



Propagação acústica em águas profundas na presença de massas d'águas de mesoescala na costa sudoeste de Portugal

Luiz Gallisa Guimarães, Inst. de Física-UFRJ, Carlos Eduardo Parente, PENO-COPPE/UFRJ, Sergio Manuel Machado Jesus, SiPLAB/Univ Algarve, Orlando Camargo Rodríguez, SiPLAB/Univ Algarve.

Copyright 2009, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica. This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009. Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th 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

Este trabalho baseia-se no estudo da propagação sonora em águas oceânicas profundas na costa Portuguesa. Mais especificamente, baseados em resultados obtidos pelas teorias de traçado de raios bem como pela de modos normais, analisaremos as alterações na propagação acústica devido à passagem de uma massa d'água de mesoescala. Mostraremos que tal massa d'água dá origem à um acoplamento entre dois guias acústicos distintos.

This work deal with the problem of the ocean acoustic propagation in the Southwest Coast of Portugal. This is a well know region where the subduction of warm Mediterranean water occurs. This very important oceanic phenomenon introduces special features in the ocean sound propagation. Here, we try to explain some of these features based on the ray tracing framework and the normal modes theory applied for sound propagation in deeper waters.

Introdução

É bem sabido que em águas profundas, não se pode mais considerar a velocidade de propagação do som no oceano como constante (Jensen et al. 1994). Desta forma, para se descrever corretamente a propagação acústica em oceanos profundos, é necessário se utilizar na equação de onda perfis de velocidade do som que variam com a profundidade e em certos casos mais drásticos, se faz necessário levar em conta também variações da velocidade em outras direções (Jensen et al. 1994; Munk 1974; Brekhovskikh 1960). Boa parte destes modelos acústicos para águas profundas são fortemente baseados no modelo fenomenológico de Munk (Jensen et al. 1994; Munk 1974). Em geral, o comportamento da velocidade do som no oceano depende de vários fatores e sua determinação com acurácia é uma tarefa extremamente complexa, pois tal velocidade é função da pressão, temperatura, densidade e salinidade (Jensen et al. 1994; Brekhovskikh 1960). Estes fatores variam não só geograficamente como sazonalmente tornando tal estudo uma tentativa de modelagem “quase local” dos mesmos. Entretanto, como em média a maior variação destes fatores ocorre com a variação da profundidade oceânica, tem-se que a magnitude da velocidade do som é primordialmente uma função da profundidade. Além

disso, o som é uma onda e dependendo de como o perfil de velocidade varia com a profundidade, alguns efeitos ondulatórios relacionados ao transporte de energia e momentum podem se manifestar. Por exemplo, pode haver o aparecimento de regiões de grandes gradientes de pressão (cáusticas sonoras, difração e espalhamento por obstáculos (mudanças abruptas do fundo marinho, interações com ondas internas, etc...)) bem como, é possível o surgimento de regiões e direções de “fácil” propagação, nas quais a energia é preferencialmente transportada. Estes últimos são chamados de guias de onda e serão o principal objeto de estudo deste trabalho. Primeiramente, abordaremos o problema do guia de onda associado ao perfil de Munk e posteriormente, estudaremos os efeitos da passagem de uma massa d'água, em seu espectro acústico.

Propagação acústica para o perfil de Munk

Em uma primeira análise, vamos admitir que o oceano seja um meio acusticamente isotrópico e extratificado, onde o perfil de velocidade de Munk \tilde{c} esteja relacionado à temperatura e salinidade em uma dada profundidade z e a um conjunto de parâmetros fenomenológicos $\{c_{\min}; \varepsilon; d; L\}$ característicos de um dado oceano (Jensen et al. 1994; Munk 1974), a saber :

$$\tilde{c}(z; c_{\min}; \varepsilon; d; L) \equiv c_{\min} \left[1 + \varepsilon \left(2 \frac{(z-d)}{L} - 1 + \exp \left(-2 \frac{(z-d)}{L} \right) \right) \right] \quad (1)$$

Observa-se da eq(1) que em escalas de comprimento L a velocidade \tilde{c} tem uma extratificação exponencial. Além disso, nota-se que \tilde{c} atinge um valor mínimo c_{\min} a uma dada profundidade d e que para profundidades muito superiores a d , \tilde{c} cresce linearmente à uma taxa $2\varepsilon c_{\min}/L$ (veja fig(1)). O perfil de velocidade $\tilde{c}(1)$ é dito um “guia acústico” com um “plano focal” contendo a profundidade $z = d$ onde $\tilde{c} = c_{\min}$. Tal cenário é esboçado dentro de um contexto da teoria de raios na fig(2). Onde adotamos os seguintes valores típicos do atlântico norte para os parâmetros fenomenológicos $\varepsilon = 0.00737$, $c_{\min} = 1500m/s$ e $d = L = 1300m$.

Perfil acústico associado à mistura de águas do Atlântico com o Mediterrâneo

O Mediterrâneo, por ter em média profundidades menores que o Atlântico, possui taxas de evaporação maiores que as deste último. Sendo assim, quando as águas mornas e mais salinas do Mediterrâneo fluem através do estreito de Gibraltar para o Atlântico, por vezes se formam turbilhões com extensões da ordem de centenas

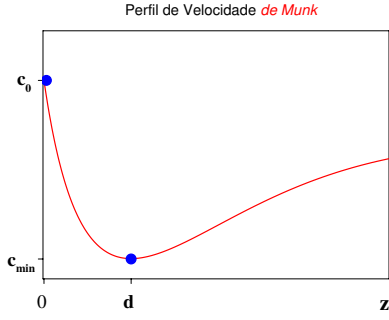


Figura 1: Comportamento do perfil de velocidade de Munk $\tilde{c}(1)$ quando a profundidade varia.

de quilômetros e algumas centenas de metros de espessura (Richardson et al. 2000; Relvas et al. 2007). Devido à sua densidade, essas grandes massas d'água girantes do Mediterrâneo encontram seu "ponto" de flutuação no interior do Atlântico em profundidades que variam de centenas de metros a quilômetros (Richardson et al. 2000; Relvas et al. 2007) (veja fig(3)). Essas enormes massas d'água são conhecidas na literatura por "meddies" (Mediterranean Eddies) e são temporalmente muito estáveis, podendo sobreviver por meses até anos (Richardson et al. 2000; Relvas et al. 2007). Durante sua "viagem" ao longo do Atlântico, elas chegam a transportar dois bilhões de toneladas de sal durante sua existência e têm um importante papel no balanço salino oceânico (Richardson et al. 2000). Tais massas d'água são preferencialmente encontradas na costa sudoeste Portuguesa, mas há relatos de observações de "meddies" em águas das Bahamas (Relvas et al. 2007). Do ponto de vista da acústica, essas massas d'água mornas e salinas introduzem um gradiente positivo de velocidade sonora ao longo de sua extensão volumétrica. Devido a este fato, o perfil de velocidade Munk (típico do Atlântico) se degenera em um perfil de dois guias acoplados, que denominamos aqui por perfil tipo "Duplo Munk" (veja fig(4)). Baseando-se na eq(1), podemos definir o perfil de Duplo Munk como:

$$\begin{aligned} \tilde{c}(z) \equiv & \tilde{c}(z; c_1; \varepsilon_1; d_1; L_1) \Theta[d_M - z] \\ & + \tilde{c}(z; c_2; \varepsilon_2; d_2; L_2) \Theta[z - d_M]. \end{aligned} \quad (2)$$

Na eq(2) Θ representa a função degrau de Heaviside, que conecta os guias através de um máximo local de velocidade c_M que ocorre no interior do "meddy" em uma profundidade $z = d_M$. Por outro lado, dados extrapolados a partir de perfis médios de velocidade sonora de "meddies" na costa sudoeste Portuguesa (Felisberto et al. 2007), sugerem os seguintes valores de ajuste para os parâmetros do perfil de Duplo Munk(2), a saber:

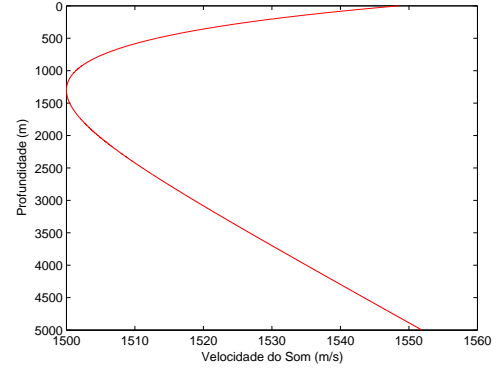
$$\begin{aligned} c_1 &= 1504 \text{ m/s}, \quad \varepsilon_1 = 0.00217, \quad d_1 = 363 \text{ m}, \quad L_1 = 350 \text{ m}, \\ c_2 &= 1503 \text{ m/s}, \quad \varepsilon_2 = 0.00650, \quad d_2 = 2030 \text{ m}, \quad L_2 = 1127 \text{ m}. \end{aligned}$$

E também para tais ajustes, possíveis valores da profundidade e velocidade associados ao máximo local são respectivamente dados por:

$$d_M = 1278 \text{ m}, \quad c_M = 1518 \text{ m/s}.$$

De posse destes valores numéricos, desenvolvemos para o respectivo perfil de duplo Munk(2), as teorias de traçados

a) Perfil de Munk com velocidade mínima em $z = 1300\text{m}$



b) Traçado de Raios: Fonte em $z = 1300\text{m}$

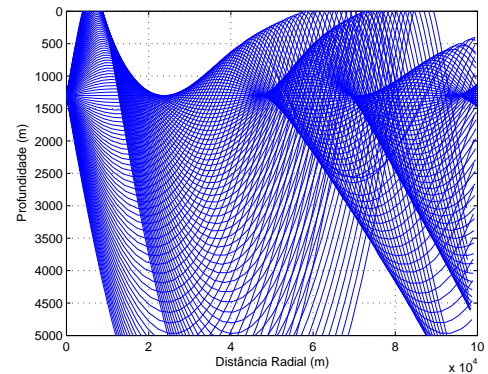


Figura 2: Mostra em a) um perfil de Munk típico do atlântico norte e em b) o traçado de raios para este perfil de velocidade.

de raios (Jensen et al. 1994; Brekhovskikh 1960) bem como, a teoria de modos normais para o cálculo da perda de transmissão acústica (Jensen et al. 1994; Brekhovskikh 1960). Resultados numéricos estes que passamos agora a discutir.

Devido à simetria cilíndrica do problema, o número de onda radial k_ρ é uma constante, além disso, podemos definir um ângulo de propagação $\theta(z)$ tal que,

$$k_\rho \equiv 2\pi f \frac{\cos(\theta(z))}{c(z)} = \text{constante}. \quad (3)$$

Admitindo-se que a frequência temporal f de emissão da fonte sonora é constante, tem-se que equação(3) acima é a lei de Snell Local para este tipo de problema e descreve a direção de propagação do raio (Jensen et al. 1994; eq.3.102 pág 168). Portanto, escolhendo a constante em (3) como positiva (direção de propagação radial positiva), tem-se que nos pontos de retorno há uma mudança de 180° na propagação dos raios na direção vertical z da profundidade, isto é:

$$\theta(z)|_{\text{ponto de retorno}} = (2n + 1)\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

Sendo assim, em uma teoria isotrópica de raios na qual a lei de Snell(3) é válida, observa-se os pontos de retorno de um guia, ou melhor dizendo, "visualiza-se" o próprio guia observando-se os "máximos" e "mínimos" locais das trajetórias dos raios. Desta forma, segue da figura(5a)

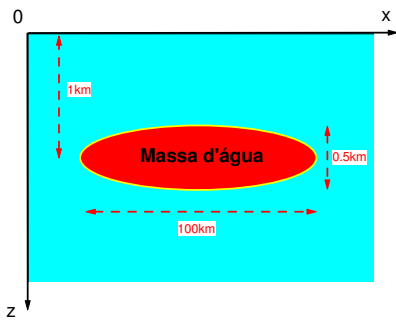


Figura 3: Mostra um esboço das dimensões características dos "meddies".

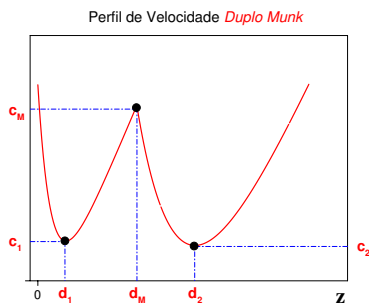


Figura 4: Mostra o comportamento do perfil de velocidade sonora como função da profundidade relativo a dois guias acusticamente acoplados.

de traçado de raios que quando a fonte está localizada no ponto de mínimo de velocidade sonora $d_1 = 363\text{m}$ visualiza-se duas famílias de pontos de retorno, uma limitada entre $0 \leq z \leq 1300\text{m} \approx d_M$ e a outra entre $0 \leq z \leq 4500\text{m}$. Portanto, dizemos que estas famílias de raios se propagam respectivamente nos guias *Raso* e *Grande*. Na figura(5b), quando a fonte se localiza em $d_2 = 2030\text{m}$, os raios se propagam apenas nos guias *Profundo* ($1300\text{m} < z < 4500\text{m}$) e *Grande*. Finalmente, na figura(5c) quando a fonte localiza-se em $d_M = 1278\text{m}$, os raios podem se propagar em todos os três guias. Nota-se também que "densidade de trajetórias raios" nesta figura(c) é bem maior que nas outras duas.

Por outro lado, é bem sabido que para baixas frequências, o cálculo das perdas de transmissão acústica obtido pela teoria dos modos normais nos fornece uma análise mais acurada do problema que a teoria de raios (Jensen et al. 1994; Brekhovskikh 1960). Desta forma, para uma frequência de 50Hz, mostramos na figura(6) nossos resultados numéricos obtidos com esta teoria aplicada ao perfil de velocidade sonora de duplo Munk(2). Mais precisamente, para a fig(6a) na qual a fonte está localizada na profundidade do mínimo de velocidade do guia raso, isto é em $z = d_1 = 363\text{m}$, esboça-se um mapa de cores (em dB) das perdas de transmissão em função da profundidade e da distância à fonte. Nota-se também da fig(6a), que a energia acústica é preferencialmente guiada ao longo do plano focal $z = d_1 = 363\text{m}$ do guia raso. De forma análoga, fig(6b) mostra que excita-se o guia profundo colocando-

se a fonte na profundidade $z = d_2 = 2030\text{m}$, valor este onde se atinge o mínimo de velocidade $\hat{c}(z = d_2) = c_2$. Entretanto, a fig(6c) mostra que se tem uma "sonificação" mais homogênea do oceano ao se colocar a fonte em $z = d_M = 1278\text{m}$, isto é, os três guias são simultaneamente excitados ao se colocar a fonte na profundidade $z = d_M$. Profundidade esta para qual a velocidade \hat{c} atinge o valor máximo local de c_M .

Conclusões e Perspectivas Futuras

Este estudo é uma tentativa inicial de modelagem e caracterização acústica de massas d'água de grandes extensões e estabilidade temporais que comumente circulam ao longo da costa oeste Portuguesa. Tais massas d'água conhecidas como "meddies" têm alto teor de salinidade e se originam a partir do estreito de Gibraltar da mistura entre as águas do Atlântico com as do Mediterrâneo, sendo o seu monitoramento de suma importância oceanográfica. Desta forma, mostramos que o perfil acústico dos "meddies" pode ser modelado por um perfil de velocidade sonora tipo duplo Munk descrito pela eq(2). Em seguida, tanto a análise baseada em traçado de raios quanto a teoria de modos normais para este perfil, mostraram que este possui realmente uma assinatura acústica de guias acoplados e que isso se evidencia principalmente ao se posicionar a fonte na profundidade para qual se tenha um máximo local do duplo Munk (veja as figuras(5c e 6c)). Pela peculiaridade de tal assinatura acústica dos "meddies", acreditamos que a mesma possa vir a ajudar no desenvolvimento de técnicas de sensoriamento acústico remoto de tais massas d'água.

Referências

Brekhovskikh, L. M., 1960, Waves in layered media: Academic Press.

Felisberto, P., S. M. M. Jesus, and P. Relvas, 2007, Acoustic inversion of the cold water filaments off the southwest coast of Portugal, in Proc. OCEANS 2007, 1–7.

Jensen, F. B., W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, 1994, Computational ocean acoustics: American Institute of Physics Press.

Munk, W. H., 1974, Sound channel in an exponentially stratified ocean, with application to sonar: The Journal of the Acoustical Society of America, **55**, 220–226.

Relvas, P., E. Barton, J. Dubert, P. B. Oliveira, Álvaro Peliz, J. da Silva, and A. M. P. Santos, 2007, Physical oceanography of the western Iberian ecosystem: Latest views and challenges: Progress In Oceanography, **74**, 149 – 173.

Richardson, P. L., A. S. Bower, and W. Zenk, 2000, A census of meddies tracked by floats: Progress In Oceanography, **45**, 209 – 250.

Agradecimentos

Este trabalho está inserido na rede de pesquisa OAEX (Ocean Acoustic Exploration, www.siplab.fct.ualg.pt/proj/oaex.shtml). Um dos autores (LGG) agradece ao CNPq pelo apoio financeiro parcial.

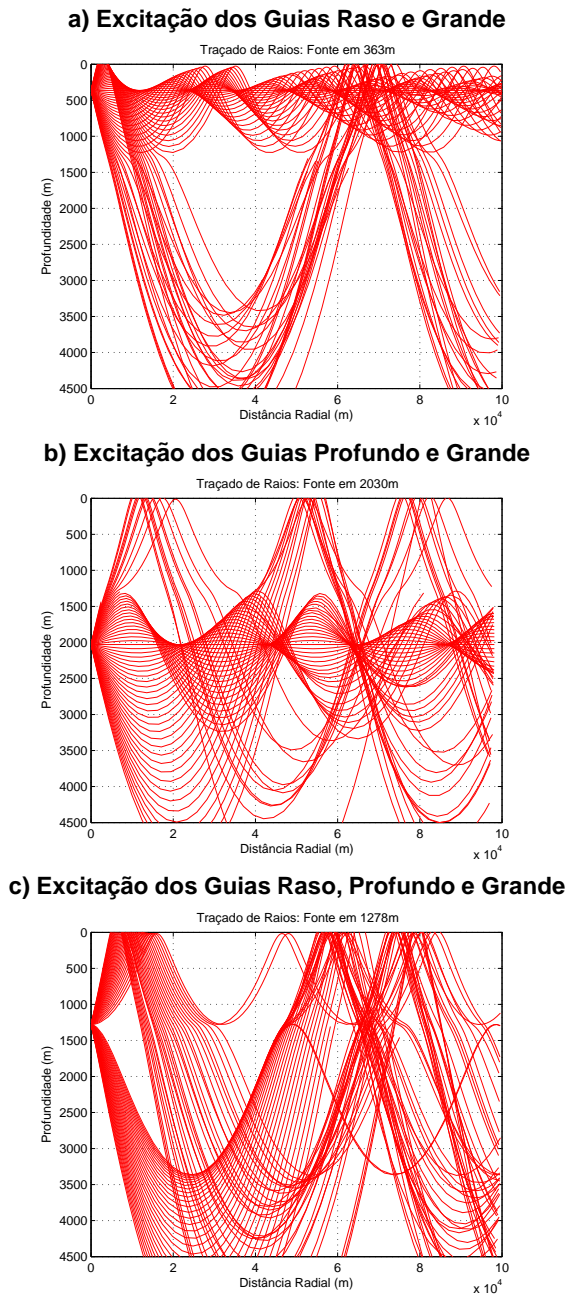


Figura 5: Mostra o traçados de raios para o perfil de duplo Munk(2) associados a “meddies” na costa sudoeste Portuguesa.

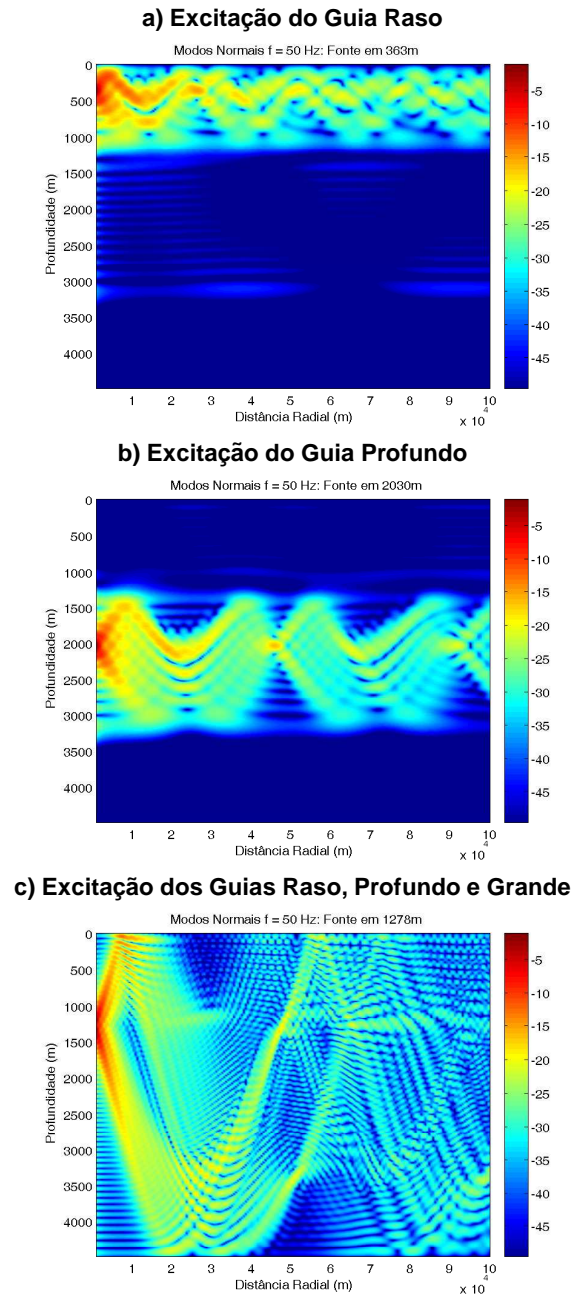


Figura 6: Mostra um mapa de cores da variação das perdas de transmissão acústica (em dB) calculada pela teoria dos modos normais para o perfil $\tilde{c}(2)$.