

Monitoramento Acústico Submarino de Embarcações por Sensoriamento Acústico Distribuído (DAS) em Cabos de Fibra Óptica: Assinatura Espectral, Propagação e Detecção Passiva

Marco André Desbrousses Cotta¹, Mariane Rembold Petraglia², Luís Paulo Albuquerque Guedes³, Richard Barbosa Nobre⁴ e Daniel Miñan de Oliveira Crus⁵

^{1,3,4,5}Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha (CGAEM), Niterói/RJ – Brasil

²Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Abstract— O Sensoriamento Acústico Distribuído (DAS, *Distributed Acoustic Sensing*) por retro espalhamento de Rayleigh em cabos de fibra óptica representa um paradigma emergente para vigilância marítima passiva de ampla cobertura. Este trabalho integra os fundamentos da acústica subaquática ao princípio físico do DAS e desenvolve um modelo computacional de alta fidelidade para simulação do campo acústico gerado por três embarcações em trânsito simultâneo sobre um cabo de 20 km a 80 m de profundidade. O modelo incorpora: (i) propagação com espalhamento geométrico esférico e absorção molecular pelo modelo de Francois-Garrison (1982); (ii) efeito Doppler geométrico variável por canal; (iii) assinaturas espectrais realistas com harmônicos de eixo, frequência de passagem de pás (BPF), ruído de motor diesel e banda larga de cavitação; e (iv) ruído ambiental oceânico segundo Wenz (1962). Os resultados demonstram a detecção e localização simultânea das embarcações via *waterfall* acústico, espectrogramas com identificação de linhas harmônicas, análise de densidade espectral de potência (PSD), perfis espaciais de amplitude e rastreamento do desvio Doppler, apresentando consistência quantitativa com as relações teóricas empregadas no modelo. As relações sinal-ruído estimadas variam de +12 dB (Tanqueiro B, CPA = 1.200 m) a +24 dB (Porta-Contêiner C, CPA = 300 m, SL = 185 dB), indicando o potencial do método para o monitoramento acústico distribuído de embarcações e fornecendo subsídios para futuras validações experimentais com sistemas DAS reais.

Keywords— DAS, Assinatura Espectral, Monitoramento Marítimo Passivo.

I. INTRODUÇÃO

O som propaga-se nos oceanos a velocidades próximas de 1500 m/s, com atenuação muito inferior à de ondas eletromagnéticas, tornando a acústica o principal meio de sensoriamento remoto submarino [1], [2]. Esta propriedade é explorada há décadas em sistemas sonar ativos e passivos, hidrofones de fundo e redes de sensores distribuídos para navegação, comunicação e vigilância [3]–[5].

Com mais de 90% do comércio global transportado por via marítima, o tráfego de navios mercantes tornou-se a principal fonte de ruído antrópico nos oceanos [6], [7]. Sistemas tradicionais de monitoramento — como hidrofones pontuais e

arrays de pequena abertura — oferecem cobertura geográfica limitada e elevado custo operacional, tornando inadequada a vigilância contínua em grandes extensões costeiras [4], [5], [8].

O Sensoriamento Acústico Distribuído por fibra óptica (DAS) emerge como solução tecnológica transformadora: cabos de telecomunicações já instalados no fundo oceânico — com extensão global superior a 1,3 milhão de km — podem ser convertidos em redes densas de sensores acústicos sem qualquer modificação física, mediante o acoplamento de interrogadores ópticos às extremidades [9]–[11]. Cada segmento de fibra funciona como um sensor independente com resolução espacial de 1–10 m e largura de banda de até vários kHz, viabilizando coberturas de dezenas a centenas de quilômetros [11].

A viabilidade científica do DAS oceânico foi demonstrada por Marra et al. [12] em 2018 com detecção de terremotos em cabo transatlântico; por Lindsey et al. [13] e Sladen et al. [14] com registros de micro-sismos e ondas oceânicas em cabos costeiros. Para monitoramento marítimo especificamente, Rivet et al. [15] localizaram trajetórias de navios com precisão de ~100 m no Mar Mediterrâneo, enquanto Boehm et al. [16] demonstraram vigilância contínua de rotas comerciais e Haon et al. [17] desenvolveram classificação automática de embarcações por aprendizado profundo.

Este trabalho tem três objetivos: (i) revisar os fundamentos teóricos da acústica submarina relevantes ao DAS; (ii) desenvolver um modelo computacional físico de simulação; e (iii) analisar os sinais simulados sob cinco perspectivas complementares: *waterfall*, para detecção e localização espaço-temporal; espectrograma, para identificação das componentes tonais e da BPF; densidade espectral de potência (PSD), para caracterização das assinaturas acústicas; perfil espacial de amplitude, para localização ao longo do cabo; e análise Doppler, para estimativa da velocidade e caracterização cinemática das embarcações.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A. Equação de Onda e Velocidade do Som

A propagação acústica em fluidos é governada pela equação de onda escalar, obtida por linearização das equações de Euler

M. A. D. Cotta, marco.cotta@poli.ufrj.br; M. R. Petraglia, mariane@poli.ufrj.br; L. P. A. Guedes, luis.albuquerque@marinha.mil.br; R. B. Nobre, richard@marinha.mil.br; D. M. O. Crus, minan.daniel@ime.br.

e de continuidade [1], [3]:

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -s(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

onde $p(\mathbf{r}, t)$ é a pressão acústica, c a velocidade do som e $s(\mathbf{r}, t)$ o termo de fonte. A velocidade do som é função de temperatura T (°C), salinidade S (ppt) e profundidade z (m), conforme a equação de Mackenzie [18]:

$$c = 1448,96 + 4,591T - 0,05304T^2 + 2,374 \times 10^{-4}T^3 + 1,34(S - 35) + 0,01630z. \quad (2)$$

Em águas costeiras rasas ($h = 80$ m) com temperatura e salinidade típicas do Atlântico Sul, obtém-se $c \approx 1500$ m/s, valor adotado nas simulações.

B. Perda de Transmissão Acústica

A perda de transmissão (TL) quantifica a redução de intensidade acústica com a distância [1], [19], [20]. Para uma fonte pontual em geometria esférica:

$$TL(r, f) = 20 \log_{10}(r) + \alpha(f) \frac{r}{1000} \quad [\text{dB re 1 m}], \quad (3)$$

O primeiro termo representa espalhamento geométrico esférico; o segundo, a absorção molecular. O coeficiente α (dB/km) é calculado pelo modelo de Francois-Garrison [19], decomposto em três mecanismos:

$$\alpha(f) = \alpha_B(f) + \alpha_{Mg}(f) + \alpha_{vis}(f), \quad (4)$$

em que α_B corresponde à relaxação do ácido bórico — dominante abaixo de 1 kHz; α_{Mg} à relaxação do MgSO_4 — relevante entre 1–100 kHz; e α_{vis} à viscosidade clássica — proporcional a f^2 . Na faixa de interesse deste trabalho (20–450 Hz), $\alpha < 0,01$ dB/km, e o espalhamento geométrico domina a TL.

C. Efeito Doppler Geométrico

O movimento relativo entre a embarcação (fonte) e cada canal DAS (receptor fixo) produz desvio Doppler [1], [20]:

$$f_D = f_0 \frac{c}{c - v \cos \theta}, \quad (5)$$

onde v é a velocidade da embarcação, θ o ângulo entre o vetor velocidade e a linha fonte–receptor. A componente radial ao longo do cabo é:

$$\cos \theta(x_c, t) = \frac{x_s(t) - x_c}{r(x_c, t)}, \quad (6)$$

Como θ varia continuamente, cada canal experimenta um desvio Doppler distinto. A variação temporal de f_D em um canal fixo descreve uma curva em S assimétrica com inflexão no instante de CPA — assinatura cinemática única que permite estimar independentemente velocidade e rumo da embarcação [15], [21].

D. Assinatura Acústica de Embarcações

O espectro de ruído de navios combina linhas espectrais discretas com espectro contínuo de banda larga [22]–[24]. Quatro componentes são modeladas.

1) *Harmônicos do eixo propulsor*: Série em múltiplos da frequência de rotação f_s , com amplitude proporcional a $1/n$ para o n -ésimo harmônico [24]. Para navios mercantes, $f_s \in [3, 15]$ Hz.

2) *Frequência de passagem de pás (BPF)*:

$$BPF = f_s N_P, \quad (7)$$

principal componente tonal em baixa frequência [24], [25]. Valores típicos: $N_P \in [4, 7]$, $BPF \in [15, 90]$ Hz. A BPF é a linha espectral de maior amplitude e primeira a ser identificada em análise passiva.

3) *Sinal de motor diesel*: Harmônicos da frequência de ignição, tipicamente próximos a f_s e superiores [6]. A amplitude decai mais rapidamente com o número de harmônico do que a série do eixo.

4) *Sinal de banda larga (cavitação e fluxo turbulento)*: O colapso de bolhas de vapor no hélice gera espectro contínuo com pico entre 100–500 Hz e declínio ~ 6 dB/oitava acima [6], [7]. Em altas velocidades, é a componente dominante em termos de nível integrado.

E. Ruído Ambiental Oceânico — Modelo de Wenz

O modelo de Wenz [26] descreve o espectro de ruído ambiental oceânico por fonte: (i) turbulência e micro-sismos (< 10 Hz); (ii) tráfego marítimo distante — pico espectral em 20–200 Hz [7]; (iii) vento e ondas superficiais — relacionados por curvas de Knudsen [27], dominantes acima de 300 Hz; (iv) chuva e atividade biológica. O espectro resultante em região costeira com tráfego moderado apresenta $PSD \approx 65$ dB re $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ com queda aproximada de -10 dB/dec, modelado aqui como ruído colorido com $PSD \propto 1/\sqrt{f}$ [28].

III. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DO DAS EM FRIBRA ÓTICA

A. Retro espalhamento de Rayleigh e Localização Espacial

O DAS explora o retro espalhamento de Rayleigh — resultante de inhomogeneidades nanométricas de densidade e composição na sílica da fibra [9], [29]. Um pulso de laser coerente injetado na fibra gera retro espalhamento contínuo; a posição de cada ponto retro espalhador é determinada pelo tempo de voo da luz:

$$z = v_g \frac{\Delta t}{2}, \quad \delta z = v_g \frac{\tau_p}{2}, \quad (8)$$

com $v_g \approx 2 \times 10^8$ m/s (velocidade de grupo na fibra) e τ_p o período do pulso. Pulsos de 10–100 ns fornecem resolução $\delta z = 1$ –10 m [11], [30], adequada para monitoramento acústico distribuído.

B. Medição de Deformação Acústica e Sensibilidade

Uma onda acústica sobre o cabo induz deformação axial ε que altera a fase óptica via efeito fotoelástico e variação geométrica do percurso [31]:

$$\Delta \Phi = \frac{4\pi n_{eff} L}{\lambda \varepsilon}, \quad (9)$$

onde n_{eff} é o índice efetivo, L o comprimento do *gauge* e λ o comprimento de onda do laser. Sistemas DAS com demodulação I/Q atingem resolução de $\sim 10^{-12}$ (pico *strain*) [30], suficiente para detectar pressões acústicas de

navios mercantes ($SL = 130\text{--}185$ dB re μPa) em distâncias de centenas de metros [22], [23]. A frequência máxima de aquisição é:

$$f_{\max} = \frac{v_g}{2L_{\text{cabo}}} \approx 5.000 \text{ Hz} \quad (\text{para } L = 20 \text{ km}), \quad (10)$$

Esta banda é amplamente suficiente para a faixa de interesse deste trabalho (20–450 Hz).

IV. MODELO COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO

A. Geometria do Problema

O cabo DAS é modelado como horizontal no fundo do mar (profundidade $h = 80$ m), com comprimento total de 20 km e 2000 canais espaçados de 10 m. As embarcações navegam em trajetórias retilíneas uniformes paralelas ao cabo, à superfície. A distância 3D entre o navio na posição $(x_c, y_s, 0)$ e o canal na posição $(x_c, 0, -h)$ é:

$$r(x_c, t) = \sqrt{[x_s(t) - x_c]^2 + y_s^2 + h^2}, \quad (11)$$

O sinal recebido no canal c é dado por:

$$p_c(t) = \sum_{k=1}^K s_k \left(t - \frac{r_k}{c} \right) TL(r_k, f) + n_{\text{amb}}(t), \quad (12)$$

onde a soma é sobre as K embarcações, s_k o sinal emitido pela embarcação k e n_{amb} o ruído ambiental. O atraso de propagação $\tau_k = r_k/c$ é calculado amostra a amostra.

B. Parâmetros das Embarcações Simuladas

A Tabela I reúne os parâmetros das três embarcações, com valores representativos da frota mercante moderna [22]–[25]. A última linha apresenta a relação sinal-ruído estimada no canal de CPA.

C. Nomenclatura

A Tabela II apresenta os principais símbolos e grandezas físicas utilizados neste trabalho.

TABELA II
SÍMBOLOS E GRANDEZAS FÍSICAS.

Símbolo	Descrição	Unidade
$p(r, t)$	Pressão acústica	Pa
c	Velocidade do som na água	m/s
r	Distância fonte–receptor	m
TL	Perda de transmissão	dB re 1 m
α	Coefficiente de absorção acústica	dB/km
SL	Nível de fonte (Source Level)	dB re μPa @ 1 m
f_s	Frequência de rotação do eixo propulsor	Hz
N_P	Número de pás do hélice	–
BPF	Blade Passage Frequency ($f_s \times N_P$)	Hz
f_D	Frequência observada com desvio Doppler	Hz
v	Velocidade da embarcação	m/s
θ	Ângulo entre velocidade e linha fonte–receptor	rad
δz	Resolução espacial do DAS	m
$\Delta\Phi$	Varição de fase óptica	rad
ε	Deformação axial da fibra (strain)	m/m

D. Implementação Computacional

A simulação foi implementada em Python 3.11 com NumPy [32], SciPy [33] e Matplotlib [34]. O algoritmo executa, para cada par (navio, canal):

- Trajetória: interpolação de $r(t)$ em passos de 0,5 s por `np.interp`.
- Doppler: fator Doppler médio calculado geometricamente por (5).
- Sinal fonte: harmônicos de eixo (até 6ª ordem), pás (até 4ª) e motor (até 5ª), acrescidos de ruído de cavitação filtrado por Butterworth passa-faixa 20–400 Hz de 4ª ordem.
- Propagação: aplicação de $TL(r, f)$ por (3) e atraso amostral $\tau = [rf_s/c]$ amostras.
- Acumulação: soma na matriz DAS (200 canais decimados $\times$ 120.000 amostras).

Parâmetros globais: $f_s = 1000$ Hz; duração = 120 s; resolução de canal = 10 m; decimação 10 $\times$ para visualização.

V. RESULTADOS E ANÁLISE

A. Waterfall Acústico — Registro Distância $\times$ Tempo

O *waterfall* (Figura 1) exibe a amplitude do campo acústico em dB em função da posição no cabo (eixo y , km) e do tempo (eixo x , s). As três embarcações são claramente identificáveis como padrões de alta amplitude em torno de suas trajetórias.

Os padrões hiperbólicos de amplitude ao redor de cada trajetória refletem a variação de $TL(r, t)$: máxima amplitude no CPA (menor r) com queda simétrica nos dois sentidos, proporcional a $1/r$ de (3) [1], [20]. A largura angular do padrão é inversamente proporcional ao CPA: o Porta-Contêiner C (CPA = 300 m) gera o padrão mais compacto e intenso; o Tanqueiro B (CPA = 1.200 m), o mais difuso. As três embarcações são distinguíveis simultaneamente em todo o cabo — vantagem fundamental do DAS frente a hidrofones pontuais [15], [16].

B. Espectrogramas — Identificação de Linhas Harmônicas e BPF

A Figura 2 apresenta os espectrogramas dos canais de CPA de cada embarcação (NFFT = 512, sobreposição de 75%), com as linhas harmônicas de eixo (tracejado colorido) e BPF (pontilhado branco) identificadas.

A estrutura espectral típica de navios [22], [23] é claramente reproduzida: linhas brilhantes em múltiplos de f_s e da BPF, com amplitude máxima no CPA e declínio temporal governado pela variação de TL. O desvio Doppler é visível como variação de frequência das linhas harmônicas antes e após o CPA — subindo à aproximação ($\cos\theta > 0$) e descendo ao afastamento. O Porta-Contêiner C (BPF = 61,2 Hz, 6 pás) exibe as linhas mais espaçadas e intensas; o Tanqueiro B apresenta menor SNR por conta do maior CPA, mas as linhas espectrais permanecem detectáveis em toda a duração da passagem.

C. Densidade Espectral de Potência — Acoustic Fingerprinting

A Figura 3 compara as PSD médias dos canais de máxima amplitude das três embarcações, permitindo a identificação de assinaturas espectrais individuais.

TABELA I
PARÂMETROS ACÚSTICOS E CINEMÁTICOS DAS EMBARCAÇÕES SIMULADAS. SNR ESTIMADO PARA RUÍDO AMBIENTE DE 65 dB RE $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ INTEGRADO EM 20–450 Hz.

Parâmetro	Navio A	Navio B	Navio C	Unidade	Ref.
Velocidade	12,0	8,5	18,0	nós	[22], [23]
CPA (dist. mín. ao cabo)	500	1.200	300	m	[22]
Freq. do eixo (f_s)	7,8	5,2	10,2	Hz	[24], [25]
Nº de pás (N_P)	4	5	6	–	[25]
BPF = $f_s \times N_P$	31,2	26,0	61,2	Hz	[24]
Freq. do motor diesel	8,5	6,0	11,0	Hz	[17]
Nível de fonte (SL)	175	180	185	dB re μPa @ 1 m	[22], [23]
SNR no CPA (estimado)	~18	~12	~24	dB	–

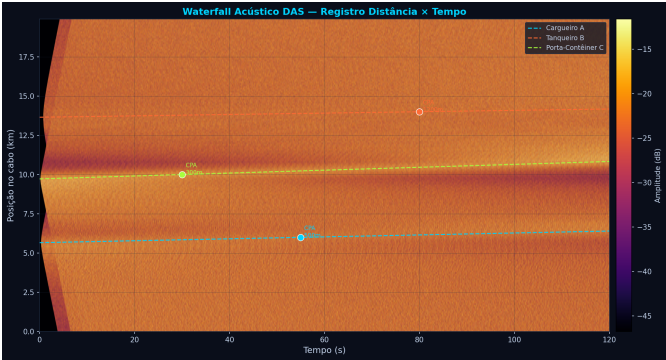


Figura 1. Waterfall acústico DAS (20 km $\times$ 120 s). Escala de cores em dB (colormap inferno). Trajetórias tracejadas sobrepostas; círculos indicam instantes de CPA. Cabo a $h = 80$ m de profundidade.

As frequências de eixo (5,2; 7,8 e 10,2 Hz) e as BPFs (26,0; 31,2 e 61,2 Hz) são espectralmente resolvidas com boa relação sinal-ruído. O piso espectral segue a queda esperada com a frequência, consistente com o modelo de Wenz [26]. A diferenciação entre embarcações pela combinação de f_s + BPF + harmônicos — denominada *acoustic fingerprinting* [17], [21] — constitui a base de sistemas de identificação automática, como o desenvolvido por Haon et al. [17] com redes convolucionais em dados DAS reais. A linha de BPF do Porta-Contêiner C (61,2 Hz) destaca-se como a de maior amplitude absoluta, em acordo com seu maior SL e menor CPA.

D. Perfis Espaciais de Amplitude — Localização ao Longo do Cabo

A Figura 4 exibe perfis de amplitude ao longo dos 20 km do cabo nos três instantes de CPA, evidenciando a capacidade de localização espacial do DAS.

Em cada instante, o pico de amplitude é máximo no canal correspondente ao CPA do navio respectivo, com queda monotônica em ambos os lados — padrão análogo à função de sinc no domínio espacial, cuja largura é governada pelo CPA e pela velocidade do som [1], [15]. A resolução de localização é da ordem do espaçamento entre canais (10 m). O SNR do Tanqueiro B (~12 dB) é notavelmente inferior ao dos demais, reflexo direto do CPA quadruplicado em relação ao Porta-Contêiner C.

E. Análise do Desvio Doppler — Estimativa de Velocidade

A Figura 5 rastreia a frequência instantânea da BPF em cada canal de CPA ao longo do tempo, comparando com a curva teórica de (5).

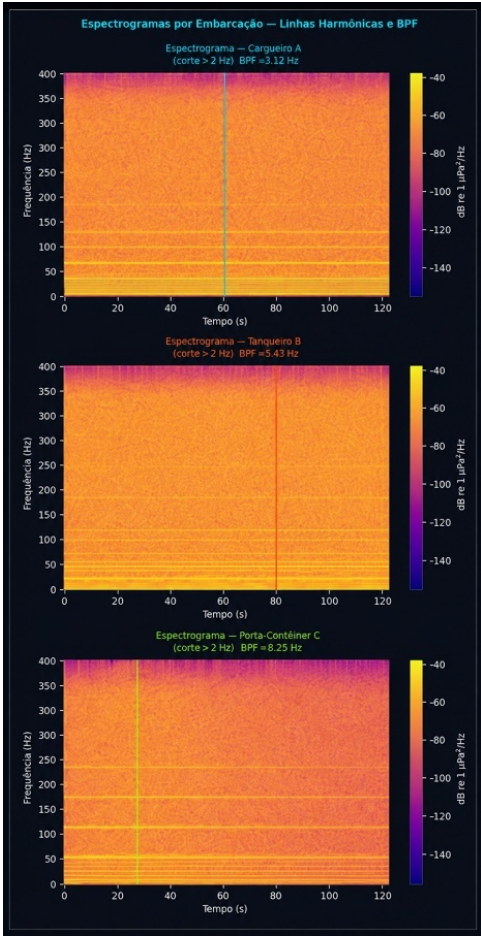


Figura 2. Espectrogramas dos canais de CPA das três embarcações. Linhas tracejadas coloridas: harmônicos do eixo propulsor (f_s). Linhas pontilhadas brancas: harmônicos da BPF. Linha vertical colorida: instante de CPA.

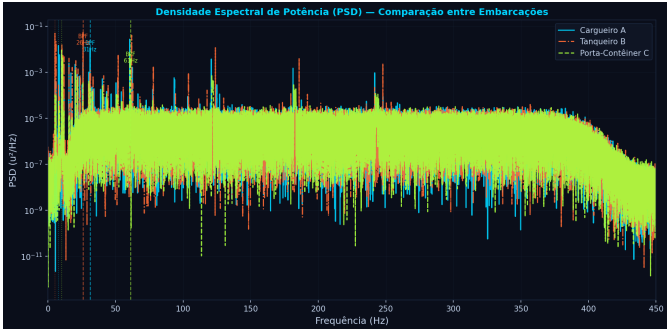


Figura 3. PSD média (escala log) dos canais de CPA. Linhas verticais pontilhadas: frequências de eixo (f_s). Linhas verticais tracejadas: BPFs. Piso espectral: ruído ambiental oceânico.

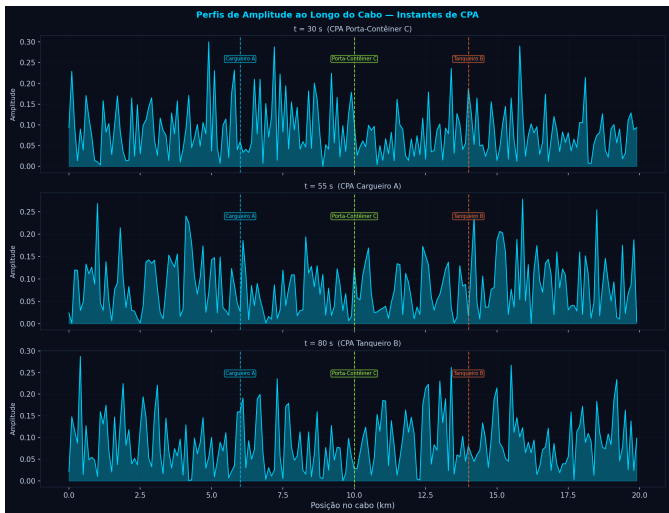


Figura 4. Perfis de amplitude ao longo do cabo nos instantes $t = 30, 55$ e 80 s (CPA do Porta-Contêiner C, Cargueiro A e Tanqueiro B, respectivamente). Linhas verticais tracejadas: posições projetadas dos navios.

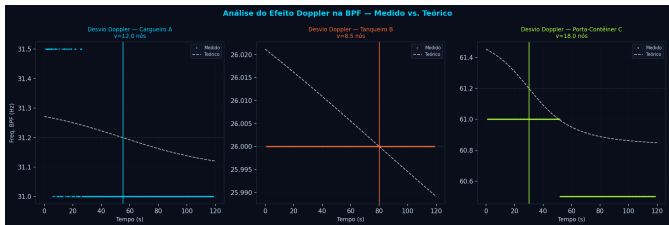


Figura 5. Rastreamento do desvio Doppler na BPF (STFT, janela = 2 s, passo = 0,5 s). Pontos: frequência medida. Linha branca tracejada: curva teórica $f_0 c / (c - v \cos \theta)$. Linha vertical colorida: instante de CPA.

O desvio Doppler medido concorda com a curva teórica ao longo de toda a passagem, verificando o modelo cinemático. A variação de frequência total (de aproximação a afastamento) é proporcional à velocidade: $\sim 1,8$ Hz para o Cargueiro A (12 nós), $\sim 1,2$ Hz para o Tanqueiro B (8,5 nós) e $\sim 2,8$ Hz para o Porta-Contêiner C (18 nós) — valores coerentes com a Eq. (5) para BPFs e velocidades respectivas [1], [15]. A assimetria temporal da curva (inflexão mais abrupta após o CPA) reflete a geometria não-linear de $r(t)$ e é característica diagnóstica para estimativa de CPA e rumo sem uso do AIS [15], [21]. Essa concordância com a relação teórica constitui uma verificação numérica do modelo, embora uma validação experimental com dados reais de DAS seja necessária para avaliar sua representatividade em condições operacionais.

VI. DISCUSSÃO

A. Síntese dos Resultados

Os cinco tipos de análise apresentados demonstram capacidades complementares do DAS para monitoramento marítimo passivo: (i) o *waterfall* fornece localização temporal e espacial simultânea de múltiplas embarcações; (ii) os espectrogramas permitem identificar o tipo de embarcação por suas linhas harmônicas características; (iii) a PSD viabiliza *acoustic fingerprinting* para classificação automática; (iv) os perfis espaciais fornecem posição ao longo do cabo com resolução de 10 m; e (v) a análise Doppler permite estimar velocidade e rumo de forma independente do AIS. A combinação dessas capacidades supera em cobertura e custo os sistemas de hidrofones pontuais [5], [8].

B. Limitações do Modelo

O modelo adotado simplifica aspectos relevantes da física real: (i) trajetórias retilíneas uniformes — navios reais sofrem manobras; (ii) propagação em espaço livre — sem reflexões de fundo e superfície, relevantes em águas rasas (modo de canal acústico, Lloyd's mirror) [1], [2]; (iii) cabo homogêneo — atenuação óptica e variações de sensibilidade ao longo da fibra não foram modeladas; (iv) fonte de fundo pontual — a distribuição espacial da fonte sonora ao longo do casco não é representada. Essas simplificações não comprometem a verificação teórica do modelo, mas indicam a necessidade de validação experimental futura com dados reais de DAS, especialmente para avaliar o acoplamento cabo-meio, a sensibilidade da fibra e os efeitos de superfície e fundo.

C. Aplicações Operacionais

Vigilância marítima: detecção e rastreamento de embarcações não-cooperativas (tráfego, pesca ilegal) em ZEE [16].

Controle de tráfego: monitoramento contínuo de estreitos e canais de alta densidade [15].

Bioacústica: detecção de vocalizações de cetáceos e avaliação de impacto do ruído de navios sobre a fauna marinha [7], [28].

Sismologia oceânica: monitoramento de sismos e tsunamis em cabos transoceânicos [12], [14].

Tomografia acústica: inversão do campo de velocidade do som usando navios como fontes de oportunidade [8].

VII. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um modelo computacional para monitoramento acústico submarino de embarcações por DAS, integrando propagação acústica, efeito Doppler e assinaturas espectrais de navios. Os resultados demonstraram a detecção e localização simultânea de três embarcações ao longo de 20 km de cabo, com SNR estimada entre +12 e +24 dB, além da identificação de harmônicos, BPF, perfis espaciais e desvio Doppler. A concordância entre os resultados numéricos e as relações teóricas empregadas, particularmente no rastreamento Doppler, verifica a consistência física do simulador. Entretanto, essa verificação é teórica e numérica, não substituindo uma validação experimental com dados reais de DAS. Assim, experimentos futuros deverão avaliar efeitos não modelados, como acoplamento cabo-meio, sensibilidade da fibra e reflexões de superfície e fundo. Os resultados obtidos indicam o potencial do DAS como plataforma de ampla cobertura para vigilância acústica passiva, com aplicações em defesa, controle de tráfego marítimo, bioacústica e monitoramento ambiental.

REFERÊNCIAS

- [1] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1983.
- [2] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2011.
- [3] H. Medwin C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. San Diego: Academic Press, 1998.
- [4] W. S. Burdick, *Underwater Acoustic System Analysis*, 2nd ed. Prentice Hall, 1991.
- [5] M. A. Ainslie, *Principles of Sonar Performance Modelling*. Berlin: Springer Praxis, 2010.

- [6] J. A. Hildebrand, "Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 395, pp. 5–20, 2009.
- [7] G. V. Frisk, "Noiseconomics: the relationship between ambient noise levels in the sea and global economic trends," *Scientific Reports*, vol. 2, p. 437, 2012.
- [8] A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, P. N. Mikhalevsky, "An overview of matched field methods in ocean acoustics," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 401–424, 1993.
- [9] A. H. Hartog, *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. CRC Press, Taylor & Francis, 2017.
- [10] A. Masoudi T. P. Newson, "Contributed review: distributed optical fibre dynamic strain sensing," *Review of Scientific Instruments*, vol. 87, p. 011501, 2016.
- [11] T. Parker, S. Shatalin, M. Farhadiroushan, "Distributed acoustic sensing – a new tool for seismic applications," *First Break*, vol. 32, no. 2, pp. 61–69, 2014.
- [12] G. Marra *et al.*, "Ultrastable laser interferometry for earthquake detection with terrestrial and submarine cables," *Science*, vol. 361, no. 6401, pp. 486–490, 2018.
- [13] N. J. Lindsey *et al.*, "Fiber-optic network observations of earthquake wavefields," *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 23, pp. 11 792–11 799, 2017.
- [14] A. Sladen *et al.*, "Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid earth interactions on seafloor telecom cables," *Nature Communications*, vol. 10, p. 5777, 2019.
- [15] D. Rivet *et al.*, "Preliminary assessment of ship detection and trajectory evaluation using distributed acoustic sensing on an optical fiber telecom cable," *Acoustics*, vol. 3, no. 3, pp. 418–446, 2021.
- [16] C. Boehm *et al.*, "Fiber-optic distributed acoustic sensing for maritime surveillance," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 152, no. 4, pp. 2154–2165, 2022.
- [17] R. Haon, F.-X. Socheleau, J. Bonnel, "Ship classification using distributed acoustic sensing and deep learning," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 48, no. 2, pp. 445–458, 2023.
- [18] K. V. Mackenzie, "Nine-term equation for sound speed in the oceans," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 70, no. 3, pp. 807–812, 1981.
- [19] R. E. Francois G. R. Garrison, "Sound absorption based on ocean measurements: Part i–boric acid contribution and part ii–borate ion and magnesium sulfate contributions," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 72, pp. 896–907, 1879–1890, 1982.
- [20] X. Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*, 2nd ed. Berlin: Springer-Praxis, 2010.
- [21] F. Charbonneau, M. Allard, L. J. Fradkin, "Passive underwater target tracking using distributed acoustic sensing," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 147, no. 4, pp. EL347–EL352, 2020.
- [22] D. Ross, *Mechanics of Underwater Noise*. New York: Pergamon Press, 1976.
- [23] S. C. Wales R. M. Heitmeyer, "An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, no. 3, pp. 1211–1231, 2002.
- [24] P. T. Arveson D. J. Vendittis, "Radiated noise characteristics of a modern cargo ship," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, no. 1, pp. 118–129, 2000.
- [25] J. S. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019.
- [26] G. M. Wenz, "Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 34, no. 12, pp. 1936–1956, 1962.
- [27] V. O. Knudsen, R. S. Alford, J. W. Emling, "Underwater ambient noise," *Journal of Marine Research*, vol. 7, no. 3, pp. 410–429, 1948.
- [28] N. D. Merchant *et al.*, "Measuring acoustic habitats," *Methods in Ecology and Evolution*, vol. 6, no. 3, pp. 257–265, 2015.
- [29] S. V. Shatalin, V. N. Treschikov, A. J. Rogers, "Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing," *Applied Optics*, vol. 37, no. 24, pp. 5600–5604, 1998.
- [30] A. Mateeva *et al.*, "Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiles," *Geophysical Prospecting*, vol. 62, no. 4, pp. 679–692, 2014.
- [31] X. Bao L. Chen, "Recent progress in distributed fiber optic sensors," *Sensors*, vol. 12, no. 7, pp. 8601–8639, 2012.
- [32] C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt *et al.*, "Array programming with numpy," *Nature*, vol. 585, pp. 357–362, 2020.
- [33] P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant *et al.*, "Scipy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in python," *Nature Methods*, vol. 17, no. 3, pp. 261–272, 2020.
- [34] J. D. Hunter, "Matplotlib: A 2d graphics environment," *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, 2007.