



LOCALIZAÇÃO DE FONTES SONORAS SUBMARINAS UTILIZANDO TIME-REVERSAL MIRROR E O MODELO DE RAIOS

*Capitão-Tenente Richard Barbosa Nobre¹
Capitão de Fragata (EN) Renato Peres Vio²*

RESUMO

Este estudo investiga o desempenho de um espelho de inversão temporal passivo combinado com a teoria de raios na localização de fontes sonoras submarinas. É desenvolvido um algoritmo com base nos modelos físicos e matemáticos e empregando métodos de processamento de sinais, de acordo com o princípio de reciprocidade do campo sonoro. O modelo de traçado de raios TRACEO foi utilizado para determinar a resposta impulsiva entre uma fonte sonora e um ponto do campo. O sinal transmitido é reconstruído ao realizar a convolução entre a resposta impulsiva do canal e os sinais recebidos pelo arranjo de hidrofones, invertidos no tempo. A posição com o máximo valor de correlação do sinal reconstruído é assumida como a localização da fonte. A eficácia do algoritmo foi testada com dados simulados e dados coletados durante o experimento CALCOM'10, avaliando sua eficácia e potencial de aplicação em sistemas de tempo real.

Palavras-chave: Localização. Fonte sonora submarina. Teoria de raios. Inversão temporal.

¹Oficial do Corpo da Armada, Graduado em Ciências Navais pela Escola Naval. Aperfeiçoado no Curso de Aperfeiçoamento em Superfície para oficiais. Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Acústica Submarina (PPGAS) do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM).

²Graduação em Engenharia Elétrica pela UNESP, mestrado em Engenharia Elétrica pela USP e doutorado em Engineering Acoustics pela NPS – US Navy, atualmente é militar do Corpo de Engenheiros da Marinha do Brasil, servindo no Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM).



ABSTRACT

This study investigates the performance of a passive time-reversal mirror combined with ray theory in localizing underwater sound sources. An algorithm is developed based on physical and mathematical models and employing signal processing methods, according to the reciprocity principle of the sound field. The ray tracing model TRACEO was used to determine the impulse response between a sound source and a field point. The transmitted signal is reconstructed by performing convolution between the channel impulse response and the signals received by the hydrophone array, time-reversed. The position with the maximum correlation of the reconstructed signal is assumed as the source location. The effectiveness of the algorithm was tested with simulated data and data collected during the CALCOM'10 experiment, assessing its efficiency and potential application in real-time systems.

Keywords: Localization. Underwater sound source. Ray theory. Time-reversal.

1. INTRODUÇÃO

A localização de fontes sonoras no meio submarino apresenta desafios complexos relacionados à propagação do som neste ambiente, como o desvio dos sensores causado pelas correntes oceânicas, a propagação fora da linha de visada resultante dos efeitos de múltiplos caminhos e o ruído ambiental. Entre os métodos de localização de fontes sonoras submarinas, os mais comuns são o método de triangulação e a técnica de formação de feixes acústicos.

O método de triangulação é baseado na diferença de tempo de chegada (TDOA, *time difference of arrival*), que calcula a diferença de tempo entre a chegada do som de uma fonte sonora em diferentes estações de medição e, em seguida, reverte esse cálculo para determinar a posição da fonte sonora (WU, 2010). No entanto, é necessário manter uma rigorosa sincronização de tempo entre as estações de medição, e a propagação do som no ambiente marinho pode resultar em fenômenos de refração e reflexão que podem introduzir erros de localização se apenas a diferença de tempo de chegada for considerada.

A técnica de formação de feixes acústicos é comumente utilizada em sistemas sonar, radares e comunicações. O método de adição de atraso (*delay-and-sum*) é uma técnica de formação de feixes frequentemente utilizada que pode melhorar a qualidade do sinal medido ou reduzir o ruído do sinal, tornando-o eficaz na localização de fontes sonoras mesmo quando o sinal acústico se degrada ao se propagar por longas distâncias no oceano (VALENCIA-PALMA, 2019). No entanto, a heterogeneidade do meio marinho pode causar distorções no processo de propagação do som, impedindo que os feixes se concentrem no alvo. Tanto a técnica de formação de feixes quanto o método de triangulação são suscetíveis aos efeitos de múltiplos caminhos em ambientes marinhos complexos, resultando na sobreposição de formas de onda e afetando significativamente a interpretação correta do sinal (FERGUSON, 1989). Além disso, os arranjos de sensores usados na técnica de formação de feixes geralmente são grandes e, portanto, mais caros para serem usados em aplicações de monitoramento passivo de fontes sonoras.

A técnica de localização passiva tem sido uma das direções de desenvolvimento essenciais na evolução da tecnologia de sonar. Se o equipamento de sonar puder fornecer dados de distância e profundidade, mesmo que sejam estimativas grosseiras, isso melhorará



consideravelmente a velocidade de convergência dos cálculos de software de armas em sistemas de combate. Além disso, também aumentaria a precisão da resolução de cálculos de movimento, melhorando, assim, a capacidade de ataque e segurança de embarcações.

Mais recentemente, o método de espelho de inversão temporal (TRM, *time-reversal mirror*), começou a ser aplicado na localização de fontes sonoras submarinas. O conceito por trás do método de TRM é reverter a série temporal dos sinais recebidos no receptor e transmiti-los de volta para a fonte sonora, permitindo que o receptor focalize a fonte sonora e elimine reflexões. O conceito de TRM se baseia no teorema da reciprocidade e na conjugação de fase, proveniente da ótica. O teorema da reciprocidade afirma que a luz refletida de longe seguirá o mesmo caminho de volta ao ponto de origem. Zel'dovich et al. (1985) basearam-se no teorema da reciprocidade para calcular a função do caminho ótico da propagação da luz, demonstrando características de retrofoco e determinando a posição da fonte de luz.

O som se propaga no oceano com uma atenuação muito pequena, sendo negligenciável para frequências abaixo de 1 kHz; a taxa de atenuação para ondas sonoras de 5 kHz em água do mar a 20 °C e 1 atmosfera de pressão é de aproximadamente 0,24 dB/km (DOONAN, 2003). Portanto, se o sinal de pressão acústica $P(r, t)$ recebido for invertido no tempo, o resultado $P(r, -t)$ também é uma solução para a equação linear de ondas. Jackson & Dowling (1991) realizaram experimentos de localização de fontes sonoras em ambientes marinhos reais, demonstrando a viabilidade do método de conjugação de fase para a localização de fontes sonoras submarinas. A inversão temporal consiste em inverter o sinal de pressão acústica $P(r, t)$ no tempo, o que fisicamente implica inverter a ordem temporal; enquanto a conjugação de fase envolve inverter o sinal de parte imaginária de um número complexo, implicando inverter a fase. Portanto, a inversão temporal no domínio do tempo é equivalente à conjugação de fase no domínio da frequência. A conjugação de fase também é aplicada em ultrassom (Prada, 1991).

A inversão temporal é uma maneira de lidar com o problema dos múltiplos caminhos de propagação, reduzindo a interferência entre os sinais e tornando a localização da fonte sonora mais precisa (DOWLING, 2005). Suas propriedades concentram a energia na posição da fonte sonora; portanto, é possível posicionar a fonte sonora considerando o local de energia máxima. O método de TRM pode ser dividido em ativo e passivo. O TRM ativo envolve o recebimento do sinal acústico por um arranjo de hidrofones, a inversão temporal do sinal e a retransmissão, seguido pelo recebimento do sinal por outro arranjo de hidrofones para determinar a posição da fonte sonora. Por outro lado, o TRM passivo utiliza o sinal acústico recebido e invertido temporalmente por um arranjo de hidrofones para calcular o campo de pressão acústica na área selecionada, identificando o máximo de pressão acústica como a posição da fonte sonora.

Existem essencialmente cinco tipos de modelos (soluções computacionais para a equação de onda) para descrever a propagação do som no mar: modelo espectral ou "Fast Field Program" (FFP), modos normais (NM), modelo de raios, modelo de equação parabólica (PE) e soluções de diferenças finitas (FD), ou elementos finitos (FE) da equação de onda (JENSEN, 2011). O modelo de raios é mais adequado para frequências sonoras mais altas (>1 kHz), sendo empregado na modelagem do ambiente para utilização do algoritmo de localização proposto neste estudo.



2. PRINCÍPIO DE RECIPROCIDADE DO CAMPO SONORO

A simetria da função de Green é um resultado do princípio geral de reciprocidade da acústica linear. Sejam $G_\omega(r, r_1)$ e $G_\omega(r, r_2)$ duas funções de pressão de Green que satisfazem as equações diferenciais:

$$\rho(r)\nabla \cdot [\rho^{-1}(r)\nabla G_\omega(r, r_1)] + k^2 G_\omega(r, r_1) = -\delta(r - r_1)$$

$$\rho(r)\nabla \cdot [\rho^{-1}(r)\nabla G_\omega(r, r_2)] + k^2 G_\omega(r, r_2) = -\delta(r - r_2)$$

Multiplicando a primeira equação por $G_\omega(r, r_2)$ e a segunda por $G_\omega(r, r_1)$, e subtraindo as duas, seguido pela integração sobre um volume V' , obtemos:

$$\frac{G_\omega(r_1, r_2)}{\rho(r_1)} - \frac{G_\omega(r_2, r_1)}{\rho(r_2)} = \int_{V'} \{G_\omega(r', r_2)\nabla \cdot [\rho^{-1}(r')\nabla G_\omega(r', r_1)] - G_\omega(r', r_1)\nabla \cdot [\rho^{-1}(r')\nabla G_\omega(r', r_2)]\} dV'$$

Usando integração por partes na forma da identidade de Green:

$$\int_V g\nabla \cdot f dV = - \int_V (\nabla g) \cdot f dV + \oint_S gf \cdot n dS$$

Com $f = \rho^{-1}\nabla G_\omega$, pode-se alterar a integral de volume para uma integral de superfície sobre a superfície S' do volume V' :

$$\frac{G_\omega(r_1, r_2)}{\rho(r_1)} - \frac{G_\omega(r_2, r_1)}{\rho(r_2)} = \int_{S'} \left\{ G_\omega(r', r_2)\rho^{-1}(r') \frac{\partial G_\omega(r', r_1)}{\partial n} - G_\omega(r', r_1)\rho^{-1}(r') \frac{\partial G_\omega(r', r_2)}{\partial n} \right\} dS'$$

Assim, a função de Green satisfaz a relação de reciprocidade:

$$\rho(r_2)G_\omega(r_1, r_2) = \rho(r_1)G_\omega(r_2, r_1)$$

se existir uma fronteira S' onde G_ω satisfaz as condições de contorno da fórmula:

$$\frac{\partial G_\omega(r', r)}{\partial n} - \eta(r')G_\omega(r', r) = 0$$

Onde $\eta(r')$ é um fator arbitrário.

As condições de contorno incluem tanto a condição de contorno de Dirichlet (onde $\eta(r') = \omega$), quanto a condição de contorno de Neumann (onde $\eta(r') = 0$).



A partir da função de Green, pode-se observar que o campo sonoro gerado por uma fonte depende apenas das posições relativas entre a fonte e o ponto de recepção. Se a fonte for colocada no ponto de recepção e vice-versa, o resultado será o mesmo. Isso é conhecido como o princípio de reciprocidade do campo sonoro (Jensen, 2011). Este princípio é uma característica de acústica linear, e indica a reversibilidade da propagação do campo sonoro entre dois pontos.

3. MODELO DE PROPAGAÇÃO DE RAIOS E PROBLEMAS NO CÁLCULO DO CAMPO SONORO

O modelo de propagação de raios representa o trajeto percorrido pelas ondas sonoras como a distância percorrida pelas linhas de raio; o tempo experimentado pelas trajetórias das ondas sonoras como o tempo de propagação das linhas de raio; e a energia transportada pelas trajetórias das ondas sonoras como a energia acústica propagada. A acústica de raios possui duas equações fundamentais: a equação de trajetória e a equação de intensidade. Quando a variação do índice de refração do meio é pequena em relação à escala de comprimento de onda, a acústica de raios pode ser aproximadamente expressa pelas seguintes equações:

$$(\nabla\tau)^2 = \left(\frac{c_0}{c}\right)^2 = k^2 \qquad (\nabla\tau)^2 + \frac{2}{A}\nabla A \cdot \nabla\tau = 0$$

Onde $A=A(x,y,z)$ é a amplitude da pressão sonora e $\tau=\tau(x,y,z)$ é a função de fase (ambos dependentes das coordenadas espaciais), e k é o número de onda.

Ao calcular o campo sonoro, é possível realizar simplificações adequadas, considerando as características do canal de múltiplos caminhos (JUNYING, 1992): (1) as trajetórias sonoras emitidas pela fonte sonora são periódicas; (2) a fonte sonora e os pontos de recepção possuem reciprocidade; (3) os parâmetros do campo sonoro são determinados pelos parâmetros das trajetórias de autorraios.

O modelo de raios, como uma aproximação para a equação de onda, é uma das interpretações mais intuitivas das diferentes categorias de modelos. Ele descreve o valor do campo sonoro em qualquer ponto da água como o resultado da sobreposição de raios sonoros, ou seja, das trajetórias dos autorraios (Eigenray) emitidos pela fonte sonora e capazes de chegar ao ponto de recepção. Os autorraios referem-se às trajetórias sonoras emitidas pela fonte sonora e que passam pelo ponto de recepção, contribuindo de maneira determinante para o campo sonoro. Devido às diferentes trajetórias dos autorraios, eles têm diferentes tempos de chegada, ângulos de chegada e intensidades de chegada.

A partir das linhas de energia dos autorraios, é possível obter uma expressão matemática aproximada para a função do sistema de multicaminhos, conforme indicado na equação (8). Nessa equação, são desconsideradas as características de absorção de frequência e fenômenos de dispersão do meio. A_i e τ_{oi} representam amplitude e atraso, respectivamente, das linhas de energia ao longo da i -ésima rota, onde N é o número de linhas de raios.



$$h_p(x, y, t) = \sum_{i=1}^N A_i \delta(t - \tau_{0i})$$

Se conhecermos a profundidade do oceano, o perfil de velocidade do som, as relações geométricas relativas entre a fonte sonora e os pontos de recepção, além dos perfis da superfície e do fundo do mar, podemos calcular os parâmetros das linhas de energia (A_i e τ_{0i}), e assim, obter a forma específica da função do sistema de múltiplos canais, concluindo assim a modelagem do canal.

4. ESPELHO DE TEMPO PASSIVO

O TRM passivo refere-se à implementação do processo de retransmissão temporal usando técnicas de processamento de sinal, em uma espécie de "retransmissão virtual". Enquanto o TRM ativo não requer conhecimento da estrutura do canal oceânico, sendo automaticamente focalizado, o TRM passivo precisa construir um canal virtual (bidimensional no espaço) usando técnicas de processamento de sinal. Quando o canal virtual coincide com o canal real, a técnica de TRM passivo atinge o mesmo efeito de focalização automática do ativo, permitindo a localização do alvo.

A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos do processamento do espelho temporal. À esquerda da linha pontilhada está o processo de recebimento do sinal pelo sensor de pressão após percorrer o canal oceânico com múltiplos caminhos. À direita da linha pontilhada está o processo virtual de transmissão do espelho temporal passivo. No espelho temporal passivo, o Canal II representa o canal virtual modelado. Durante a busca em uma faixa predefinida de distância e profundidade, amostras da função de transferência do Canal II são coletadas. Quando o Canal II virtual coincide com o Canal I real, ocorre a focalização de saída. As distâncias e profundidades onde os picos de focalização aparecem são usadas para estimar a posição do alvo.



Figura 1 – Diagrama de Localização com TRM e um único sensor. Fonte: Elaboração própria

Suponha que o sinal emitido pela fonte sonora S seja $x(t)$, e as funções de resposta ao impulso dos canais I e II sejam $h_1(t)$ e $h_2(t)$, respectivamente. Para simplificar a expressão, inicialmente, vamos ignorar a influência do ruído local, representado por $n(t)$. Então, o sinal recebido pelo hidrofone R pode ser expresso como:

$$y(t) = x(t) * h_1(t)$$

Aqui, o símbolo "*" representa a operação de convolução. A saída $z(t)$ do Canal II é dada por:

$$z(t) = x(-t) * h_1(-t) * h_2(t)$$

Quando o canal II é idêntico ao canal I, $h_1(t)=h_2(t)$, e a equação se torna:

$$z(t) = x(-t) * h_1(-t) h_1(t) \quad (10)$$

A convolução das respostas ao impulso para o canal pode ser expressa como:

$$h_1(-t) \dot{\wedge} h_1(t) = h_1(-t) \cdot \dot{h}_1(-t+\tau)$$

Isso indica que a convolução da resposta ao impulso no tempo é igual à autocorrelação da resposta ao impulso do canal. O valor de pico ocorre em $\tau=0$, ou seja:

$$\begin{aligned} h_1(-t) \dot{\wedge} h_1(t) &= h(-t) \cdot \dot{h}(-t+\tau) \Big|_{\tau=0} \\ &= h(-t) * h(-t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} h(-t) \cdot h(-t+\tau) dt \\ &= R_h(0) \end{aligned} \quad (11)$$

Substituindo (11) em (10), obtemos:

$$z(t) = x(-t) * R_h(0) = x(-t) * \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt \quad (12)$$

Pode-se observar a partir de (12) que quanto mais caminhos houver no canal multipercurso, maior será o valor de pico da saída do espelho de reversão temporal.

Para o processamento da localização passiva usando o TRM, após a inversão do sinal recebido no tempo, o sinal não é mais transmitido para o oceano da mesma forma que no modo ativo, mas sim através de um processo de retransmissão virtual para realizar o foco do tempo inverso. Quando o canal II é igual ao canal I, a função de autocorrelação do canal produz a saída máxima, ou seja, realiza o retrofoco, e as coordenadas correspondentes ao ponto focal são as coordenadas da fonte sonora S. Este é o princípio básico da localização passiva com espelho de tempo, e o princípio de reciprocidade do campo sonoro no oceano é a base física para a detecção e localização de alvos.

A expressão matemática para a localização passiva com TRM pode ser descrita em função de $S(\omega)$, $H_1(\omega)$, $N(\omega)$, $H_2(\omega)$ e $Z(\omega)$ que são, respectivamente, o espectro em frequência do sinal transmitido, a função de transferência do canal oceânico I, o ruído devido à interferência do fundo, a função de transferência do canal simulado II e a pressão sonora. Quando o ruído devido à interferência do fundo é desconsiderado, temos: A expressão matemática para a localização passiva com TRM pode ser descrita em função de $S(\omega)$, $H_1(\omega)$, $N(\omega)$, $H_2(\omega)$ e $Z(\omega)$,



que são, respectivamente, o espectro em frequência do sinal transmitido, a função de transferência do canal oceânico I, o ruído devido à interferência do fundo, a função de transferência do canal simulado II e a pressão sonora.

Quando o ruído devido à interferência do fundo é desconsiderado, temos:

$$Z(\omega) = H_1(\omega) \cdot S(\omega) \cdot H_2(\omega) \quad (13)$$

Sendo a autocorrelação do sinal definida como:

$$R(\omega) = Z^*(\omega) \cdot Z(\omega)$$

Temos então:

$$R(\omega) = [H_1(\omega) \cdot S(\omega) \cdot H_2(\omega)] \cdot [H_1^*(\omega) \cdot S^*(\omega) \cdot H_2(\omega)] \\ = H_1^*(\omega) \cdot H_1(\omega) \cdot S(\omega) \cdot S^*(\omega) \cdot H_2(\omega) \cdot H_2(\omega) \quad (14)$$

Quando $H_1(\omega)$ e $H_2(\omega)$ são correspondentes, $H_1(\omega) \cdot H_2(\omega) = |H_1(\omega)|^2$, a equação tem o máximo valor de saída, alcançando a concentração de energia e o efeito de foco automático do espelho de tempo ativo.

A previsão de $H_2(\omega)$ (função de transferência do canal simulado) é crucial para a técnica de localização passiva com espelho de tempo. Quando esta variável é convolucionada com o sinal recebido pelo hidrofone, é realizado o processo de retransmissão do espelho de tempo passivo. $H_{(i,j)}(\omega)$ é a resposta em frequência do canal de propagação em um ponto no espaço (representado bidimensionalmente por profundidade e distância) até o hidrofone receptor. Quando um desses canais de propagação coincide com o canal de transmissão real, a saída atinge o máximo, ou seja, atinge a localização do alvo.

O alcance da busca (região) e o passo da busca determinam o tamanho do cálculo da operação TRM passiva. Quanto maior o alcance da busca e menor o passo de busca, mais pontos precisam ser calculados e, portanto, maior será a quantidade de operações necessárias.

5. EXPERIMENTO COM DADOS DE SIMULAÇÃO

Para entender a viabilidade e precisão da combinação do TRM com o método de raios na localização passiva de uma fonte sonora, este estudo propôs um experimento simulado de localização bidimensional com TRM.

A Figura 2 ilustra a modelagem do ambiente utilizado na simulação. As condições de simulação incluíram um perfil de velocidade do som uniforme, sendo a velocidade do som na água de 1500 m/s, conforme mostrado na Figura 3; uma profundidade local de 100 metros; a densidade da camada de sedimentos é de 1750, o coeficiente de atenuação no fundo é zero, e a velocidade do som no sedimento é de 1563 m/s. A fonte sonora simulada emitiu um tom com duração de 1 segundo na frequência de 1 kHz e a taxa de amostragem empregada foi de 6 kHz.

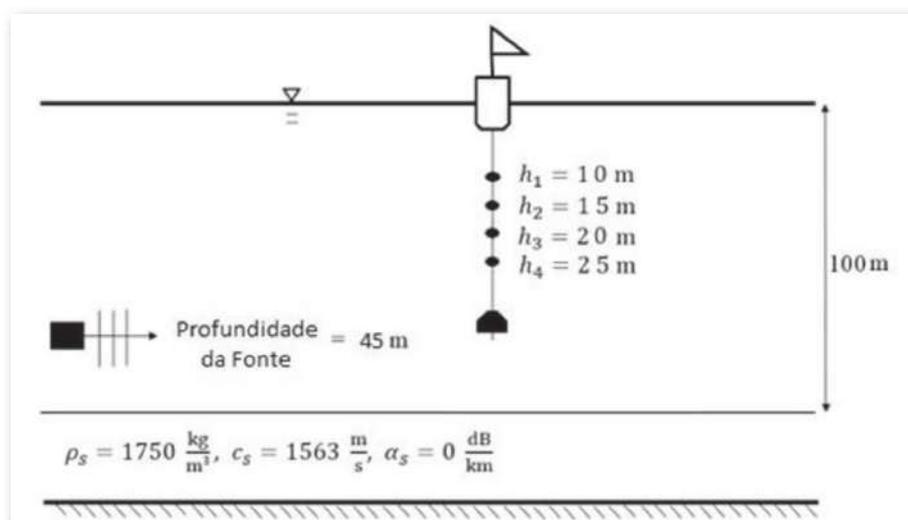


Figura 2 – Modelo de ambiente simulado com uma fonte e arranjo de 4 receptores

Com base no canal modelado, utilizou-se um software especializado em cálculos de propagação sonora para gerar um canal simulado entre dois pontos no espaço. Os campos acústicos foram modelados usando o modelo de raios TRACEO devido à frequência relativamente alta dos sinais processados. Foi estabelecido um sistema de coordenadas cartesianas, onde o eixo X representa a distância horizontal e o eixo Y, a profundidade. Considerando as coordenadas do hidrofone de recepção como $(0, Y_0)$ e as coordenadas de diversos pontos no espaço como (X_i, Y_i) , foi modelada a resposta do canal, a partir de cada hidrofone, para todos os pontos do espaço, que representam as possíveis localizações da fonte sonora. A Figura 4 traz o traçado dos autorraios e o padrão de chegadas para uma fonte simulada na posição $(500, 45)$.

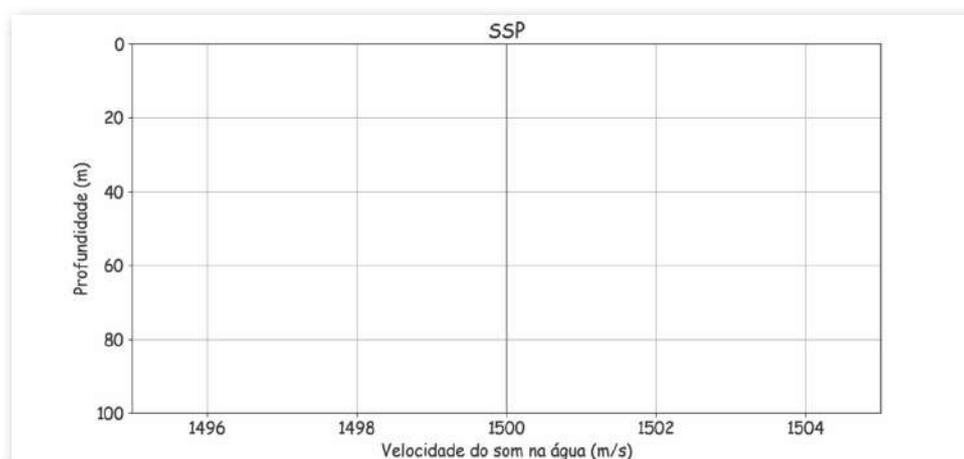


Figura 3 – Perfil de velocidade do som na água para o ambiente simulado

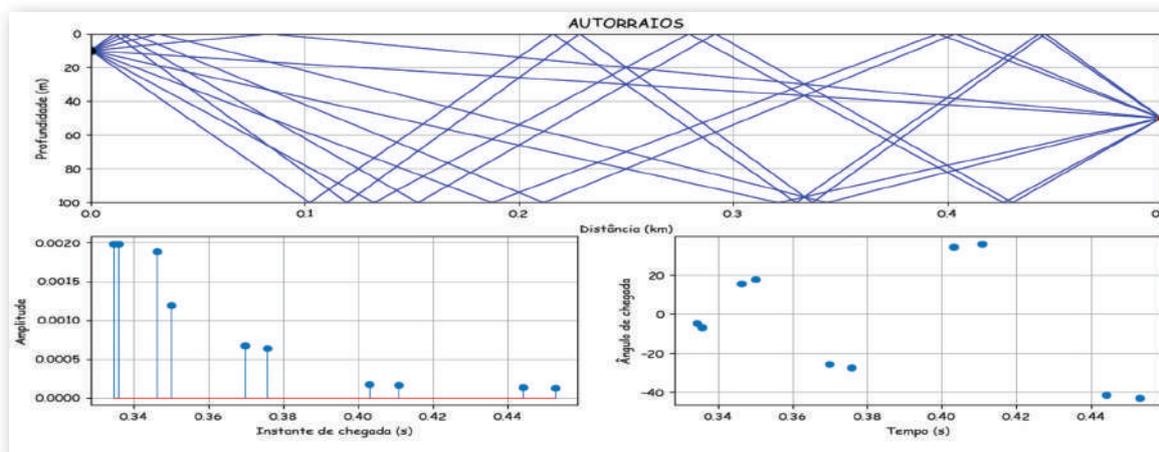


Figura 4 – Traçado dos autorraios e amplitudes e atrasos dos raios recebidos pelo hidrofone na profundidade de 10m para a fonte na posição (500,45)

6. SIMULAÇÃO DE LOCALIZAÇÃO COM ESPELHAMENTO TEMPORAL

A seguir, são apresentados os passos para o processamento de dados de simulação para a localização com espelhamento temporal usando um único hidrofone. As etapas principais do processamento de simulação incluem:

1. A fonte emite um sinal $s(t)$ na frequência de 1 kHz;
2. O sinal emitido, após atravessar o canal, é recebido pelos hidrofones, resultando nos sinais recebidos $y_1(t)$, $y_2(t)$... $y_n(t)$;
3. São estimados pontos em um espaço bidimensional de busca, como um conjunto de pontos com distância horizontal x_i em relação ao arranjo e profundidade y_i em relação à superfície da água, onde os passos de distância e de profundidade (passos de busca) determinam o limite de precisão de localização;
4. Utilizando o modelo de propagação de raios TRACEO, são calculados, a partir de cada hidrofone, a amplitude e o atraso dos autorraios que chegam a cada ponto da grade bidimensional de busca e, a partir disto, são calculadas as respostas ao impulso dos canais $h_n(t, X_i, Y_i)$ para um ponto específico no espaço;
5. Os sinais recebidos $Y_n(t)$ são invertidos no tempo, obtendo $Y_n(-t)$, e convoluídos com a resposta ao impulso $h_n(t, X_i, Y_i)$ para cada ponto da grade, resultando em um sinal reconstruído $z_n(t, X_i, Y_i)$ para cada hidrofone;
6. Os sinais reconstruídos $z_n(t, X_i, Y_i)$ são invertidos no tempo e somados, obtendo $z_{\text{soma}}(-t, X_i, Y_i)$;
7. É feita a correlação cruzada entre o sinal buscado $s(t)$ e $z_{\text{soma}}(-t, X_i, Y_i)$;
8. O ponto com o máximo valor de correlação é assumido como a localização da fonte sonora.

O resultado do processamento do algoritmo de localização é mostrado na figura a seguir:

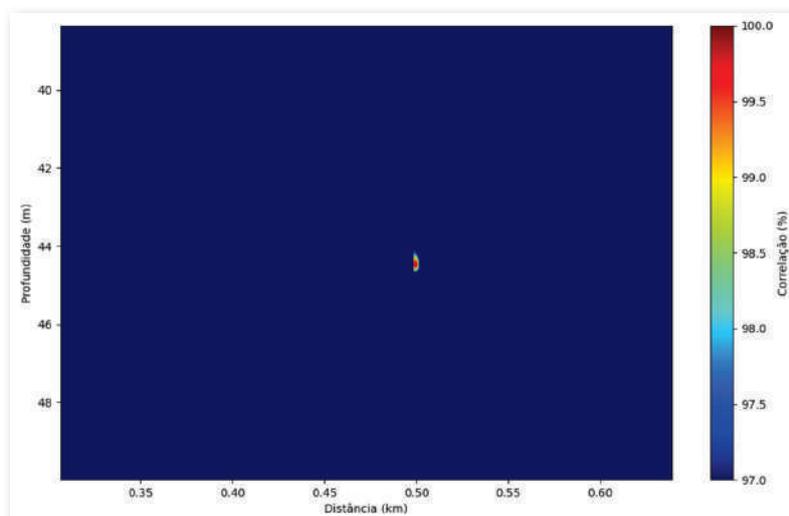


Figura 5 – Foco estimado na posição da fonte pelo algoritmo de localização com 4 hidrofones. Fonte: Elaboração Própria

Na Figura 5, a posição da fonte sonora é definida como (500,45), em unidades de metros. A partir da figura, é possível observar que a busca bidimensional após o processamento TRM consegue focar novamente na posição da fonte sonora definida, atingindo boa precisão de localização.

De modo a aproximar as condições simuladas de um ambiente real, pode ser introduzido um ruído de interferência local ao sinal de saída. Considerando a fonte na posição (500,45), e a presença de um ruído branco de banda limitada, com média zero, a figura abaixo ilustra os resultados do processamento para diferentes relações sinal-ruído (SNR), nomeadamente 0 dB, -5 dB, -10 dB e -15 dB:

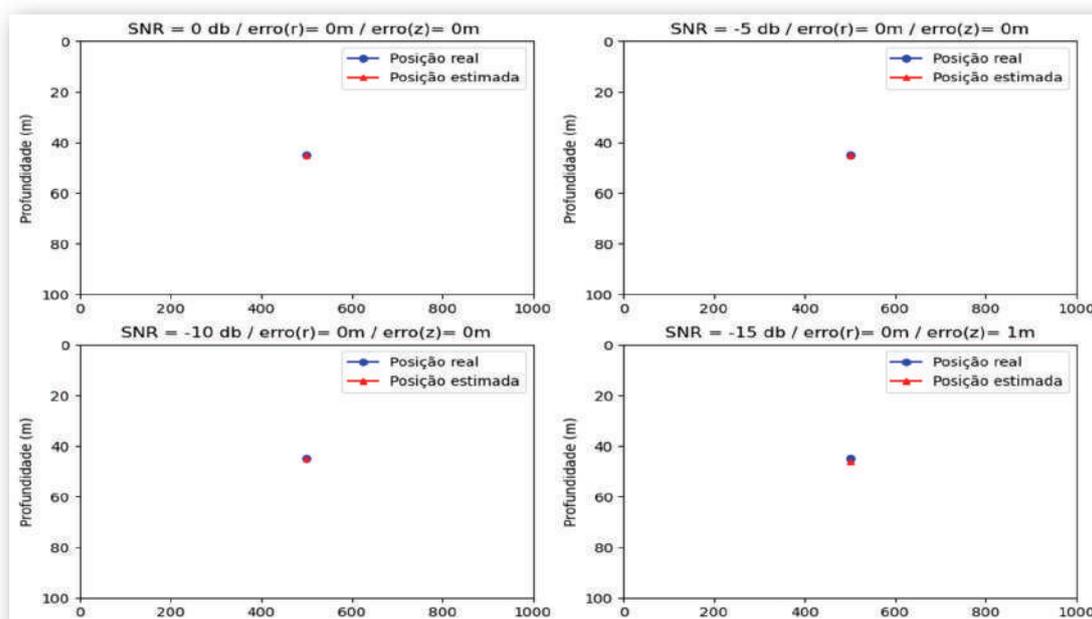


Figura 6 – Erros de estimativa em distância (r) e profundidade (z) para a localização da fonte sonora pelo algoritmo de localização passiva com 4 hidrofones para diferentes SNR. Fonte: Elaboração Própria



Portanto, mesmo em condições com alto nível de ruído, a técnica de localização com espelhamento temporal possui valor de aplicação. No entanto, mesmo para o processamento TRM com um único hidrofone, o volume de cálculos é substancial, apresentando desafios significativos na implementação em sistemas de tempo real.

7. O EFEITO DOS PARÂMETROS DO GUIA DE ONDAS

A propagação do som depende dos parâmetros do guia de ondas submarino. Para a modelagem do canal, assume-se que a velocidade do som na água, a profundidade local e os parâmetros do leito marinho são conhecidos. Nesta seção, é investigada a sensibilidade do algoritmo de localização aos parâmetros do guia de ondas.

Os resultados experimentais mostram que a estimativa de alcance é principalmente influenciada pela velocidade do som na água. A Figura 7 mostra como o erro de estimativa em distância varia com as alterações na velocidade do som na água.

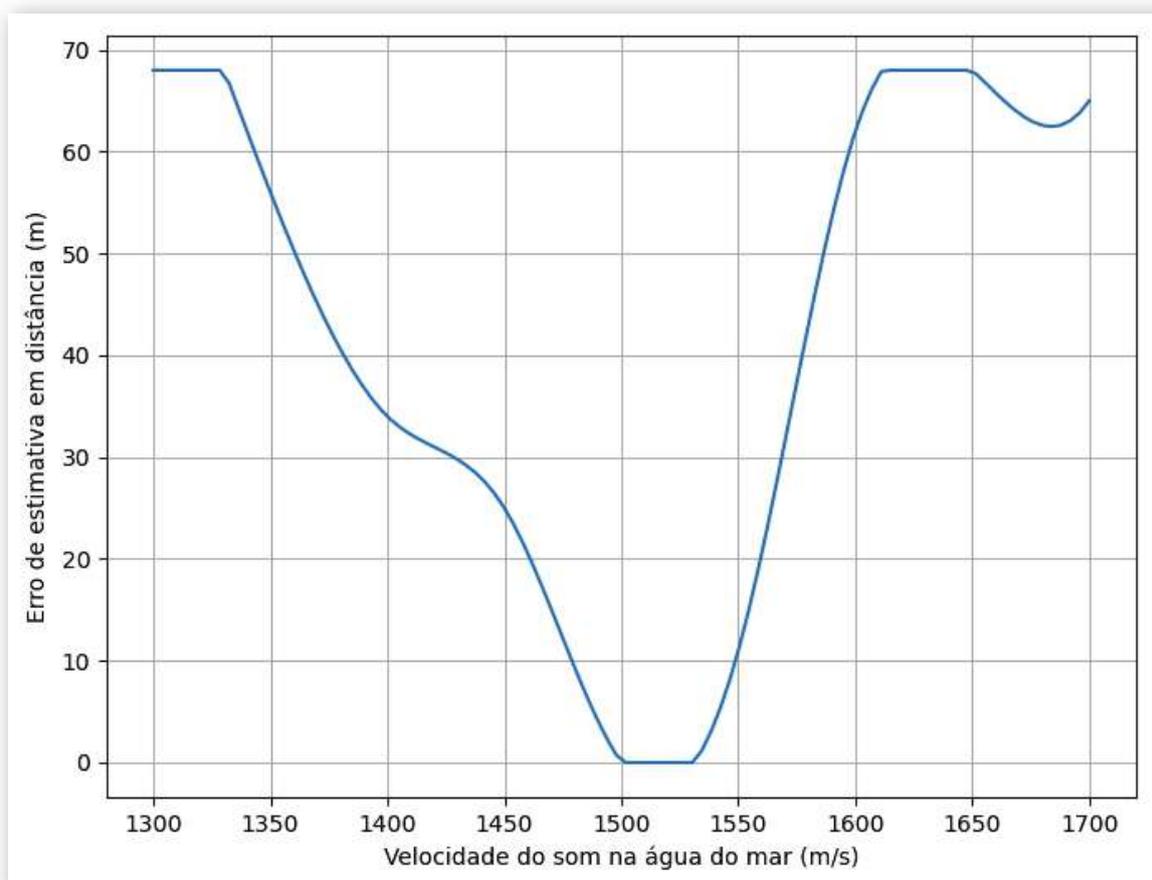


Figura 7 – O efeito do perfil de velocidade do som no mar sobre a localização estimada da fonte. Fonte: Elaboração Própria

Pode-se observar que o erro de estimativa é mínimo quando a velocidade do som é igual a 1500 m/s, que corresponde ao valor correto. Os resultados experimentais mostram que a estimativa de alcance não é sensível a outros parâmetros do guia de ondas, como a velocidade de propagação do som no fundo.

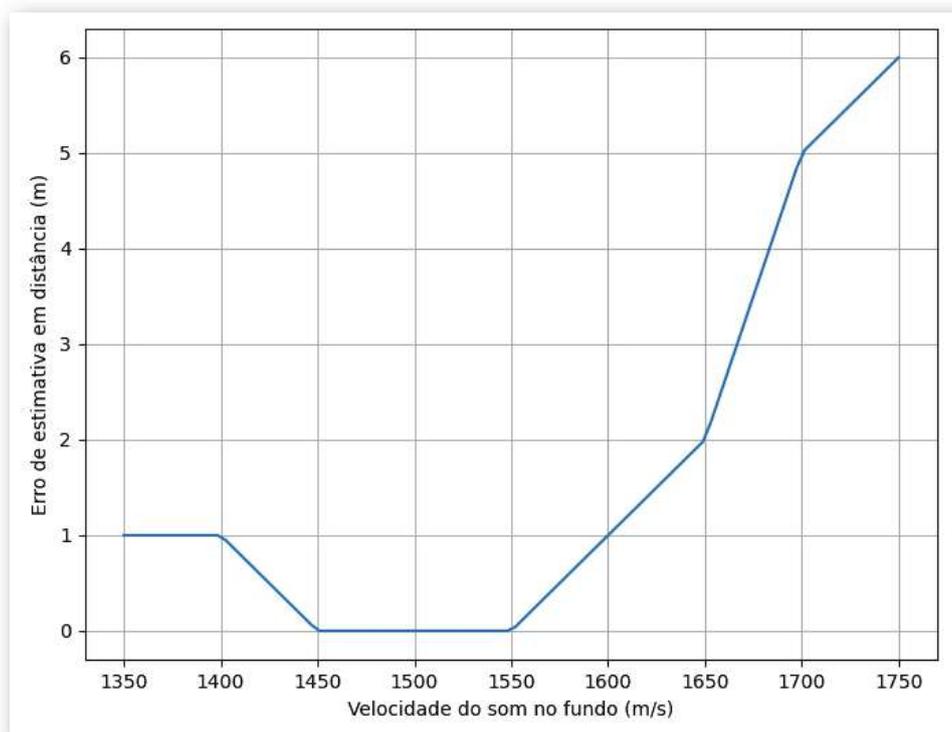


Figura 8 – O efeito da velocidade de propagação do som no fundo sobre a localização estimada da fonte

8. LOCALIZAÇÃO PASSIVA COM TRM EM AMBIENTE REAL

Após a avaliação do desempenho do algoritmo de TRM na localização passiva de fontes com dados simulados, esta pesquisa utilizou dados experimentais coletados pelo Signal Processing Laboratory (SiPLAB) da Universidade do Algarve durante o experimento CALCOM'10 para investigar sua eficácia em ambientes oceânicos reais.

O experimento envolveu o uso de duas boias acústico-oceanográficas (AOB), cada uma equipada com um VLA (Vertical Line Array) composto por 16 hidrofones espaçados 4 m entre si, em profundidades variando de 6,3 a 66,3 m. Uma fonte acústica Lubell 1424 foi rebocada a uma velocidade aproximada de 4 nós ao longo de várias trajetórias, emitindo uma série de sinais na faixa de 500-2000 Hz.

O modelo base do ambiente utilizado para simulações, representado na Figura 9, é baseado nas condições do evento P6, com distância fonte-receptor de até 1,6 km, profundidade da fonte de 7 m, profundidade local variando de 109 m a 125 m a uma distância do receptor de 1,6 km.

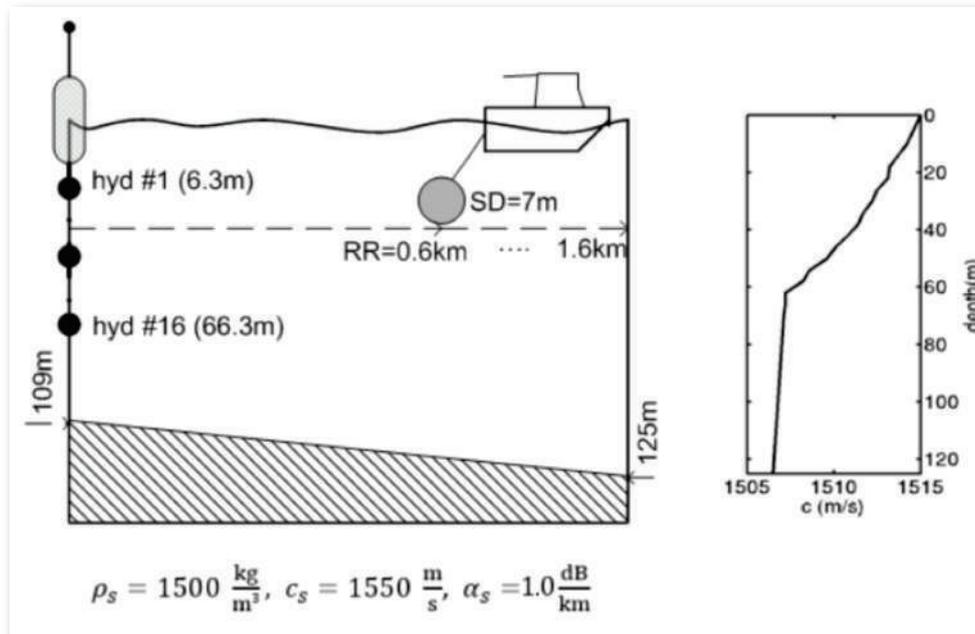


Figura 9 – Modelo Ambiental baseado nas condições do experiment CALCOM'10. Fonte: Adaptado de Felisberto et al. (2010)

O perfil de velocidade do som considerado nas simulações é o perfil médio de velocidade do som derivado pela fórmula de Mackenzie a partir dos dados de temperatura adquiridos pelo conjunto de sensores de temperatura no receptor, assumindo uma salinidade constante de 36 ppm e o alcance da fonte foi derivado das informações do GPS. A figura 10 mostra o efeito do foco na posição da fonte para o sinal recuperado do evento P6-01.

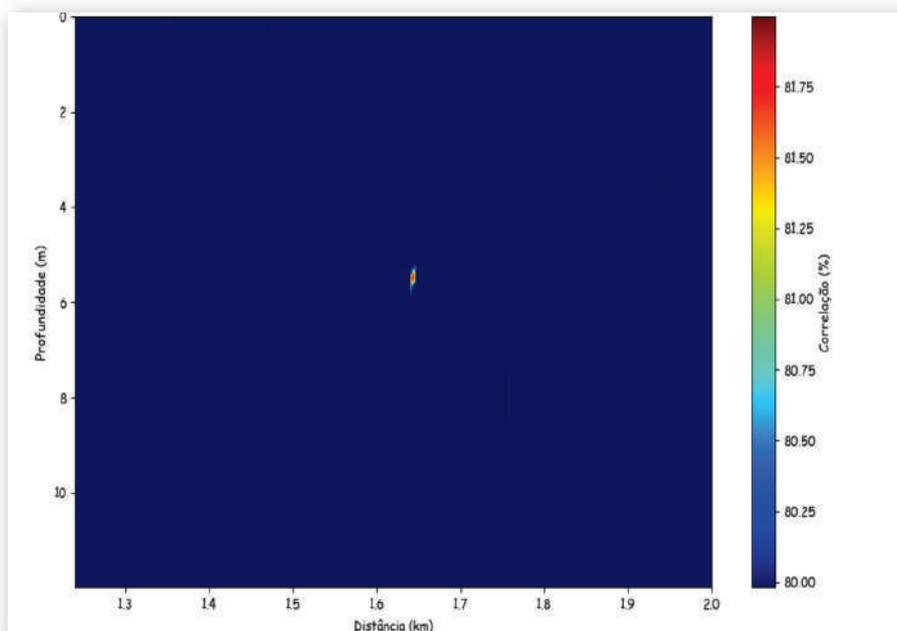


Figura 10 – Foco na posição da fonte estimada pelo algoritmo de localização com 16 hidrofones



A Tabela 1 indica as posições estimadas com o emprego do algoritmo em um TRM de 16 elementos, conforme o modelo empregado no experimento. Ela revela que o algoritmo empregado na localização estimada da fonte é consistente para emprego durante o experimento em campo, com a implementação de um TRM com 16 elementos permitindo uma estimativa precisa da distância da fonte.

Tabela 1 – Localizações da fonte sonora estimadas pelo algoritmo de TRM com os dados do experimento

Evento	Posição real (m)	Posição Estimada (m)	Erro (m)
P6-01	r = 1644 m	r = 1643 m	1
	z = 7 m	z = 6 m	1
P6-03	r = 1582 m	r = 1585 m	3
	z = 7 m	z = 6 m	1
P6-06	r = 1513 m	r = 1513 m	0
	z = 7 m	z = 7 m	0
P6-08	r = 1464 m	r = 1460 m	4
	z = 7 m	z = 4 m	3
P6-13	r = 1305 m	r = 1307 m	2
	z = 7 m	z = 2 m	5
P6-16	r = 1213 m	r = 1211 m	2
	z = 7 m	z = 3 m	4
P6-18	r = 1154 m	r = 1153 m	1
	z = 7 m	z = 8 m	1

Os resultados demonstram que, com o emprego do algoritmo de localização, é possível obter o posicionamento da fonte sonora com erros inferiores a 5 metros, mesmo para distâncias de mais de 1600 metros.

9. CONCLUSÃO

Ao analisar a teoria do processo de retransmissão temporal ativa, conclui-se que a tecnologia de localização passiva com espelhos temporais pode ser implementada por intermédio do processamento de sinais.

Empregando os programas desenvolvidos para localização de fontes sonoras submarinas, conclui-se que esses algoritmos são capazes de realizar a localização passiva, atingindo razoável precisão na busca bidimensional, especialmente em distância.



A análise dos resultados do processamento dos dados do teste no mar para a tecnologia de TRM mostra que, sob condições oceânicas reais, a tecnologia de localização passiva pesquisada neste trabalho pode realizar a localização de alvos, tendo, assim, valor para pesquisa futura.

No entanto, a redução do volume de processamento do algoritmo de localização com espelhos temporais é uma questão importante que precisa ser resolvida para a aplicação prática. Encontrar modelos de propagação oceânica mais simplificados e técnicas de cálculo de canal mais simples, bem como algoritmos de espelhos temporais mais simples, são abordagens fundamentais para reduzir o volume de processamento e tornar a técnica aplicável a sistemas de tempo real.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carter, G.C. Passive ranging errors due to receiving hydrophone position uncertainty. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 65, 1979, pp. 528-530.

DOONAN, I.J.; COOMBS, R.F.; MCCLATCHIE, S. The absorption of sound in seawater in relation to the estimation of deep-water fish biomass. *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 60, 2003, pp. 1047–1055.

Dowling, D.R., SONG, H.C. *Acoustic time reversal in the Ocean*. Ocean Acoustics to Acoustical Oceanography, Cambridge University Press, New York, 2005.

FELISBERTO, P., JESUS, S., ZABEL, F. CALCOM'10 Sea Trial: Field calibration data report. Relatório Técnico 04/10, SiPLAB, University of Algarve, Faro, Portugal, 2010.

Ferguson, B.G., LO, K.W. Passive ranging errors due to multipath distortion of deterministic transient signals with application to the localization of small arms fire. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 111, 2002, pp. 118-128.

Ferguson, B.G. Improved time-delay estimates of underwater acoustic signals using beamforming and prefiltering techniques. *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. 14, 1989, pp. 238-244.

Fink, M.; Prada, C.; Cassereau, D. Self focusing in inhomogeneous media with time reversal acoustic mirrors. *Proc. IEEE Ultrasonics Symp.*, Vol. 2, 1989, pp. 681-686.

Jackson, D.R., Dowling, D.R. Phase conjugation in underwater acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 89, 1991, pp. 171-181.

JENSEN, F. B., KUPERMAN, W. A., PORTER, M. B., et al. *Computational Ocean Acoustics*. 2nd ed. New York, Springer, 2011.

Junying, h. *Underwater Acoustic Communication Channel*. Harbin Engineering University, Harbin, 1992, pp. 30-35.



Kuperman, W.A., Jackson, D.R. Ocean acoustics, matched-field processing and phase conjugation. *Imaging of Complex Media with Acoustic and Seismic Waves*, Springer-Verlag, Berlin, 2002, pp. 43-97.

Prada, C., WU, F., Fink, M. The iterative time reversal mirror: A solution to self-focusing in the pulse echo mode. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 90, 1991, pp. 1119- 1129.

Valencia-Palma, A.; Córdova-Esparza, D.M. Sound source localization using beamforming and its representation in a mixed reality embedded device. *Pattern Recognition. Computer Science 11524*, Cham, 2019.

WU, S.F., ZHU, N. Locating arbitrarily time-dependent sound sources in three dimensional

