

PERDA NA PROPAGAÇÃO ACÚSTICA ATRAVÉS DE UM VÓRTICE CICLÔNICO DE MESOESCALA DA CORRENTE DO BRASIL

Vanessa Bach Rodrigues
Centro de Hidrografia da Marinha
vanessabach.r@gmail.com
Barão de Jaceguay, s/n Ponta da Armação Niterói

Fábio Contrera Xavier
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira
fabiofcx@gmail.com
Kioto, 253, Praia do Anjos, Arraial do Cabo

Leandro Calado
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira
leandro_calado@hotmail.com
Kioto, 253, Praia do Anjos, Arraial do Cabo

Resumo: Os vórtices ciclônicos de mesoescala são recorrentes na região sudeste do Brasil, principalmente ao largo da de Cabo Frio (RJ). Esta feição oceânica tem influência na dinâmica, nos processos oceanográficos, como a ressurgência, e na estrutura do microclima local da região. A influência da presença do vórtice ciclônico de Cabo Frio (VCF) na propagação acústica é uma possibilidade real, visto que esta feição tem estrutura termohalina com altos gradientes entre seu centro e suas bordas. Neste trabalho, foi quantificada sua influência no campo acústico submarino, através do acoplamento de um modelo hidrodinâmico (ROMS) - para simular o campo de velocidade do som - e um modelo acústico (Traceo) - para avaliar as perdas de transmissão. No modelo acústico foram realizadas propagações nas frequências de 100 e 1500 Hz. A presença do vórtice ciclônico de Cabo Frio alterou a estrutura da coluna d'água, através da inclinação positiva das isopícnais, levando águas de temperaturas mais baixas para superfície e, conseqüentemente, diminuindo a velocidade do som. O intenso gradiente de temperatura provocado por este vórtice de núcleo frio, refratou a energia incidente, aumentando as perdas de transmissão em 20 dB.

Palavras-chave: Vórtices; Perdas de Propagação; Modelagem Acústica.

Abstract: Mesoscale cyclonic eddies are recurrent features in southeastern Brazil, mainly in Cabo Frio (RJ). These oceanic features influences the dinamic of oceanographic processes, as the Cabo Frio upwelling, and the microclimate structure of the region. Besides that, it has a high termohaline gradient between the edges and the centre what affects the acoustic field. In this regard, the aim of this work is to evaluate the influence of Cabo Frio cyclonic eddy in the transmission loss, through the coupling of a hydrodynamic model (ROMS) - to simulate the sound speed field - and an acoustic model (Traceo) - to evaluate transmission losses. In the acoustic model was performed frequencies of 100 Hz and 1500 Hz. The presence of cyclonic eddy changed the structure of the water column, driving colder water to the surface in its centre and consequently decreasing the speed of sound. The intense temperature gradient caused by this cold core eddy, refracts the incident energy and implies in a transmission loss increase of 20 dB.

Keywords: Eddies; Transmission Loss; Acoustic Modeling.

1. Introdução

Uma onda sonora, no percurso da fonte até o receptor, pode se propagar por longas

distâncias, percorrer multicaminhos (causados pela reflexão e espalhamento) e sofrer mecanismos de perda (como a absorção por partículas suspensas). Isto depende das propriedades do meio (densidade), das interações com as fronteiras (superfície e fundo), da profundidade onde é colocada a fonte acústica e da frequência de emissão. A medida da mudança na intensidade do sinal desde a fonte até o receptor, na acústica submarina, é conhecida como perda de transmissão, do termo em inglês *transmission loss*.

Sabe-se que no contexto de propagação sonora na água a variável mais importante é a velocidade do som, que por sua vez, é determinada pela variação da densidade e consequente estratificação do oceano. A densidade provém a medida da estabilidade hidrostática do oceano e está relacionada à temperatura, salinidade e pressão [1]. As variações de temperatura e salinidade são muito utilizados na oceanografia para estudos relacionados às massas d'água; sendo assim, o conhecimento destas características pode auxiliar na compreensão em larga escala espacial e temporal da variabilidade do campo de velocidade do som no oceano [2].

Numa coluna d'água, as ondas acústicas sofrem efeitos diferentes como consequência das variações da velocidade do som. Na camada de mistura, a camada mais próxima da superfície, a temperatura é constante (influenciada pelas trocas de calor com a atmosfera e pela ação dos ventos e ondas), o que causa um gradiente de velocidade positivo. Esta camada homogênea, também conhecida como camada sônica, pode se comportar como um duto sonoro, propagando as ondas acústicas por longas distâncias [3].

Abaixo da camada de mistura encontra-se a termoclina, região da coluna d'água onde a temperatura diminui rapidamente com a profundidade; esta região é caracterizada por um gradiente negativo de velocidade do som. Há ainda, uma camada isotermal profunda abaixo da termoclina, onde a temperatura é constante e a velocidade do som aumenta com a profundidade. Entre o gradiente de velocidade negativo da termoclina e o gradiente positivo da camada isotermal profunda, está a região onde a velocidade do som é mínima; esta região é conhecida na literatura como zona de silêncio ou zona de sombra. Esta zona tem importância no contexto da guerra antissubmarino, já que alvos submarinos podem escapar à detecção navegando imediatamente abaixo da termoclina.

A perda do sinal pode ser potencializada quando as ondas acústicas encontram um intenso gradiente de temperatura e são refratadas, como o que ocorre na presença de frentes, vórtices e correntes. Codato [4] realizou simulações acústicas para avaliar o efeito da frente de ressurgência costeira de Cabo Frio nas características de propagação de um sistema de sonar ativo e os resultados indicaram que a feição de mesoescala não somente diminuiu a probabilidade de detecção de alvos, como bloqueou o sinal emitido. A influência de vórtice oceânicos de mesoescala na propagação de raios acústicos também foi observada por muitos autores [5, 6, 7, 8, 9 e 10]. Jian [11] avaliaram os efeitos na variação da velocidade do som induzidos por um vórtice anticiclônico no Mar do Sul da China e por três vórtices ciclônicos da Corrente do Golfo e encontraram variações na perda do sinal superiores a 20 dB induzidos pelas feições de mesoescala. Baer [12] calcularam a propagação do som em um vórtice ciclônico da Corrente do Golfo, com frequências de 25 Hz e 100 Hz e observaram que a presença do vórtice causou diferenças significativas no campo acústico.

Os vórtices ciclônicos na região do embaiamento de Santos, principalmente entre Cabo Frio e Rio de Janeiro são recorrentes. Estas estruturas oceânicas são parte da Corrente do Brasil (CB), que ocupa a região do talude continental sudeste do Brasil. Os vórtices são originados a partir de meandros da CB que se fecham em vórtices. Desta maneira estas feições apresentam estruturas termohalinas entre o seus centros e bordas com intenso gradiente térmico e halino. A estrutura horizontal do vórtice de Cabo Frio (VCF) é da ordem de 100 a 400 km. Gerando áreas de gradiente intenso que podem ser de 50 km ou mais. Este intenso gradiente, como encontrado em Codato [4]

para a ressurgência costeira de Cabo Frio, pode ter importante influência na perda do sinal acústico, quando atravessam estes vórtices ciclônicos.

Este trabalho pretende avaliar a influência da presença do vórtice ciclônico de Cabo Frio na propagação acústica, através do acoplamento de dois métodos de modelagem numérica: um modelo hidrodinâmico para simular o campo termohalino, e consequentemente o de velocidade do som; e um modelo acústico, para avaliar as perdas de transmissão. Cabe aqui ressaltar, que a presença de vórtices de mesoescala alteram significativamente a estrutura de densidade tanto da região oceânica quanto costeira. Logo, as características intrínsecas ao VCF podem conferir a este estudo um caráter singular, quando comparado a outros estudos de propagação do som em vórtices.

2. Materiais e Métodos

As propagações acústicas serão realizadas ao longo do VCF. Para isso, foi utilizado modelo numérico hidrodinâmico, o *Regional Ocean Modeling System (ROMS)*, para representar matematicamente a estrutura vertical e horizontal termohalina deste vórtice. Os resultados do modelo *ROMS*, utilizados por este trabalho, foram simulados no escopo do Projeto Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO) – IEAPM. Este projeto objetivou simulações realísticas da CB, em caráter sinótico, representando adequadamente o caminho da Corrente e de seus meandros e vórtices. A base das simulações foi baseada na técnica de Modelos Regionais Orientados por Feições (MROF).

Foi escolhido o dia 15 de fevereiro de 2012 para representar “realisticamente” o VCF nos experimentos acústicos (figura 1).

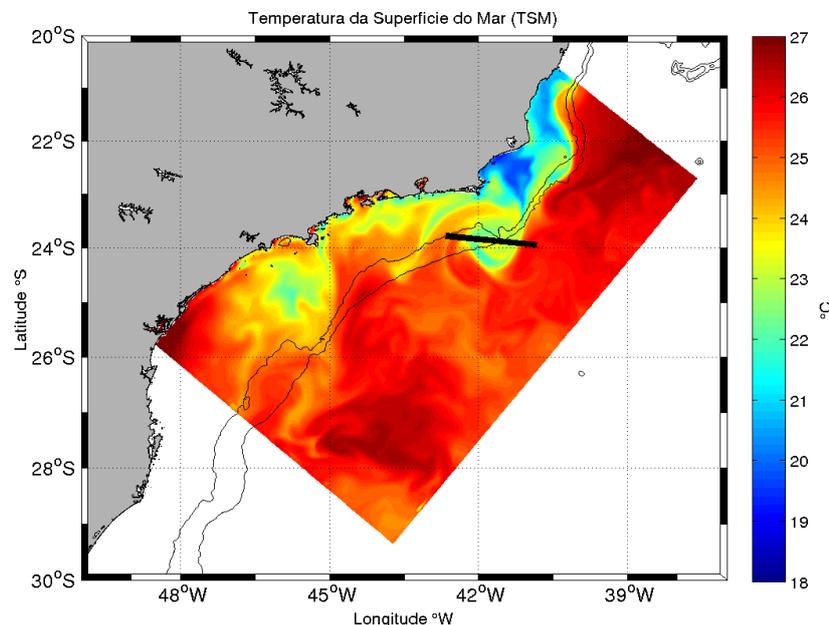


Figura 1. Seção horizontal da variação da temperatura da superfície do mar, resultado do modelo numérico ROMS para o dia 15 de fevereiro de 2012; e a localização da seção vertical ao longo do Vórtice de Cabo Frio (segmento preto ao longo da estrutura do vórtice).

Os dados termohalinos simulados pelo *ROMS* foram utilizados como dados iniciais do modelo de traçado de raios *Traceo*, de forma a verificar a influência do intenso gradiente de

temperatura do vórtice ciclônico de Cabo Frio na propagação do som. Esta influência foi analisada em termos de perda de propagação do som (*transmission loss*).

No modelo acústico foram realizadas propagações acústicas em frequências de 100 Hz e 1500 Hz. O vórtice apresenta uma extensão de aproximadamente 100 km, o que justifica a propagação em baixas frequências. A fonte foi posicionada no início do perfil, a uma profundidade de 5 metros. Foi adicionado o campo de velocidade do som - cujo cálculo foi obtido a partir do método de Chen e Millero [13].

Os dados de perda de propagação foram analisados considerando três situações: a) sem o vórtice (TL_{sv}), b) com a presença do vórtice ciclônico (TL_{cv}) e c) a diferença entre elas (TL_{dif}); onde r indica a distância e z a profundidade.

$$TL_{dif}(r,z) = \sqrt{TL_{sv}(r,z)^2 - TL_{cv}(r,z)^2}$$

3. Resultados e Discussões

A fim de observar a estrutura termohalina e as variações na velocidade do som da superfície ao fundo da coluna d'água, foi feita uma seção vertical ao longo de um perfil com a presença do vórtice de Cabo Frio e de um perfil sem o vórtice (figura 2).

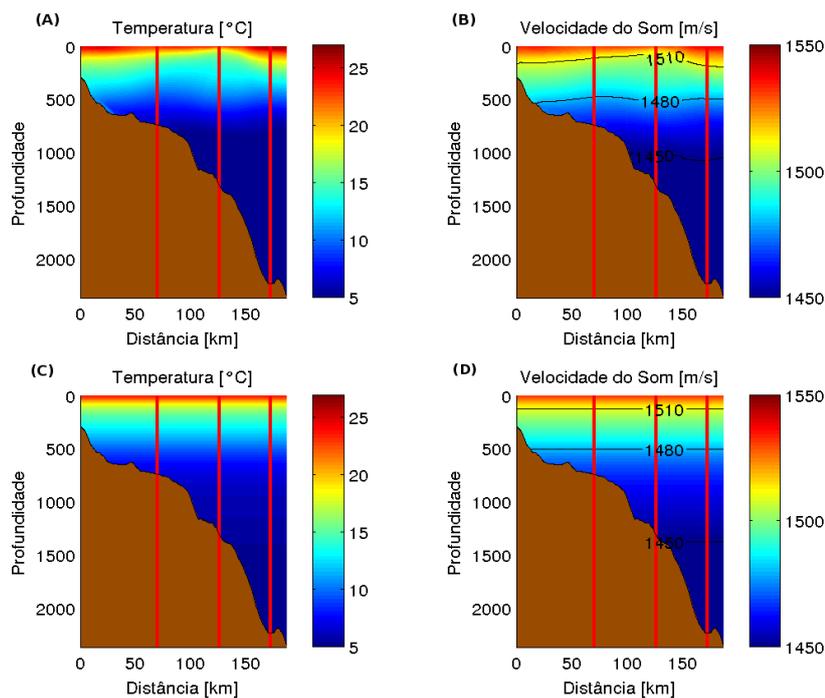


Figura 2. a) Perfil vertical de temperatura da água com a presença do VCF; b) velocidade do som com a presença do VCF; c) perfil vertical de temperatura da água sem o VCF e; d) velocidade do som sem o VCF. As linhas vermelhas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

O perfil sem o vórtice apresenta uma diminuição da temperatura e da velocidade do som com a profundidade. É notável uma estratificação vertical, sendo que as isolinhas de velocidade e

temperatura encontram-se em paralelo ao plano horizontal; caracterizando perfis típicos de temperatura e velocidade do som. Já o perfil com o vórtice, apresenta variações na velocidade do som vertical e horizontal. Como dito, a dimensão total do vórtice é de aproximadamente 110 km, com gradientes entre as bordas interna e externa de aproximadamente 55 km. Este gradiente é consequência da circulação ciclônica e núcleo frio, águas mais frias são elevadas em direção à superfície na região central, do vórtice. Com o intenso gradiente térmico, a estrutura da velocidade do som também é alterada. A ascensão de águas mais frias no centro do vórtice implica na consequente diminuição da velocidade do som, aumentando a perda de transmissão nesta região.

Após a obtenção dos perfis termohalinos simulados pelo ROMS, foram realizadas duas simulações acústicas, utilizando frequências de 100 Hz e 1500 Hz (figuras 3 e 4). Comparando as seções com a presença do vórtice e sem a presença do vórtice, é notável a influência dessa feição de mesoescala na perda de propagação do sinal.

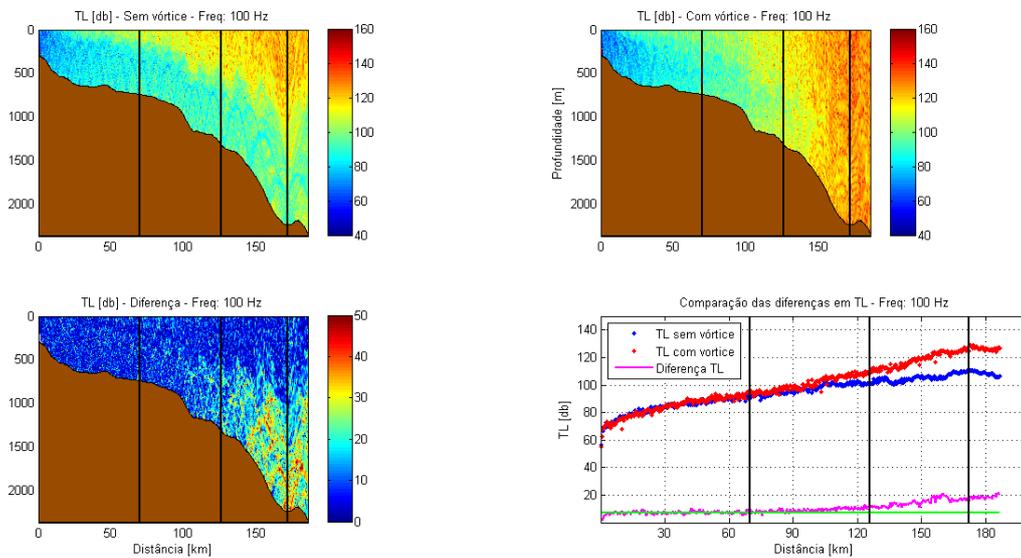


Figura 3. a) *Transmission loss* no perfil sem o vórtice; b) *transmission loss* no perfil com o vórtice; c) diferença de *transmission loss* entre eles; e d) variação média da TL ao longo do perfil; para um sinal emitido a uma frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. A linha verde indica o valor médio da diferença de TL até o início do vórtice (70 km).

As diferenças, entre as perdas de energia nas duas situações (com e sem o vórtice), iniciam-se a partir da borda do vórtice (à distância de 70 km do início do perfil) e torna-se ainda mais significativa no centro do vórtice (a 125 km de distância). No entanto, a maior perda ocorre entre 125 km e 180 km, visto que grande parte dos raios acústicos é refratada quando encontra a frente térmica externa do vórtice, onde o gradiente indica ser mais intenso, isso fica evidente na análise das diferenças de TL (Figura 4C).

De uma maneira geral, este padrão de perda de propagação ao longo do perfil na presença do vórtice foi observada nas duas frequências testadas. Em um outro estudo realizado em vórtices ciclônicos, observou-se que estes são responsáveis pela elevação das isotermas em 500 metros ou mais e, conseqüentemente, pela elevação da camada sônica [14]. A camada sônica diminui na presença de vórtices ciclônicos e no presente caso, é clara a diminuição da camada sônica em função da elevação das isopicnais em direção à superfície, principalmente, no centro do vórtice, a

125 km de distância do início do perfil (Figura 2).

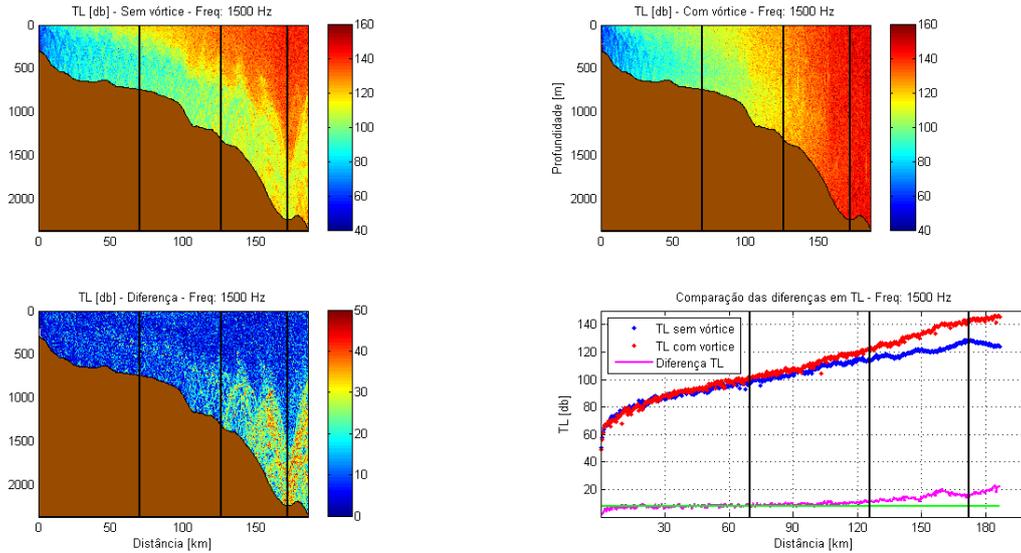


Figura 4. a) *Transmission loss* no perfil sem o vórtice; b) *transmission loss* no perfil com o vórtice; c) diferença de *transmission loss* entre eles; e d) variação média da TL ao longo do perfil; para um sinal emitido a uma frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. A linha verde indica o valor médio da diferença de TL até o início do vórtice (70 km).

Analisando as figuras da variação média de *transmission loss* ao longo dos perfis, observa-se que a perda era a mesma para ambos os casos (perfil com a presença e a ausência do vórtice) até a distância próxima ao início do vórtice. A partir de 70 km de distância, a perda de propagação começa a aumentar e torna-se maior ao longo do seção na presença do vórtice. Nos casos em que o vórtice não está presente, o som propaga-se por uma distância maior, onde as perdas são maiores devido as interações com as fronteiras do guia de ondas do que nos processos de atenuação na coluna d'água.

O valor médio máximo da perda para o sinal emitido na frequência de 100 Hz foi de 130 dB na presença do vórtice e de 110 dB na ausência do vórtice; e para a frequência de 1500 hz, foi de 145 dB na presença do vórtice e de 125 dB na ausência do vórtice.

4. Conclusão

A presença do vórtice ciclônico de Cabo Frio alterou a estrutura da coluna d'água, através da inclinação positiva das isopicnais, levando águas de temperaturas mais baixas para superfície e, conseqüentemente, diminuindo a velocidade do som. O intenso gradiente de temperatura provocado por este vórtice de núcleo frio, refrata a energia incidente e as perdas de transmissão tornam-se maiores.

A diferença nas perdas de propagação entre a seção com vórtice e sem vórtice foi a mesma nas duas frequências testadas. Dessa maneira, é possível inferir que a presença do vórtice provoca perdas de até 20 dB a mais que na ausência da feição. Estudos anteriores observaram que um vórtice ciclônico pode causar variações de 20 a 40 dB em um sinal emitido [11, 14 e 15]. A presença do VCF claramente aumentou a perda de propagação do som e pode influenciar na probabilidade de detecção de um alvo submarino.

5. Referências

- [1] Fofonoff, N.P. Physical properties of seawater: a new salinity scale and equation of state for seawater. *J. Geophys. Res.*, 90, 3332–42, 1985.
- [2] Etter, P. C. *Acoustic Modeling and Simulation*. Taylor & Francis Group. 3 ed. 447 pp, 2003.
- [3] Jones, A. D., Zinoviev, A., Greening, M. V. Greening. A Study of the Effects on Transmission Loss of Water Column Features as Modelled for an Area off the East Australian Coast. *Proceedings of Acoustics*. 7 pp, 2013.
- [4] Codato, G. A. S. Previsão numérica da perda do sinal acústico submarino na região da ressurgência costeira de Cabo Frio – RJ. Dissertação de mestrado, *Dinâmica dos Oceanos e da Terra*, Universidade Federal Fluminense, 2015.
- [5] Munk, W. and Wunsch, C. Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring. *Deep-Sea Res.*, 26, 123–61, 1979.
- [6] Vastano, A.C. and Owens, G.E. On the acoustic characteristics of a Gulf Stream cyclonic ring. *J. Phys. Oceanogr.*, 3, 470–8, 1973.
- [7] Lü, L. G., Qiao, F., Chen, H. X., Yuan, Y. L. Acoustic transmission in the cold eddy in the southern East China Sea . *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, 2006.
- [8] Weinberg, N.L. and Zabalgoatza, X. Coherent ray propagation through a Gulf Stream ring. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 62, 888–94, 1977.
- [9] LI ,J., Zhang, R., Liu, C., Fan, H. Modeling of ocean mesoscale eddy and its application in the underwater acoustic propagation . *Marine Science Bulletin* . Vol. 14 No. 1, 2012.
- [10] Parker, C. E. Gulf stream rings in the Sargasso Sea. *Deep-Sea*.18:981–93,1971.
- [11] Jian,Y.J; Zhang, J; Liu, Q.S; Wangc, Y.F. Effect of Mesoscale eddies on underwater sound propagation. *Applied Acoustics*. Elsevier:432-440, 2009.
- [12] Baer, R. N. Calculations of sound propagation through an eddy. *J Acoust Soc Am*; 67:1180-5, 1980.
- [13] Chen, C. T; Millero, F.J. Speed of sound in seawater at high pressures. *J. Acoust. Soc. of Amer.*, 62 (5), 1129-1135, 1977.
- [14] Itzikowitz, S., Jacobson, M. J., Siegmann, W. L. Short-range acoustic transmissions through cyclonic eddies between a submerged source and receiver . *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 71, No. 5, 1982.
- [15] Heathershaw, A.D. & Stretch, C. E. Coupled ocean-acoustic model studies of sound propagation through a front . *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 89. No. 1, 1991.