

Resonancia de esferas huecas sumergidas en agua. Nivel de blanco y ancho de banda

Rafael CARBÓ y Adriana C. MOLERO
Instituto de Acústica, CSIC
Serrano 144, 28006 Madrid

Summary

It has been carried out a study of the acoustic resonance backscattering produced by a hollow elastic sphere submerged in water. It has been studied the effect produced by the material and by the thickness of the hollow sphere, on the maximum target strength reached at the resonance frequency. Also the effect produced on the bandwidth of the resonance frequency has been evaluated. The principal application of this work is to develop a target, easily detectable by its very high target strength. It is of main interest to work at the usual frequency band of the echosounders and fishing sonar.

Introducción

Para mejorar la detección de objetos sumergidos en el mar o enterrados en la capa sedimentaria superficial del fondo marino, se puede fijar al objeto sumergido reflectores acústicos con alto nivel de blanco. Ahora bien, estos dispositivos reflectores deberán cumplir ciertos requisitos: no deben tener dimensiones excesivas, deben ser acústicamente efectivos en cualquier ángulo de incidencia de las ondas, no deben alterar sensiblemente la flotabilidad del objeto al que se fija, deben soportar condiciones ambientales altamente corrosivas, y por último no deben suponer un coste excesivo.

Los estudios de retrodifusión (*backscattering*) por blancos sumergidos van encaminados normalmente, y en especial para aplicaciones militares, a buscar una geometría y unos materiales que minimicen el nivel de blanco y eviten la posibilidad de que se puedan excitar resonancias en su estructura, ya que intentan evitar ser detectados dentro del margen de frecuencias de uso común por los sonares. Existen otras aplicaciones, como la que aquí nos preocupa, en la que se busca todo lo contrario, que el blanco excitado por la onda acústica resuene con el mayor nivel de blanco posible y con una banda de frecuencias efectiva para las frecuencias sonar, de modo que sea fácilmente detectable.

Para un mismo volumen de blanco, la presión acústica de retrodifusión depende de la geometría, elasticidad y densidad relativa a la del agua, pues debe tomarse en consideración que parte de la energía acústica de la onda incidente penetra en el blanco. Esta energía de la onda transmitida a su vez, al menos parcialmente, retorna al agua con un retardo relativo respecto de la energía de la onda reflejada. Dicho retardo depende de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales en el blanco. La superposición de las sucesivas ondas que vuelven del blanco al agua dan lugar al fenómeno de la resonancia a ciertas frecuencias en las que los retardos coinciden con el periodo de la onda o alguno de sus múltiplos.

Cuando se considera un blanco rígido (impedancia acústica infinita) su nivel de blanco depende solo de la geometría que presenta su superficie externa. Urlick¹ da los niveles de blanco de objetos con diferentes geometrías: esfera, elipsoide, cilindro de longitud finita, placas rectangulares, circulares, etc. Este nivel de blanco es lo que se conoce como nivel de blanco geométrico donde el efecto de la resonancia no está considerado.

En el caso de blancos sumergidos en agua o enterrados en los sedimentos, los valores de la densidad y del

módulo de compresibilidad de los distintos materiales sólidos tienen un orden de magnitud similar a los del medio en que están inmersos (agua, arena, fango, etc.). Debe por lo tanto tenerse en cuenta que hay penetración de energía acústica de la onda incidente en el interior del blanco, y en consecuencia existirán frecuencias a las que el blanco resuene produciendo un nivel de blanco muy superior al nivel de blanco geométrico.

Para que el material de un blanco resulte efectivo como reflector acústico fuera de la resonancia, debe presentar un cambio de impedancia significativo respecto del medio que le rodea. Ambos extremos son válidos, materiales de muy alta densidad y de muy baja densidad pueden ser buenos reflectores. Los materiales densos como los metales con altos valores de impedancia acústica reflejan fuertes ecos en fase con la señal incidente, mientras que blancos huecos llenos de gas en su interior producen también fuertes ecos pero caracterizados por una inversión de fase entre el sonido incidente y su eco.

Una desventaja de los blancos huecos con paredes finas llenos de aire es la dificultad de asegurar que se mantiene la forma cuando crece la presión del agua. Blancos con paredes finas tienden a colapsar y se deforman a consecuencia de la presión hidrostática por lo que al cambiar de forma no mantiene sus características como reflector acústico.

Resonancias de esferas huecas

A la hora de estudiar un reflector acústico, parece adecuado comenzar con una esfera por ser la geometría más estudiada y fundamentalmente porque las propiedades de *backscattering* de una esfera homogénea no cambian cuando el blanco gira, es decir, la orientación de la esfera no es importante y el eco está determinado solamente por la posición de su centro relativo a la posición del sonar.

En el caso de configuración monoestática, la presión acústica de *backscattering* que produce una esfera puede escribirse en la forma²:

$$P_s = P_o r_o (a/2) f_\infty \exp[i(\omega t - kr) / r^2]$$

donde P_o es la presión de la onda incidente medida a la distancia r_o de la fuente acústica (el transductor del sonar), a el radio de la esfera, r la distancia del centro de la esfera al punto en que se mide la presión de *backscattering* P_s y f_∞ la función de forma. Para grandes distancias r de la esfera, Faran³ en el caso de esfera maciza y Hickling⁴ en el caso de la esfera hueca, dan la función de forma como sumatoria de modos de orden n .

$$f_\infty = (2/ka)^n \sum_{n=0}^{\infty} f_n$$

con

$$f_n = (-1)^n (2n + 1) \text{sen}(\eta_n) \exp(i\eta_n)$$

El ángulo de fase de los sucesivos modos depende de la densidad de la esfera, de las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales en la esfera, de su radio, del espesor de la pared y de la frecuencia⁴.

Una vez conocida la presión de *backscattering*, el nivel de blanco de la esfera TS viene dado por

$$TS = 20 \log [(Pr^s / Pr^o)] = 20 \log (a/2) + 20 \log (f_\infty)$$

donde TS está descompuesto en dos sumandos: el primero es el nivel de blanco geométrico de la esfera y el segundo es un término adicional que toma en consideración la elasticidad de la esfera y por tanto la penetración de energía acústica en su interior. Este segundo término del nivel de blanco es el que nos determina el efecto de resonancia de la esfera a determinadas frecuencias.

Tomando en consideración los requisitos antes mencionados que debe cumplir el blanco reflector en esta aplicación, teniendo en cuenta que los sonares normalmente utilizados en acústica subacuática radian en banda estrecha en frecuencias por debajo de los 200 kHz, y para evitar el uso de esferas con radio muy pequeño que llevarían a niveles de blanco geométrico muy bajos⁵, (la relación ka no debe ser inferior a 1)

se deduce que los márgenes de ka que debemos de estudiar deben llegar hasta 20.

En la tabla I se presentan las propiedades: densidad, velocidad longitudinal y transversal de propagación de campo acústico en el medio y coeficiente de Poisson, de los tres materiales estudiados, propiedades que modifican el campo retrodifundido, y con él las frecuencias de resonancia.

Tabla I. Características físicas de los materiales

Material	Densidad Kg/m ³	Velocidad longitudinal m/s	Velocidad transversal m/s	Coficiente de Poisson
Aluminio	2700	6420	3040	0.354
Acero	7700	5950	3240	0.289
Soderöl	1130	2440	1090	0.376

Mediante un laborioso programa de cálculo han sido computadas las curvas de variación del nivel de blanco con la frecuencia para una esfera maciza elástica sumergida en agua, de radio 0.019 m entre las frecuencias de 1 y 236 kHz para los materiales que se presentan en la tabla I. El nivel de blanco geométrico que corresponde a esta esfera es de $20 \log(a/2) = -40.4$ dB, valor al que tiende asintóticamente el nivel de blanco de la esfera rígida. En los materiales estudiados: aluminio, acero, y soderöl (una poliamida) las resonancias aparecen a altas frecuencias excepto para este último. De forma análoga se ha tratado el caso de la esfera elástica hueca (radio interior $b=0.8a$) con el interior lleno de agua. En la figura 1 se muestran las respuestas de backscattering de las distintas esferas en función de ka .

En la tabla II se presentan los valores de la frecuencia de resonancia, el nivel de blanco máximo alcanzado a esa frecuencia, y el ancho de banda de la resonancia, definido con una caída de 6 dB, para los tres

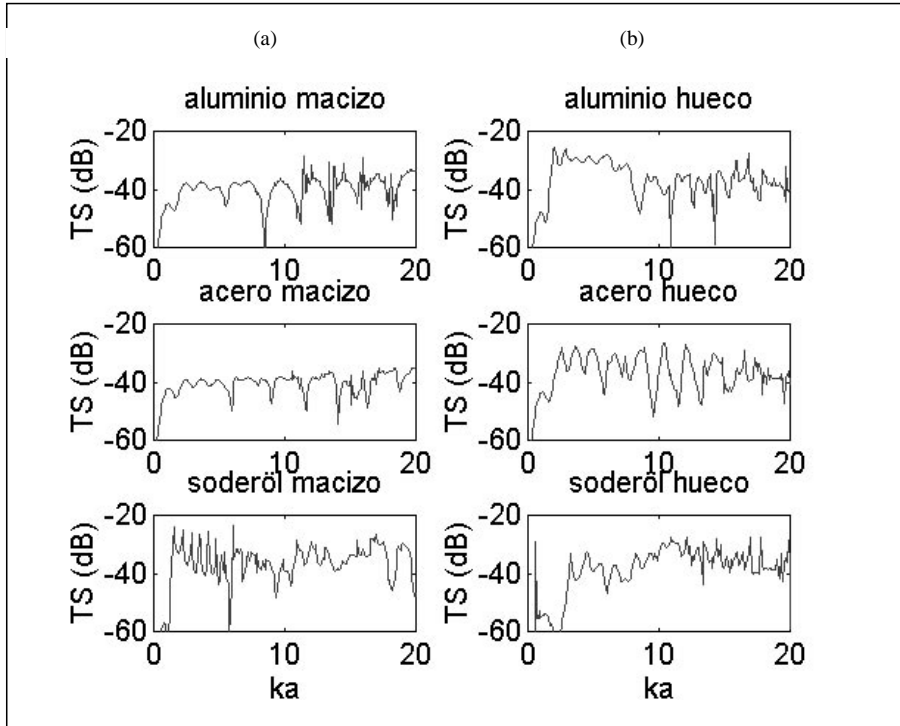


Fig. 1. Nivel de blanco de una esfera maciza (a) y hueca (b), en función de ka para aluminio, acero y soderöl. (Velocidad del sonido en el agua 1410 m/s, densidad del agua 1000 kg/cm³)

materiales estudiados en los casos de esfera maciza y hueca.

Tabla II						
Material	Nivel de blanco máximo (dB)	Macizo Frecuencia de rsonancia (kHz)	Ancho de banda (-6dB) (kHz)	Nivel de blanco máximo (dB)	Hueco Frecuencia de resonancia (kHz)	Ancho de banda (-6 dB) (kHz)
Aluminio	-37.3	85	29	-25.8	24	5.9
Acero	-38.5	74	23	-26.5	122	6.4
Soderöl	-23.9	18	2.6	-32.6	53	9.1

Discusión y conclusiones

Observando la respuesta en frecuencias representada en la figura 1, junto con los valores mostrados en la tabla II, se puede deducir que: para materiales metálicos de alta velocidad de propagación, el nivel de blanco máximo en el caso de esfera hueca, es del orden de 12 dB superior al nivel de blanco máximo de la esfera maciza, del mismo tamaño, y 14 dB por encima del nivel de blanco geométrico de la esfera rígida no resonante. Por el contrario, en el caso de materiales con baja velocidad de propagación como el soderöl, sucede que la esfera maciza en resonancia tiene un nivel de blanco máximo alrededor de 9 dB inferior al de la esfera hueca.

Las resonancias de las esferas metálicas huecas tienen un ancho de banda menor que las de esferas metálicas macizas, y al contrario, cuando el material es de baja velocidad las resonancias de las esferas huecas tienen un ancho de banda algo mayor que las de esferas macizas.

A la vista de este estudio, podemos decir que fijado el material de la esfera, bien modificando su radio y/o modificando el interior de la esfera (hueca llena de agua ó maciza), siempre se podrán encontrar unas condiciones de resonancia de la esfera coincidentes con la frecuencia de emisión del ecosonda. Por tanto, es posible conseguir el efecto que perseguíamos, que el nivel de eco de retrodifusión de la esfera alcance amplitudes superiores al nivel del impulso incidente, facilitando de este modo la detectabilidad de la esfera sumergida en agua, por métodos de acústica subacúatica.

Referencias

- 1.R.J.Urick. "Principles of underwater sound". Mc Graw Hill, NuevaYork. pp 273-277 (1975).
- 2.W.G. Neubauer, R.H.Vogt and L.R. Dragonette. "Acoustic reflection from elastic spheres. Steady state signals". Jour. Acous. Soc. Am. Vol 55, nº 6, pp 1123-1129 (1974).
- 3.J.J. Faran. " Sound scattering by solid cylinders and spheres". Jour. Acous. Soc. Am. Vol 23, nº4, pp 405-418 (1951).
4. R. Hickling. " Analysis of echoes from a hollow metallic sphere in water". Jour. Acous. Soc. Am. Vol 36, nº 5, pp 1124-1137 (1964).
5. C.S. Clay and H. Medwin."Acoustic oceanography". John Wiley and Sons, Nueva York, pp 178-194 (1977).