3

LAS PERDIDAS DE TRANSMISION EN LA PREDICCION ACUSTICA SUBMARINA

*Hernán Estrada B.**
Dr. rer. nat. Profesor Titular Departamento de Física
Universidad Nacional. Santafé de Bogotá

* Trabajo realizado durante el año sabático en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográfias. A.A. 982. Cartagena de Indias D.T y C., Colombia.

ABSTRACT

With help of the code PROPAS developed for the ARC, it is shown in an easy way the basic concepts of the Transmission Loss. This parameter is very important to predict the range of the SONAR.

RESUMEN

Con el programa PROPAS desarrollado para la predicción acústica submarina en la ARC se ilustra el concepto del parámetro de pérdida por transmisión (TL) necesario para la predicción del alcance del SONAR.

INTRODUCCION

Dentro del desarrollo de la oceanografía operacional el Centro de Investigaciones está elaborando un programa de predicción acústica submarina denominado PROPAS (Programa de Predicción acústica Submarina) con el fin de ser instalado en todas las unidades navales que realizan operaciones submarinas y antisubmarinas.

Con la ayuda de modelos matemáticos para el estudio de la propagación acústica, es de importancia determinar en forma precisa cómo la señal del sonido se debilita a medida que viaja en el medio oceánico. Este concepto de denomina pérdida por transmisión TL (Transmission Loss) y es un parámetro fundamental para poder determinar el alcance del SONAR.

En esta contribución se hacen algunos comentarios acerca del concepto de la pérdida por transmisión con el fin de ilustrar al lector sobre algunos de los resultados del programa.

CONCEPTO DE PERDIDA POR TRANSMISION

Una señal acústica que se propaga en el medio oceánico se distorsiona debido a la trayectoria que sigue y se atenúa por diferentes mecanismos de pérdida. En la acústica, la medida usual del cambio de la intensidad de la señal con el rango se denomina pérdida por transmisión (Transmission Loss) y está definida como la razón en decibeles de la intensidad acústica en $I(r,z)$ y la intensidad I_0 medida a un metro de distancia de la fuente, ésto se expresa matemáticamente como:

$$\mathbf{TL} = -10\log_{10}\frac{I(r,z)}{I_0} \qquad (1)$$

$$\mathbf{TL} = -20\log_{10}\frac{|p(r,z)|}{|p_0|}$$

En esta relación se ha considerado que la intensidad en una onda plana es proporcional al cuadrado de la amplitud de la presión.

Las pérdidas por transmisión pueden ser consideradas como la suma de las pérdidas debidas a la dispersión geómetrica y a la atenuación. Las perdidas por propagación son simplemente una medida del debilitamiento de la señal cuando se propaga hacia afuera de la fuente. En la figura 1 se indican dos geometrías de importancia en la acústica submarina. En la primera de ellas (figura 1-a) consideramos una fuente puntual en un medio homogéneo no acotado. Para este caso simple, la potencia radiada por la fuente se distribuye uniformemente sobre el área superficial de la esfera que rodea el emisor de sonido:

$$I \propto \frac{1}{4\pi R^2}$$

y por lo tanto se tiene en este caso, que la pérdida por *transmisión esférica* está dada según:

$$TL = 20\log_{10}(r) \qquad (2)$$

donde **r** representa la distancia horizontal en metros.

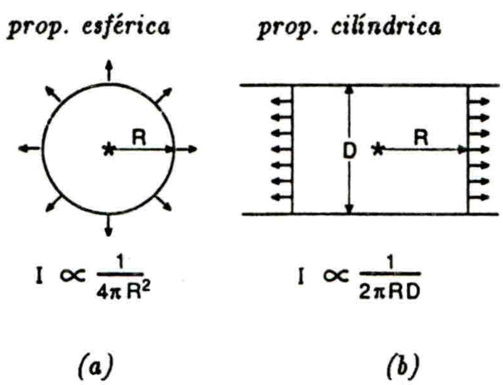

figura 1

Cuando el medio en el que ocurre la propagación tiene fronteras en la parte superior e inferior como es el caso de una guía de ondas (figura 1-b), el cambio de la intensidad en el rango horizontal es inversamente proporcional a la superficie de un cilindro de radio R y profundidad D:

$$I \propto \frac{1}{2\pi RD}$$

y en tal caso la pérdida por *transmisión cilíndrica* está dada por:

$$\mathbf{TL = 10\log_{10}(r)} \qquad (3)$$

Se debe tener en cuenta que para el caso de una fuente puntual en una guía de ondas, tenemos tanto propagación esférica para distancias $r \leq D$ (denominado el campo cercano) como propagación cilíndrica para grandes distancias $r \gg D$ (denominado campo lejano).

Como un ejemplo simple consideremos la propagación del sonido en una guia de ondas que tiene una profundidad de 1 km. Si deseamos conocer aproximadamente la pérdida por transmisión de la señal despreciando la atenuación a una distancia de 100 km encontramos que está dada por 60dB+50dB = 110dB. Este valor representa la pérdida mínima que se puede esperar a una distancia de 100 km. En la práctica, la pérdida es mayor debido a la atenuación del sonido en el agua y a diferentes pérdidas ocasionadas por la reflexión y la dispersión.

UNIDADES PARA TL

El decibel (dB) es la unidad dominante en acústica submarina y representa la razón de intensidades (no de las presiones) expresadas en términos de una escala logarítmica en base 10. Dos intensidades I_1 e I_2 tienen una razón en decibeles de:

$$\mathbf{10\log_{10}\left[\frac{I_2}{I_1}\right]}$$

Las intensidades absolutas se pueden expresar haciendo uso de una intensidad de referencia que se acepta actualmente es la intensidad de una onda plana que tiene una presión rms igual a 10^{-6} Pascales, también denominada micropascal μPa (1Pascal = N/m^2). Por lo tanto si tomamos 1μPa como la unidad de referencia del nivel de la intensidad acústica, una onda sonora que tiene una intensidad por ejemplo de 1 millón de veces la de una onda plana, tiene un nivel de $10\log_{10}(10^6)$ = 60dB re 1 µ Pa.

DETERMINACION DE LA PERDIDA DE TRANSMISION EN ACUSTICA SUBMARINA

En los modelos de predicción acústica, además de conocer las trayectorias que sigue la señal acústica emitida por una fuente, es de gran importancia determinar la forma como la señal se debilita a medida que se propaga en la guia de ondas. La determinación de este parámetro no sólo es de interés físico, sino que es de vital importancia para las aplicaciones navales. La variación de TL con la profundidad, la frecuencia de la fuente y la distancia permite a los sistemas de sonar activos y pasivos determinar la figura de merito (FOM) que representa el umbral mínimo para hacer reconocimiento de una señal en una operación de detección o identificación [1].

En el programa PROPAS (Programa de Predicción Acústica Submarina) desarrollado en el CIOH con el fin de hacer predicciones acústicas en los mares colombianos, se hace la determinación de la pérdida por transmisión de la señal utilizando la solución numérica de la ecuación de ondas para una fuente puntual monocromática por medio de la técnica matemática de la separación de variables.

Esta técnica, también conocida como de modos normales, ha sido de amplio uso durante muchos años en la acústica submarina. Para el lector interesado, hay una amplia revisión del método en el artículo de Perkeris [2] quien además, la mejoró para el caso de la modelización de una guia oceánica en la que el fondo se simula con la ayuda de un medio viscoelástico. Hoy en día, se han desarrollado técnicas numéricas muy eficientes que pueden tratar el problema de la propagación para un fondo oceánico con numerosas capas de fluidos y viscoelásticas [3].

Para la determinación de la pérdida por transmisión se construye la solución de la ecuación simplificada de ondas o ecuación de Helmholtz:

$$\nabla^2 p - \frac{\omega^2}{c^2} p = -\delta(z - z_f) \tag{4}$$

mediante los modos normales. En (4) **p** representa la presión de la señal acústica, **c** la velocidad de propagación del sonido en el medio oceánico que depende de la profundidad y $\delta(z - zf)$ representa la fuente puntual que está situada en el punto **z** que produce la señal con una frecuencia ω.

Los conjuntos de modos normales **Zj(z)** se determinan a partir de la técnica analítica estándar de la separación de variables [4] para la ecuación (4):

$$p(r,z) = \sum_{j=0}^{\infty} Z_j(z) R_j(r) \tag{5}$$

Al hacer la sustitución de esta expresión en la ecuación (3), se encuentra el problema de valores propios descrito por:

$$\frac{d^2 Z_j}{dz^2} + \left(\frac{\omega^2}{c^2(z)} - k_j^2 \right) Z_j = 0 \tag{6}$$

con las condiciones de frontera

$$Z_j(0) = 0 \,, \qquad \left. \frac{dZ_j}{dz} \right|_D = 0 \tag{7}$$

que representan la liberación de presión en la superficie y una reflexión en un fondo rígido situado a la profundidad D. La solución de (6-7) tiene un número infinito de soluciones que son denominados los modos normales. Ellos son caracterizados por una función **$Zj(z)$** y una constante **K_j^2** que es denominado el valor propio (Las 'frecuencias' asociadas con estos valores propios dan los números de onda asociados con la propagación modal).

Las ecuaciones para **$R_j(r)$** satisfacen:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dR_j}{dr}\right) + k_j^2 R_j = -Z_j(z_f)\frac{\delta(r)}{r} \tag{8}$$

cuya solución está dada en términos de la función de Hankel:

$$R_j(r) = Z_j(z_f)H_o^{(1)}(k_j r) \tag{9}$$

Al reemplazar las soluciones halladas en (5) se obtiene para la presión p:

$$p(r,z) = \frac{i}{4}\sum_{j=0} Z_j(z_f)Z_j(z)H_o^{(1)}(k_j r) \tag{10}$$

Si en esta expresión se considera además el desarrollo asintótico de la función de Hankel **$H_o^{(1)}(k_j\, r)$** para grandes distancias, se obtiene:

$$p(r,z) \approx \frac{ie^{-\pi/4}}{\sqrt{8\pi r}}\sum_{j=0} Z_j(z_f)Z_j(z)e^{ikr}/\sqrt{k_j} \tag{11}$$

Que corresponde a la aproximación denominada de campo lejano y considera que la propagación es cilíndrica en donde el término de fase y de amortiguación están relacionados con la parte real e imaginaria del valor propio respectivamente.

Aunque la suma para el campo de presión debe ser considerada en principio sobre todos los modos, la contribución de los términos de modos con muchos nodos disminuye rápidamente para grandes rangos lo mismo que los modos que tienen una parte imaginaria considerable.

En general se encuentra que esta solución es precisa para grandes distancias dependiendo del número de modos que se tomen en la sumatoria.

Con la solución numérica de la ecuación de ondas por el método antes descrito, el programa PROPAS determina la pérdida por transmisión (Transmission Loss) mediante:

$$\mathbf{TL}(r,z) = -20\log_{10}\left|\sqrt{\frac{2\pi}{r}}\sum_{j=0}^{\infty} Z_j(z_f)Z_j(z)\frac{e^{ik_j r}}{\sqrt{k_j}}\right| \qquad (11)$$

aquí la suma representa la adición de las soluciones propias que incluyen la fase que es conocido como suma coherente. En algunos casos es útil calcular una transmisión incoherente definida por:

$$\mathbf{TL}_{inc}(r,z) = -20\log_{10}\sqrt{\frac{2\pi}{r}}\sqrt{\sum_{j=0}^{\infty}\left|Z_j(z_f)Z_j(z)\frac{e^{ik_j r}}{\sqrt{k_j}}\right|^2} \qquad (12)$$

Esta última expresión de la pérdida de transmisión es apropiada para circunstancias de aguas someras en donde los modos normales del problema interactúan con el fondo. Debido a que las propiedades del espesor del fondo de nuestros mares no están muy bien conocidas, el patrón de interferencia predicho por el cálculo de pérdida de transmisión coherente no siempre tiene un sentido físico correcto.

RESULTADOS

Al ejecutar el programa PROPAS con los parámetros que se indican en la leyenda de la figura 2 se determina el parámetro TL para una guia de ondas con profundidad de 4000 mts, una fuente que emite a una frecuencia de ω = 600 Hz colocada a una profundidad de 100 mts. y un detector situado a una profundidad 1000 mts. Los datos de la lectura batitermográfica se indican en la parte superior derecha de la figura. Con estos datos se determina la velocidad del sonido mediante la relación de Chen-Millero, y su gráfica aparece a la izquierda de la lectura batitermográfica.

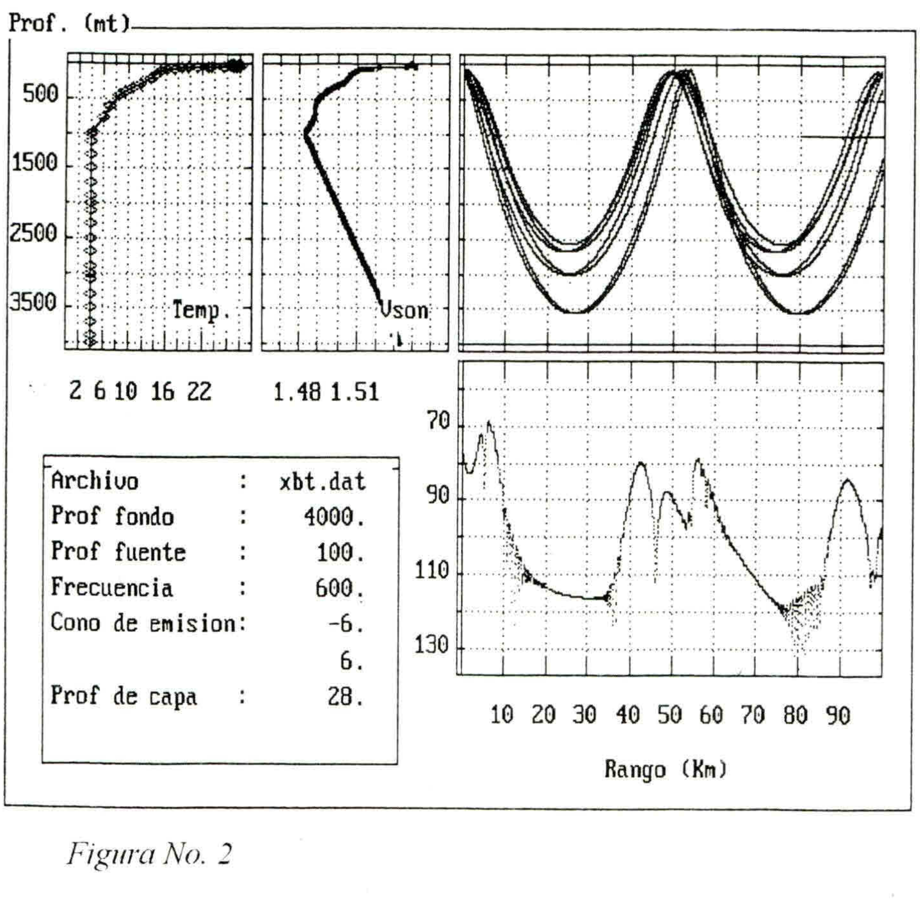

Figura No. 2

En la parte inferior derecha de la figura se indica la variación de TL en decibeles con la distancia horizontal (rango). Se aprecia el decrecimiento de la intensidad acústica a medida que el detector se aleja de la fuente, lo cual corresponde aproximadamente a un decrecimiento logarítmico y se observan además unos máximos que representan las regiones en donde la intensidad sonora es mayor. Al comparar la posición de estos máximos con la solución de la ecuación (4) por el método de rayos (parte superior derecha de la gráfica) [5], se nota que en la región de sombra del diagrama de rayos las pérdidas por transmisión son grandes mientras que en las regiones donde hay "rayos acústicos" las pérdidas por transmisión son pequeñas. Estas zonas de sombra y regiones de aumento de señal acústica resultan como una consecuencia de las interferencias de las funciones propias que son las soluciones de la ecuación de Helmholtz.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a los oficiales del CIOH y de la Armada Nacional por su colaboración para llevar a cabo el desarrollo del programa PROPAS. También agradezco a la Universidad Nacional de Colombia por concederme el tiempo para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

[1] Oceanography and acoustics prediction and propagation Models. Editors Allan Robinson, Ding Lee. American Institute of Physics. New York 1994.

[2] C. L. Pekeris. "Theory of propagation of explosive sound in shallow water" Geol. Soc. Am. Mem 27 (1948).

[3] H. Smith, F.B. Jensen. "A full wave solution for propagation in multilayered viscoelastic media with applications to Gaussian beam reflection at fluid solid interfaces" J. Acous. Soc 83. 571 (1988).

8

[4] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling "Numerical Recipes" Cambridge University Press (1986).

[5] H. Estrada B. "Modelos Computacionales en Acústica Oceánica". Boletín Científico CIOH No. 15, 3 (1994)