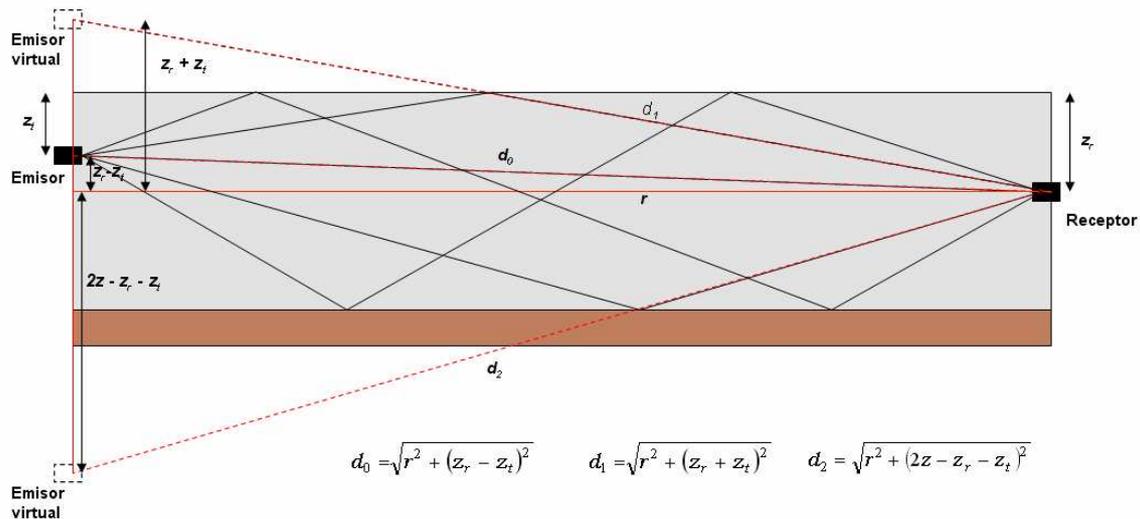


Figura 2. Esquema del montaje y camino recorrido por los cinco rayos

Aunque se ha comentado que la superficie de reflexión del mar (o lago, pantano, etc.) es plana, esta consideración se hace únicamente a efectos de calcular las pérdidas de transmisión por rebote. En este trabajo se tienen en cuenta los efectos dinámicos que introduce el oleaje, que provocará una superficie cambiante con el tiempo, por lo que el punto de reflexión también variará, lo que produce un ensanchamiento en frecuencia (*Doppler spread*) de la señal incidente en la superficie, que viene dado por (10) [9]:

$$B = 0.0175 \left( \frac{f}{c} \right) w^{3/2} \cos \theta \quad (10)$$

Donde  $f$  es la frecuencia de la señal,  $c$  la velocidad del sonido,  $w$  la velocidad del viento en  $m \cdot s^{-1}$  y  $\theta$  el ángulo de incidencia en la superficie. Todas las ecuaciones, así como el cálculo de las posiciones de los rayos, se ha desarrollado en Matlab. En el modelo dinámico considerado, se aplica el criterio dado en [10]: si no existe una componente claramente distinguible en

recepción proveniente del camino directo, el canal se considera de tipo Rayleigh, y en caso contrario, de tipo Rice. El cálculo de estas distribuciones estadísticas se realiza según funciones de Matlab [11]; si la distribución es Rayleigh, las entradas a la función son el periodo de muestreo de la señal, donde la frecuencia de muestreo se considera 10 veces la de la señal, las pérdidas de transmisión (8), los retrasos entre el camino directo y el resto de caminos, obtenidos a partir de (9), y el ensanchamiento Doppler (10). Si la distribución es Rice, además de estos parámetros hay que introducir también el k-Factor, que modela la importancia del camino directo respecto a los demás.

#### 4. SIMULACIÓN DE UN CANAL DINÁMICO SUBACUÁTICO

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos para simulaciones de diferentes canales dinámicos subacuáticos. Como datos comunes a todas las simulaciones, hay que destacar que la temperatura del agua se considera de 12°C con un pH de 7, la densidad del fondo es de 1941 kg·m<sup>-3</sup> y la velocidad del sonido en el fondo es de 1749 m·s<sup>-1</sup>, siendo la latitud del lugar 40.481389°. La señal emitida es una Kasami de 255 bits, con una frecuencia de 20 kHz, y el resultado es la correlación de la señal recibida con la secuencia original. Se considera un canal subacuático con una profundidad de 70 m, con el emisor a 10 m de profundidad y el receptor a 20 m, separados entre sí 900 m.

Dentro de esta gráfica de correlación, se pueden estudiar dos resultados:

- Desplazamiento de picos de correlación, debido a los efectos dinámicos, y definido como la distancia entre la posición del pico obtenido y el esperado teóricamente.
- *Sidelobe-to-Mainlobe Ratio*, SMR: definido para el camino directo como el cociente entre el valor máximo obtenido fuera del lóbulo principal y el valor máximo dentro del lóbulo (que será el pico de correlación). Es una medida de la facilidad con la que se podría detectar el pico de correlación: un valor próximo a 0 indica que el pico se detectaría con facilidad, mientras que un valor próximo a 1 indica que el pico es complicado de detectar.

Dada la condición estadística de las funciones utilizadas para las distribuciones Rayleigh o Rice, se han realizado 100 simulaciones para cada caso, de manera que se pueda obtener un valor medio del SMR. Así, las gráficas de correlación muestran las primeras 5 simulaciones, de manera que se pueda apreciar cómo varían los picos de una a otra.

El primer caso mostrado es el obtenido considerando el canal como de agua dulce, con una relación señal-ruido (SNR) de 70 dB. La densidad del agua es de 1000 kg·m<sup>-3</sup>. La Figura 3 muestra los resultados de correlación obtenidos para una velocidad del viento de 0.3 m·s<sup>-1</sup>, (a), mientras que en (b) se ha considerado una velocidad de 7 m·s<sup>-1</sup>.

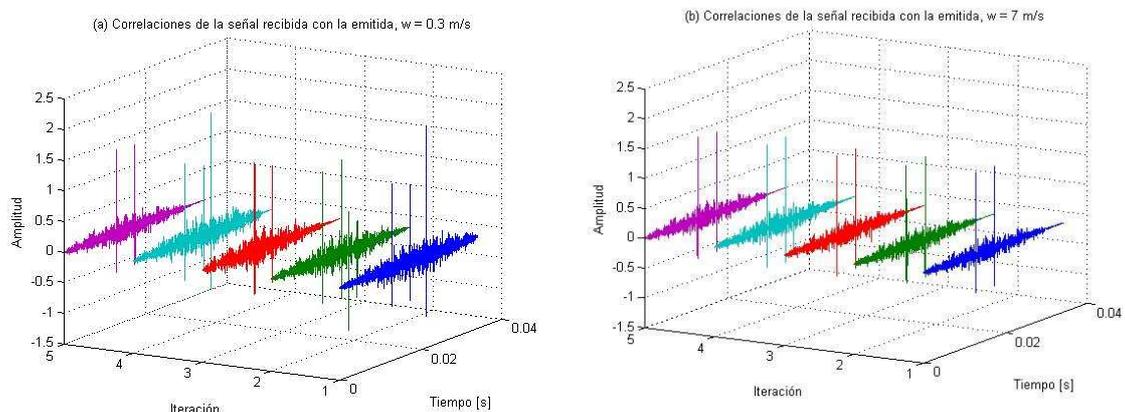


Figura 3. Correlaciones para una velocidad del viento de 0.3 m·s<sup>-1</sup> (a), y 7 m·s<sup>-1</sup> (b)

Para el caso (a), el valor SMR obtenido fue de 0.2507, mientras que para el caso (b), de 0.1969. Del caso (a) al (b) se puede apreciar la casi completa desaparición de varios picos, siendo siempre claramente visibles dos, que son los provenientes del camino directo y del rebote en el fondo, que no están afectados por la superficie del mar, que es la que introduce un mayor ensanchamiento Doppler en la señal al aumentar la velocidad del viento. Estos dos picos mantienen la misma forma y magnitud en ambos casos. El valor de SMR disminuye al perderse gran parte de los efectos de multicamino.

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos considerando geoméricamente el mismo canal, con los mismos casos de velocidad del sonido y SNR, pero ahora siendo agua salada, con una salinidad de 33‰ y una densidad de  $1024 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

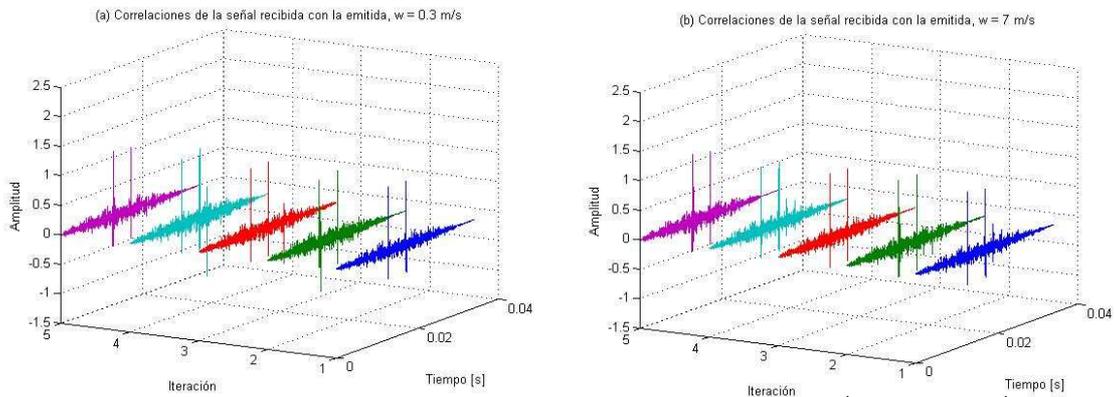


Figura 4. Correlaciones para una velocidad del viento de  $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (a), y  $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (b)

Respecto a la simulación anterior representada en la Figura 3, lo primero que se aprecia es una disminución en los valores de amplitud de los picos de correlación, debido al aumento de la absorción respecto al agua dulce. Nuevamente, en el caso (b) se aprecia una disminución considerable de los picos provenientes de rebotes en la superficie. El SMR para el caso (a) es de 0.2431, mientras que para el caso (b), de 0.1856, valores similares a la simulación anterior.

Por último, se ha estudiado también el efecto del ruido. Se han considerado las mismas condiciones que en la simulación anterior, pero ahora con una SNR de -5 dB, en lugar de los 70 dB anteriores. El caso (a) muestra los picos de correlación obtenidos para una velocidad del viento de  $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , mientras que (b) muestra los obtenidos para una velocidad de  $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

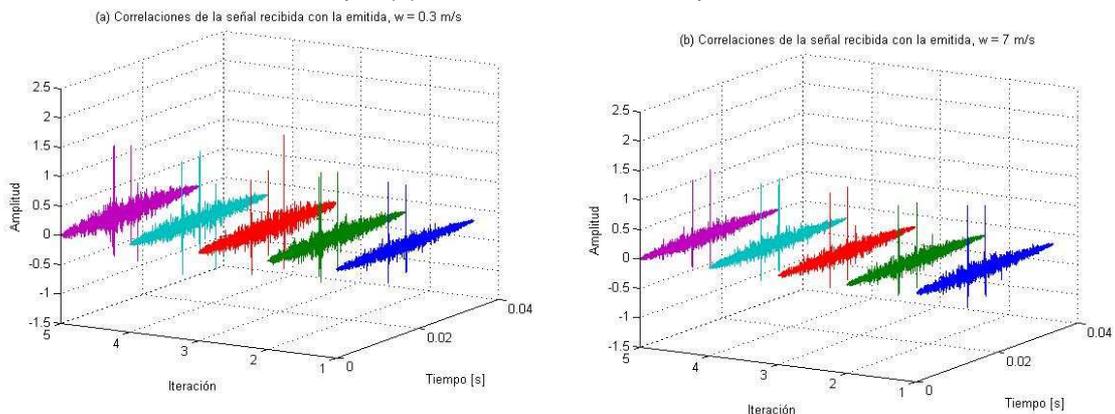


Figura 5. Correlaciones para una velocidad del viento de  $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (a), y  $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (b)

Los picos de correlación muestran aproximadamente la misma amplitud, aunque ahora el ruido de correlación es mayor, lo que resulta en unos valores de SMR más elevados en casos anteriores. En concreto, para el caso (a) el valor de SMR es de 0.2785, mientras que para el caso (b) es de 0.2255.

Respecto al desplazamiento de picos de correlación, no se ha observado este efecto en ninguno de los casos considerados en las simulaciones.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha presentado en este trabajo un modelo dinámico para canales subacuáticos desarrollado en Matlab, que tiene en cuenta el efecto del oleaje en la superficie. Las simulaciones realizadas muestran una tendencia clara hacia mejores valores de SMR para detectar las señales a medida que aumenta la velocidad del viento; este efecto parece deberse a la pérdida de las propiedades de las señales que rebotan en superficie, por lo que los efectos de multicamino disminuyen. Las señales se detectan por correlación hasta con valores de SNR de -5 dB, lo que indica unas condiciones de ruido muy desfavorables. Como trabajo futuro se plantea la inclusión de más efectos dinámicos que puedan estar presentes en un entorno subacuático, como turbulencias o cambios en la densidad; además se deberá considerar también una velocidad del sonido que sea variable con la profundidad, de manera que se contemple un perfil que marque la curvatura del camino seguido por los rayos y se pueda emplear el modelo en entornos de profundidades mayores que 200 m. Además, se pretende realizar una serie de medidas reales que permitan verificar la fiabilidad del modelo presentado.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al Ministerio de Ciencia e Innovación (TIN2009-14114-C04-01/04 y CIT-120.000-2009-01) y al soporte de la empresa GCM Communications Technology.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens y J.V. Sanders, "*Fundamentals of Acoustics*", 4ª ed. John Wiley & Sons, 2000.
- [2] F. Álvarez, J. Ureña, M. Mazo, A. Hernández, J.J. García y C. de Marziani, "*High reliability outdoor sonar prototype based on efficient signal coding*", en IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 53, No. 10, pp. 1862-1871, 2006.
- [3] Communication Technology. "*Technical Guides: Speed of Sound in Sea-water*": [http://www.commtec.com/Library/Technical\\_Papers/speedsw.pdf](http://www.commtec.com/Library/Technical_Papers/speedsw.pdf)
- [4] P.C. Etter, "*Underwater Acoustic Modeling and Simulation*", Taylor and Francis, 3ª ed., 2003.
- [5] M.C. Domingo, "*Overview of Channel Models for Underwater Wireless Communications Networks*", en Physical Communication, Vol. 1, No. 3, pp. 163-182, 2008.
- [6] R. Coates, "*An Empirical Formula for Computing the Beckmann-Spizzichino Surface Reflection Loss Coefficient*", en IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 35, No. 4, pp. 522-523, 1988.
- [7] R.J. Urick, "*Principles of Underwater Sound*", Peninsula Publishing, 3ª ed., 1983.
- [8] F. Fahy y J. Walker, "*Fundamentals of Noise and Vibration*", Spon Press, 1998.
- [9] J.G. Proakis, "*Encyclopedia of Telecommunications*", John Wiley & Sons, 2003.
- [10] X. Geng y A. Zielinski, "*An Eigenpath Underwater Acoustic Communication Channel Model*", en Proc. of IEEE OCEANS'95 Conference, Vol. 2, pp. 1189-1196, 1995.
- [11] C.D. Iskander, "A Matlab-based Object-oriented Approach to Multipath Fading Channel Simulation": [http://www.mathworks.com/matlabcentral/ftp\\_files/18869/1/ChannelModelingWhitePaper.pdf](http://www.mathworks.com/matlabcentral/ftp_files/18869/1/ChannelModelingWhitePaper.pdf)