



O Conceito de Profundidade Efetiva para a Propagação Acústica em Águas Rasas

Luiz G. Guimarães (COPPE/UFRJ), Carlos E. Parente (COPPE/UFRJ),
Leonardo M. Barreira (IEAPM), Rosana B. Santiago (IF/UERJ)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the Twelfth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the Twelfth International Congress of The Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Resumo

Neste trabalho estamos interessados em estudar a propagação do som em águas oceânicas rasas. Mais especificamente, nós mostramos que os modelos de guia acústico ideal e o de Pekeris podem ser comparados se levarmos em conta a propagação de ondas evanescentes no fundo marinho. Essa analogia é feita introduzindo o conceito de profundidade efetiva para os modos do campo sonoro nesses meios.

In this work we deal with the problem of the sound propagation in shallow ocean waters. More precisely, we show that the classical ocean acoustic sound propagation models, namely, the Ideal and the Pekeris wave guide models have many similar features. This analysis can be developed if we take in to account the fundamental effect of the evanescent waves propagation into the seabed. The present analogy between the two models is based on the concept of the ocean effective depth related to excitation of the resonant sound propagation modes in these media.

Introdução

Em muitos casos o estudo da propagação do som no mar é realizado por meio de uma abordagem proveniente da óptica geométrica, o chamado traçado de raios. Os raios são traçados considerando-se a direção de propagação de uma onda plana, perpendicular à frente de onda (que é a superfície formada por pontos de mesma fase) e segue, basicamente, a lei de Snell (Munk, 1995). O traçado de raios permite uma rápida visualização da propagação em ambientes complexos (Medwin e Clay, 1998).

Em águas rasas, o fato da energia sonora estar “confinada” entre duas fronteiras – a superfície do mar e o fundo marinho – implica um estudo específico para a interação da energia acústica com tais interfaces, tendo em vista que a propagação em longas distâncias só será possível após múltiplas reflexões no fundo e na superfície. Considerando que o estudo da reflexão na superfície é enormemente facilitado pela significativa diferença entre as densidades (e as velocidades do som) nas duas camadas (a atmosfera pode ser bem representada pelo vácuo (Jensen et al., 1998)), nosso foco estará voltado, nesse trabalho, para os processos envolvidos numa onda acústica incidente no fundo marinho. O fundo marinho é um meio acústico e

essa interação deve ser tratada como um problema de propagação em meio heterogêneo (Jensen et al., 1998).

Nesse trabalho consideraremos a propagação acústica no guia de ondas de Pekeris (Pekeris, 1948), situado num nível de complexidade acima do nível do guia de ondas ideal. Abordaremos o interessante fenômeno das ondas evanescentes, originadas pelo deslocamento horizontal da energia acústica, no fundo marinho, antes que a energia retorne, finalmente, para a água do mar (Jensen et al., 1998). Concentraremos nosso trabalho nos casos em que os ângulos de incidência são maiores que o ângulo crítico, a partir do qual ocorrem reflexões totais – necessárias para propagação acústica a grandes distâncias (utilizaremos o referencial vertical para a medida do ângulo de incidência).

Demonstraremos que o fenômeno pode ter uma abordagem bastante simples por meio da definição de um fundo ideal (reflexão total com inversão de fase), numa “profundidade efetiva”, maior que a real, calculada com base nos parâmetros físicos do problema, sendo dependente da frequência e do ângulo de incidência.

Modelo Teórico

Na modelagem da propagação do som em águas rasas utilizamos, inicialmente, o chamado guia de ondas ideal (fig.1), que é basicamente uma representação do ambiente marinho composto por uma camada homogênea de água, caracterizada por uma densidade constante ρ_1 e um perfil de isovelocidade c_1 , com fronteiras superiores e inferiores planas, paralelas e homogêneas, formadas por superfícies “liberadoras de pressão” (*pressure release*) onde a pressão acústica se anula. A escolha dessa condição de fronteira para o fundo marinho, embora possa causar estranheza numa primeira impressão, é uma boa aproximação considerando-se que um fundo “penetrável” reflete aproximadamente como uma superfície livre para certos valores do ângulo de incidência (Jensen et al., 1998). Neste modelo idealizado, a propagação acústica pode ser vista como um mecanismo de interferência construtiva entre ondas multi-refletidas tais que, o critério de casamento de suas fases satisfaz à seguinte equação:

$$\frac{\omega}{c_1} D \cos \theta_i = n \pi \quad (1)$$

Onde, ω é a frequência angular, c_1 é a velocidade do som no oceano, D é a profundidade local, θ_i o ângulo de incidência enquanto que o número inteiro n é dito o índice do modo (ou simplesmente, modo) de propagação, e relaciona-se com o número de vezes que a pressão alcança valores máximos à medida que a profundidade varia.

Por outro lado, no modelo de Pekeris (fig.2) o fundo é

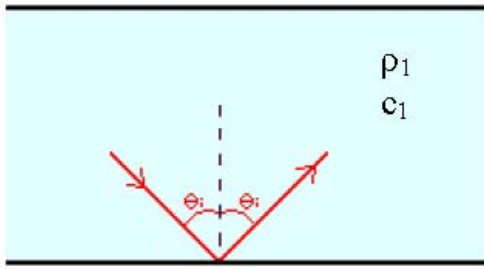


Figura 1: Esquema de um guia de ondas ideal para a propagação em águas rasas. A reflexão de uma onda acústica no fundo, ou na superfície, é especular.

tratado de forma mais realista, sendo representado por um meio fluido semi-infinito caracterizado por uma densidade ρ_2 e uma isovelocidade c_2 . Neste caso, a energia pode ser transmitida através da interface do fundo e, portanto, introduzindo uma perda na propagação acústica do guia de ondas (Jensen et. al., 1998). No caso em que os valores numéricos de c_2 são superiores ao de c_1 , estas perdas são atenuadas por "reflexão interna total" para ângulos de incidência superiores ao ângulo crítico dado por:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{c_1}{c_2}\right) \quad (2)$$

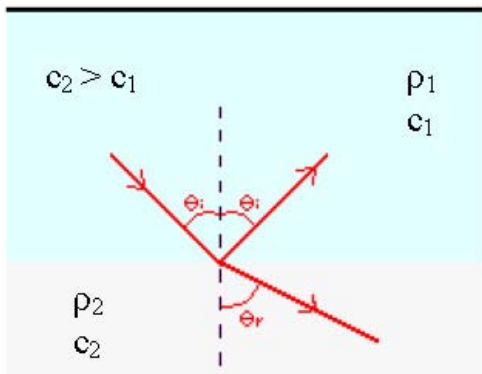


Figura 2: Modelo de Pekeris para a propagação do som em guia de ondas. O fundo é representado por um meio fluido semi-infinito.

Complementando à acústica geométrica, pode se mostrar por meio da teoria ondulatória, que para ângulos de incidência θ_i superiores a θ_c , a energia sonora de cada modo se propaga no fundo marinho como uma onda evanescente até uma "profundidade efetiva",

$$\mathcal{D}(\theta_i) \equiv D + \Delta\mathcal{D}(\theta_i) \quad (3)$$

onde o incremento $\Delta\mathcal{D}$ de penetrabilidade do som no fundo oceânico depende do ângulo de incidência θ_i da onda e é dado explicitamente por:

$$\Delta\mathcal{D}(\theta_i) \equiv \frac{c_1 \sec \theta_i}{\omega} \arctan \left[\frac{\rho_2}{\rho_1} \cos \theta_i \left(\cos^2 \theta_c - \cos^2 \theta_i \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

Na verdade, o modelo descrito acima vai ao encontro do fato de que, para ângulos de incidência superiores ao ângulo crítico, a reflexão, apesar de total, não é especular, havendo um deslocamento não nulo no fundo, antes que a onda refletida seja emitida novamente à água do mar (fig. 3), no fenômeno conhecido como *head wave* (Jensen et. al., 1998), proveniente da propagação de um campo evanescente no leito marinho.

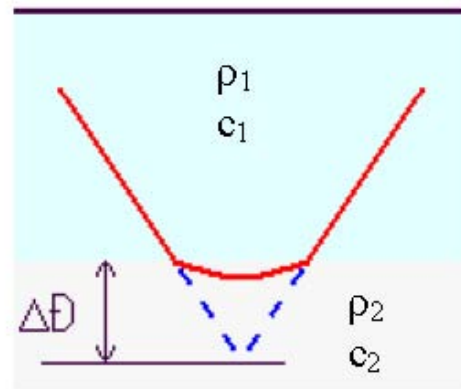


Figura 3: Esquema do deslocamento espacial entre a onda incidente e a onda refletida, associado à presença de ondas evanescentes, e a indicação do incremento em profundidade $\Delta\mathcal{D}$ relativo à fase da onda refletida.

Dentro desta analogia entre os modelos de guia acústico ideal e Pekeris, podemos re-escrever a equação modal para Pekeris de forma similar à eq(1) supondo que agora a profundidade do meio é a efetiva(3), isto é:

$$\frac{\omega}{c_1} \mathcal{D}(\theta_i) \cos \theta_i = n \pi \quad (5)$$

Para cada valor de n , a equação transcendental acima para o ângulo de incidência θ_i tem que ser resolvida numericamente. Entretanto, uma boa estimativa inicial para $\Delta\mathcal{D}$ (independente do ângulo de incidência) se comporta aproximadamente como:

$$\Delta\mathcal{D} \approx \Delta\mathcal{D}^0 = \frac{c_1 \sec \theta_c}{\omega} \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (6)$$

Desta forma, para alguns ângulos de incidência θ_i apresentaremos abaixo, como resultado, a solução numérica obtida para o guia de ondas de Pekeris, considerando que seus modos satisfazem à equação(5) para uma dada "profundidade efetiva" $\mathcal{D}(\theta_i)$.

Resultados e Discussões

Considerando que o parâmetro que desejamos determinar, para caracterização da propagação por modos, é o ângulo de incidência θ_i e que a fórmula final obtida apresenta uma "profundidade efetiva" $\mathcal{D}(\theta_i)$ que também é função

do ângulo de incidência θ_i , a resolução da equação transcendental(5) da propagação num guia de Pekeris foi realizada aplicando-se o método de Newton (adotando-se (6) como estimativa inicial para $\Delta\mathcal{D}$), com sucessivas reiterações até uma convergência em 10^{-10} . Para tanto foi confeccionada uma rotina Fortran para um guia de ondas de Pekeris com as seguintes variáveis (amplamente utilizadas na bibliografia): $c_1 = 1500\text{m/s}$; $\rho_1 = 1000\text{kg/m}^3$; $c_2 = 1800\text{m/s}$; $\rho_2 = 1800\text{kg/m}^3$; $D = 100\text{m}$; e frequência de 50Hz. Os resultados podem ser visualizados na tabela(1):

n	$\Delta\mathcal{D}_0(\text{m})$	θ_i^0	Iter	$\Delta\mathcal{D}(\text{m})$	θ_i	$\Delta\theta$
1	15.55	82.55	5	15.08	82.51	7.77
2	15.55	74.95	6	14.02	74.74	8.22
3	15.55	67.08	6	12.94	66.52	8.68
4	15.55	58.72	8	12.71	57.83	-

Tabela 1: Os ângulos aqui mostrados foram calculados em graus.

Uma vez que, no caso aqui descrito, o ângulo crítico foi de 56.44graus (veja eq.2), nota-se da tabela(1) que apenas os 4 primeiros modos foram excitados. Vemos também que o algoritmo numérico acima proposto convergiu rapidamente, pois o número de iterações “Iter” foi sempre inferior à uma dezena. Na terceira coluna da tabela(1), o ângulo θ_i^0 é a estimativa inicial para ângulo de incidência θ_i obtida através de $\Delta\mathcal{D}_0$. Nota-se então desta tabela que $\Delta\mathcal{D}_0$ é uma estimativa boa para os modos de ordem n mais baixa. É também interessante observar da tabela(1), que para dois modos guiados de ordens consecutivas quaisquer, a separação angular $\Delta\theta$ entre seus ângulos de incidência varia na casa dos 7 a 9 graus. Portanto em experimentos reais, pequenas variações verticais na posição da fonte sonora, podem gerar, sérios problemas na propagação dos modos, fazendo mesmo que algum modo deixe de ser excitado. A partir daí podemos ter uma idéia da complexidade dos problemas de inversão acústica para determinação de parâmetros físicos da água do mar (Tomografia Acústica, por exemplo), onde campos sonoros medidos por hidrofones são comparados por campos provenientes de uma modelagem acústica supostamente precisa, onde por exemplo, a estabilidade e o posicionamento da fonte são considerados como conhecidos ao longo de todo desenrolar do experimento.

Conclusões e Perspectivas Futuras

Nesse trabalho, estudamos a propagação acústica num guia de ondas de Pekeris sob a ótica do traçado de raios. Demonstramos que é possível a determinação de uma “profundidade efetiva”, maior que a real, onde a reflexão total das ondas incidentes pode ser considerada especular, sem desconsiderar o fenômeno das ondas evanescentes.

A aplicação do conceito de “profundidade efetiva”, na modelagem da propagação acústica, aplicada a cenários mais complexos, poderá vir a ser uma ferramenta útil no aprimoramento da precisão de modelos à base de propagação de raios, hoje bastante preteridos pelos modelos de modos normais acoplados, quando na presença de ambientes variáveis com o tempo e a distância.

Nossos esforços futuros vão na direção da verificação da

quantidade de energia dissipada nas ondas evanescentes e no apuro da técnica para a aplicação em modelos simples e precisos de propagação acústica, com baixo custo computacional.

Agradecimentos

Este trabalho tem apoio parcial do projeto *Ocean Acoustic Exploration (OAEEx – 230855, EU Marie-Curie program FP7 IRSES)*.

Referências

Munk W., Worcester P., Wunsch C. 1995, *Ocean Acoustic Tomography*, Cambridge Monographs on Mechanics.
 Medwin H. e Clay C.S. 1998, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic Press.
 Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H. 1993, *Computacional Ocean Acoustics*, AIP series in Modern Acoustics and Signal Processing.
 Pekeris C.L. 1948, *Theory of Propagation of Explosive Sound in Shallow Water*, Geol. Soc. Am., Mem.27.