

# COMUNICAÇÕES SUBMARINAS COM BAIXA PROBABILIDADE DE DETECÇÃO: NOVAS TÉCNICAS APLICADAS A UM SENSOR ACÚSTICO VETORIAL

Low probability of detection underwater communications: innovative techniques applied to an acoustic vector sensor

Fabio Barbosa Louza<sup>1</sup> 

**Resumo:** Este artigo apresenta técnicas inovadoras para comunicações acústicas submarinas com baixa probabilidade de detecção, utilizando um sensor vetorial compacto que mede pressão acústica e velocidades de partículas em um único ponto. Em experimentos realizados na costa do Algarve, Portugal, aplicou-se a técnica de treinamento superposto com inversão temporal passiva, simulando condições furtivas (relação sinal ruído entre 0 e -10 dB). Os resultados indicam que a combinação multicanal do sensor vetorial melhora o desempenho das comunicações em até 47% em relação ao uso isolado do canal do sensor de pressão acústica.

**Palavras-Chave:** Comunicação acústica submarina. Baixa probabilidade de detecção. Treinamento superposto. Sensor acústico vetorial. Tempo reverso passivo.

**Abstract:** This study presents innovative techniques for low probability of detection underwater acoustic communications with a low probability of detection using a compact vector sensor capable of measuring acoustic pressure and particle velocity components at a single point. Experiments conducted off the coast of Algarve, Portugal, implemented the superimposed training technique combined with passive time reversal under simulated stealth conditions (signal-to-noise ratio between 0 and -10 dB). The results show that multichannel combining using the vector sensor improves communication performance by up to 47% compared with the use of the acoustic pressure channel alone.

**Keywords:** Underwater acoustic communication. Low probability of detection. Superimposed training. Acoustic vector sensor. Passive time reversal.

**1.** Capitão de Fragata. Doutor em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações pela Universidade do Algarve, Portugal, Mestre em *Applied Marine Physics* pela *Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science*, Universidade de Miami, EUA. Encarregado da Divisão de Comunicações Submarinas do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Praia dos Anjos do Arraial do Cabo, RJ - Brasil. E-mail: fabio.louza@marinha.mil.br

## 1. INTRODUÇÃO

As pesquisas em comunicações acústicas submarinas com baixa probabilidade de detecção (CSUB-BPD) têm recebido crescente atenção em função de suas aplicações de caráter dual, impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias e sensores (Diamant; Lampe, 2018). No setor civil, essas comunicações contribuem para a autonomia de sensores e veículos autônomos subaquáticos (VAS), empregados em atividades de exploração marinha e monitoramento ambiental. Por utilizarem sinais de baixa potência, possibilitam a telemetria de dados com reduzido consumo energético, prolongando a vida útil das baterias, além de minimizarem impactos sobre mamíferos marinhos, já que a potência dos sinais transmitidos se encontra abaixo do nível de ruído ambiente.

No âmbito militar naval, o interesse nas CSUB-BPD tem se intensificado, por serem um requisito essencial para o comando e controle de submarinos e VAS. Tais sistemas permitem a transmissão de mensagens curtas e sigilosas sem comprometer a furtividade das plataformas (Diamant; Lampe, 2018; Schulz; Wiegand, 2018). Nos Estados Unidos da América, a comercialização de sistemas de comunicação furtiva é regulada pela *United States Munitions List*<sup>1</sup>, cuja Categoria XI (iv) inclui modems acústicos e equipamentos que empregam técnicas de baixa probabilidade de detecção. Esse fator reforça a relevância estratégica de pesquisas desse tipo de comunicação para a Marinha do Brasil.

Entretanto, a operação de sistemas de comunicação acústica em ambientes de águas rasas, particularmente sobre a plataforma continental, ainda enfrenta desafios substanciais. Essa complexidade decorre da elevada variabilidade temporal e espacial do canal acústico, influenciada por fatores como alterações nos perfis de temperatura, desvanecimento por múltiplos percursos e o desvio Doppler, provocado pelo movimento relativo entre a fonte emissora e o receptor (Rodriguez, 2021). Tais fenômenos comprometem a confiabilidade da transmissão de dados, exigindo soluções inovadoras para mitigar seus

efeitos adversos. Entre as abordagens mais consolidadas para as CSUB-BPD destacam-se o espectro espalhado por sequência direta (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS) (Pelekanakis; Cazzanti, 2018), e a multiplexação por divisão de frequências ortogonais (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM) (Walree, 2006). Contudo, esses métodos exigem sincronização precisa e arranjos de hidrofones, pouco adequados para plataformas móveis de pequeno porte.

Os sensores vetoriais (VS) acústicos, do inglês *vector sensor*, surgem como alternativa promissora ao uso exclusivo de hidrofones. Considerados o estado da arte em recepção acústica submarina, os VS medem, de forma compacta e em um único ponto do espaço, tanto a pressão acústica quanto as componentes ortogonais da velocidade de partícula. Embora já consolidados em aplicações SONAR, do inglês *Sound Navigation and Ranging* (Felisberto *et. al.*, 2013; McEachern, 2003), os VS apenas recentemente começaram a ser explorados para comunicações acústicas submarinas (CSUBs) (Song *et. al.*, 2011; Louza; Jesus, 2022; Bozzi; Jesus, 2022).

## 2. OBJETIVOS

Este artigo apresenta e avalia técnicas inovadoras de processamento de sinais aplicadas a um sensor acústico, com ênfase em comunicações submarinas com baixa probabilidade de detecção (CSUB-BPD). Os principais objetivos são:

- i. analisar o uso do treinamento superposto (ST) do inglês *superimposed training*, como estratégia para aumentar a furtividade das comunicações e para estimativa contínua do canal acústico;
- ii. explorar as propriedades do sensor acústico vetorial, capaz de captar simultaneamente componentes de pressão e velocidade de partículas;
- iii. apresentar o método de reversão temporal passiva com treinamento superposto (STpTR, do inglês *ST passive time reversal*) para a equalização adaptativa dos sinais; e
- iv. com base em dados experimentais, avaliar a combinação multicanal do sensor vetorial tendo como métrica o gráfico da taxa de erro de bits (BER, do inglês *bit error rate*) versus relação sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*).

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.federalregister.gov/documents/2014/07/01/2014-14681/amendment-to-the-international-traffic-in-arms-regulations-united-states-munitions-list-category-xi>.

### 3. METODOLOGIA

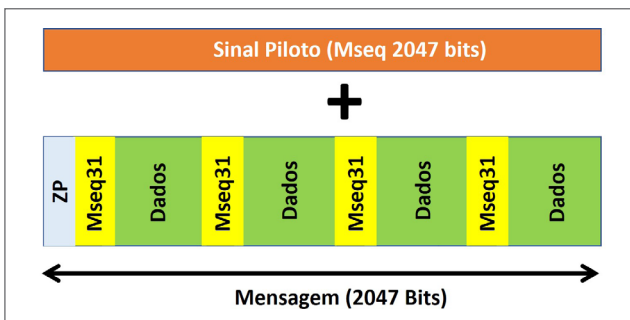
#### 3.1. TREINAMENTO SUPERPOSTO PARA COMUNICAÇÕES ACÚSTICAS SUBMARINAS COM BAIXA PROBABILIDADE DE DETECÇÃO

O conceito de treinamento superposto (ST) (Louza; DeFerrari, 2020) para CSUB-BPD envolve somar uma longa sequência de comprimento máximo (sequência M) à mensagem antes da transmissão. Dessa forma, ao serem transmitidas simultaneamente, o sinal piloto e a mensagem sofreriam as mesmas distorções ao se propagarem no mar, contribuindo para uma melhor estimativa do canal, sincronização e equalização.

Conhecidas como sinais “piloto”, as sequências M são pseudoaleatórias e determinísticas, possuindo propriedades úteis para comunicações furtivas, como boa autocorrelação e um espectro de frequências semelhante ao ruído branco. Além disso, por serem ortogonais, múltiplos usuários poderiam transmitir, simultaneamente, com reduzido grau de interferência (Yang; Yang, 2009).

A Figura 1 mostra a sequência de ST criada após a soma em banda base de uma sequência M de 2047 bits (MSeq2047) e uma mensagem de mesmo comprimento. A mensagem é composta por três bits preenchidos com zeros, seguidos por quatro pacotes de 511 bits. Cada pacote é delimitado por uma sequência M curta de 31 bits (MSeq31), seguida de 480 bits de dados que contém o seguinte pangrama:

(The Quick Brown Fox Jumps Over the Lazy Dog  
0123456789!@#%).



**Figura 1.** A sequência de treinamento superposto é criada pela soma do sinal piloto (MSeq2047) com a mensagem. A mensagem possui três bits preenchidos com zeros e quatro pacotes de dados com o mesmo conteúdo (480 bits), precedidos por uma curta MSeq31 para dupla sincronização.

Esse pangrama contém todas as letras do alfabeto inglês, dígitos de 0 a 9 e alguns caracteres especiais (!@#%), permitindo a transmissão de uma variedade de símbolos em um único pacote.

A sequência ST é dada por  $A(k) = Px(k) + Qd(k)$ , onde  $P$  e  $Q$  são as amplitudes,  $x(k) = \pm 1$  representa o código do piloto,  $d(k) = \pm 1$  representa a mensagem de dados e  $k$  é o índice de tempo discreto. A sequência ST, em banda base, modula a onda portadora conforme a Equação 1 a seguir:

$$\tilde{s}(t) = \text{Re}[|s(t)|e^{(2\pi f_c t + x(t)\theta)}] \quad (1)$$

onde  $s(t) = \sum_{k=1}^L A(k)q(t - kT_s)$ ,  $q(t - kT_s)$  é o filtro Hanning de conformação de pulso centrado em 0 com largura do período de cada símbolo  $T_s$ ,  $f_c$  é a frequência central da portadora,  $x(t)$  são os valores do código do sinal piloto em tempo contínuo; e  $\theta = \pi/2$  (modulação de *Binary Phase Shift Keying* (BPSK)). Cada bit modula 4 ciclos da onda portadora com  $f_c$  de 7,5 kHz e largura de banda de 3 kHz.

#### 3.2. O SENSOR ACÚSTICO VETORIAL

O VS acústico é formado por um hidrofone, responsável por captar a intensidade da pressão sonora, sem indicar sua direção, e por sensores (acelerômetros) que medem a velocidade das partículas do meio nas direções x, y e z. Essa combinação permite ao VS não apenas detectar a presença do som, mas também identificar sua direção de propagação, caracterizando-o como um sensor direcional. As Equações 2.1 e 2.2 podem ser definidas como:

$$y_p = s * h_p + w_p \quad (2.1)$$

$$y_{v_{x,y,z}} = s * h_{v_{x,y,z}} + w_{v_{x,y,z}} \quad (2.2)$$

onde  $y_{p,v_{x,y,z}}$  são os sinais de pressão e velocidade de partículas,  $S$  é o sinal transmitido,  $h_{p,v_{x,y,z}}$  são as respostas ao impulso dos respectivos canais de pressão/velocidade de partículas,  $w_{p,v_{x,y,z}}$  são os ruídos ambientes aditivos, assumidos como isotrópicos, e o símbolo \* denota convolução.

Embora os sinais de pressão e de velocidade de partículas  $y_{p,v_{x,y,z}}$  sejam captados em um único ponto, o que indica que não há separação espacial entre os sensores, estudos demonstraram que os diferentes canais respondem de maneira distinta às ondas sonoras (Song *et al.*, 2011). Dessa forma, o VS acústico consegue explorar a diversidade espacial, melhorando a detecção e a robustez das comunicações através da combinação multicanal.

### 3.3. RECEPTOR USANDO INVERSÃO TEMPORAL PASSIVA

No receptor, o STpTR é usado para sincronização e equalização dos sinais recebidos (Louza; Jesus, 2022). A relação de amplitude escolhida entre mensagem (Q) e o sinal piloto (P) foi de  $Q/P = 4/5$ , equivalente a  $-1,94$  dB. Para comunicações furtivas, a amplitude do sinal piloto deve ser ligeiramente maior que a da mensagem, melhorando a detecção, a sincronização inicial baseada na MSeq2047 e a estimação de canal para equalização, mesmo em ambientes com baixa SNR.

A mesma sequência ST é transmitida  $Z$  vezes para explorar tanto a diversidade temporal (Figura 2, esquerda) quanto a diversidade espacial (Figura 2, direita) fornecida pelos canais do sensor vetorial. Na Figura 2 (esquerda), as sequências ST recebidas  $y_z(t + z\tau)$  são filtradas em banda passante, convertidas para banda base e compensadas para o efeito Doppler. Em seguida, para lidar com os efeitos do multipercurso do sinal causado pelas interações da onda acústica com a superfície e fundo marinhos, o STpTR realiza a convolução de  $y_z(t + z\tau)$  com sua própria resposta impulsiva, invertida no tempo  $\widehat{h}_z(-t)$ : , conforme Equação 3

$$o_z(t') = y_z(t') * \widehat{h}_z(-t') = s(t') * [h_z(t') * \widehat{h}_z(-t)] \quad (3)$$

onde  $t' = t + z\tau$  é o intervalo de tempo da sequência TS ( $Z$ ), e  $T$  é o período.

Para remover a interferência residual entre símbolos, é utilizado um filtro de Wiener. As sequências ST filtradas  $g_z(t + z\tau)$  são então correlacionadas com o sinal piloto  $x(k)$ , utilizando a transformada rápida de Hadamard (FHT, do inglês *fast Hadamard transform*), para realizar a compressão da energia de  $R_M(k)$ . Usando o maior pico da correlação cruzada  $h_z(t + z\tau)$  como referência, as sequências  $r_z(t + z\tau)$  são sincronizadas e uma média coerente é realizada, fornecendo um sinal com alta SNR ( $r_m(k)_{ave}$ ), além de corrigir erros em cada canal  $m$  disponível (Equação 4):

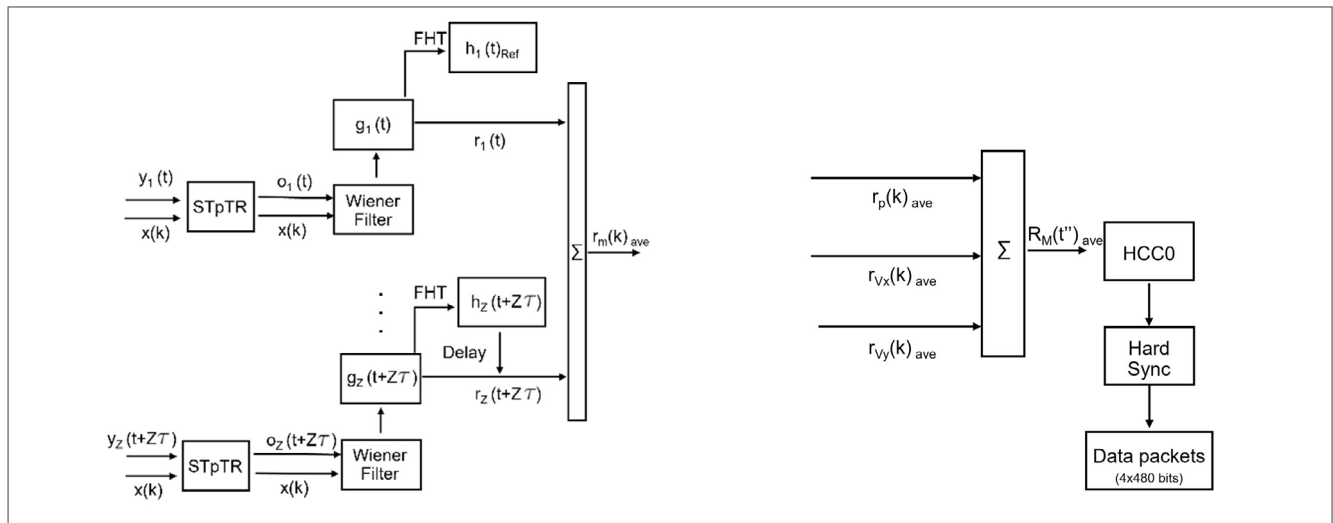
$$r_{m(k)_{ave}} = s(t') * \left[ \frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z w_z(n) * h_z(t') * \widehat{h}_z(-t') \right] \quad (4)$$

onde  $W_z(n)$  são os coeficientes do filtro de Wiener, e  $k$  é o índice de tempo discreto.

A diversidade espacial também é explorada por meio da combinação multicanal, conforme mostrado na Figura 2 (direita). As sequências com alta SNR  $r_m(k)_{ave}$ , provenientes dos canais de pressão e de velocidade de partículas, são combinadas de acordo com a Equação 5:

$$R_{M(k)} = s(t') * \left[ \frac{1}{MZ} \sum_{m=1}^M \sum_{z=1}^Z w_z(n) * h_z(t') * \widehat{h}_z(-t') \right] \quad (5)$$

Portanto, um alto ganho de processamento pode ser obtido no receptor VS, aproveitando a média coerente temporal e espacial.



**Figura 2. Esquerda:** Diagrama do receptor reversão temporal passiva com treinamento superposto (STpTR), mostrando a equalização do canal, a sincronização inicial, e a média coerente de  $Z$  sequências TS. **Direita:** Diagrama da combinação multicanal do sensor vetorial (VS), HCC0, a dupla sincronização (Hard Sync) e a demodulação dos dados da mensagem.

### 3.4. CANCELAMENTO DE INTERFERÊNCIA E RECUPERAÇÃO DA MENSAGEM

Para remover a interferência do sinal piloto sobre a mensagem, emprega-se a técnica de *hyperslice cancellation by coordinate zeroing* (HCC0) (Yang; Yang, 2009). Inicialmente, a FHT é aplicada à sequência TS ( $R_m(k)$ ), que contém simultaneamente o sinal piloto  $Px(k)$  e a mensagem  $Qd(k)$  a ser decodificada. Em seguida, o algoritmo HCC0 elimina as amostras cuja amplitude exceda um limiar definido  $n$ , suprimindo assim a componente de treinamento da sequência TS. Após a FHT inversa, a sincronização fina é realizada por meio da correlação da sequência MSeq31 presente em  $Qd(k)$  (Figura 3, canto inferior direito), possibilitando a reconstrução dos quatro pacotes de dados, cada um com 480 bits (Figura 1).

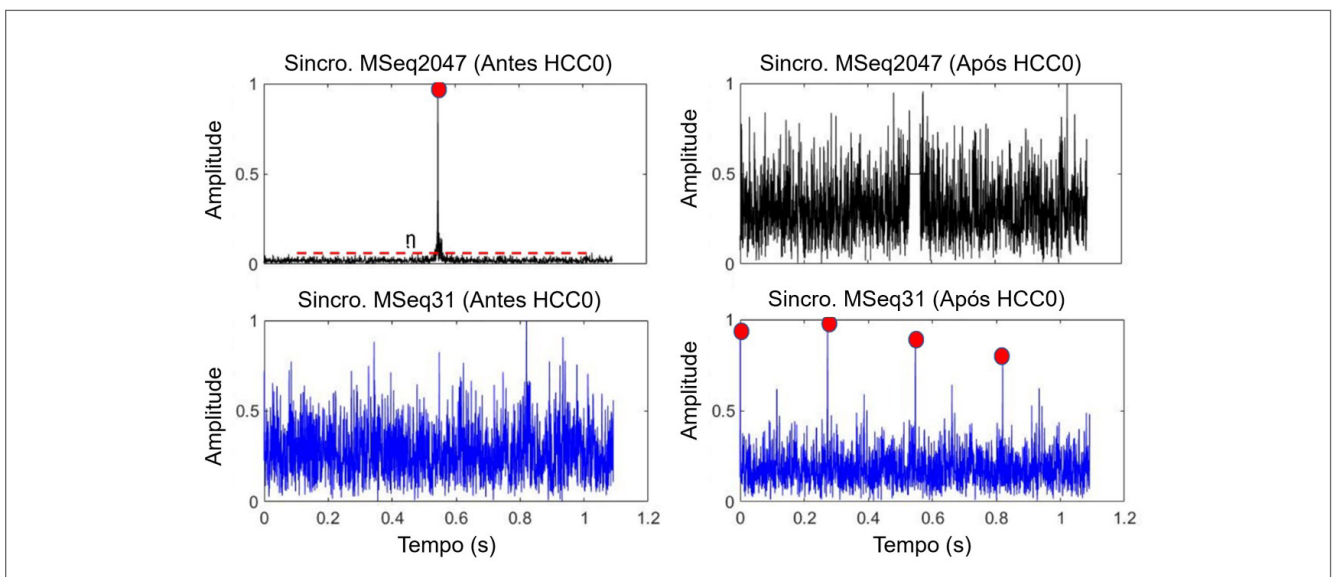
## 4. RESULTADOS

### 4.1. ANÁLISE DO TREINAMENTO SUPERPOSTO: A VISÃO DO INTERCEPTADOR

A literatura sobre CSUB-BPD geralmente assume que um interceptador não possui os códigos utilizados para detecção com

filtro casado (Diamant; Lampe, 2018). No entanto, para avaliar a discricção do treinamento superposto, considera-se um cenário em que o interceptador tenha acesso aos referidos códigos de sincronização (MSeq2047 e MSeq31). A Figura 3 (esquerda) mostra que, embora o sinal piloto MSeq2047 seja detectável por correlação, sua interferência impede a identificação dos picos da MSeq31, inviabilizando a decodificação da mensagem. Porém, após a aplicação da técnica HCC0, o sinal piloto é removido (Figura 3, canto superior direito), permitindo que os picos de sincronização da MSeq31 se tornem visíveis (Figura 3, canto inferior direito), viabilizando a recuperação dos dados pelo receptor legítimo.

Em uma avaliação complementar, assume-se que o interceptador dispõe de conhecimento limitado sobre a faixa de frequências do sinal transmitido. Assim, torna-se necessário recorrer à análise espectral como estratégia de detecção, comumente realizada por operadores de sistemas SONAR embarcados em meios navais (Figura 4). Para essa análise, foram usados dados do experimento EMSO'21 VS (Seção 4.2). A Figura 4 (esquerda) apresenta o espectrograma do sinal original transmitido a partir do ponto PT1 (Figura 5, esquerda), e recebido pelo sensor direcional  $V_y$ , mostrando um sinal visível, mas variante no tempo, com forte desvanecimento entre 5 e 20 segundos. No entanto, quando a SNR média é inferior a  $-8$  dB, o sinal torna-se praticamente imperceptível, ficando oculto no espectro de ruído (Figura 4, direita).



**Figura 3.** Esquerda: No gráfico superior, o pico de correlação cruzada da MSeq2047 é visível. No gráfico inferior, os picos da correlação do MSeq31 não são visíveis devido à interferência. Direita: No gráfico superior, após a aplicação do HCC0, o pico da correlação não é visível, confirmando a remoção da sequência de treinamento. O gráfico inferior mostra os picos de sincronização usando a MSeq31 (pontos vermelhos).

## 4.2. EXPERIMENTO EMSO'21 VS

O experimento EMSO'21 VS, conduzido pelo Laboratório de Processamento de Sinais da Universidade do Algarve (Portugal), em 24 de novembro de 2021, teve como objetivo avaliar o desempenho de sistemas de CSUB utilizando um VS acústico bidimensional (Geospectrum VS, modelo 35). Este sensor é capaz de medir simultaneamente a pressão acústica e as componentes horizontais da velocidade de partículas ( $V_x$  e  $V_y$ ), permitindo uma análise espacial do campo sonoro.

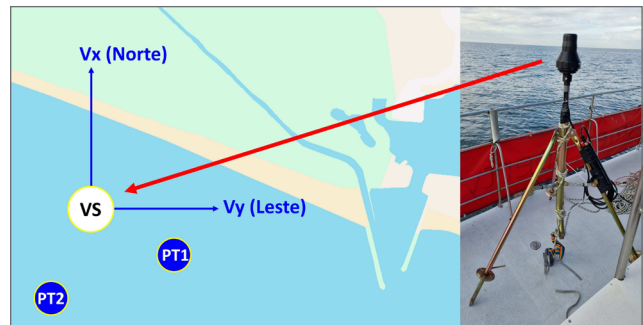
A Figura 5 (esquerda) mostra o croqui do experimento. O sensor foi instalado no topo de um tripé (Figura 5, direita), fixado ao fundo do mar, cerca de 2 metros acima do leito, em uma profundidade total de 20 metros. Um transdutor omnidirecional Lubell-916C, foi suspenso por uma embarcação à deriva, a aproximadamente 7 metros abaixo da superfície. Os sinais com frequência central de 7,5 kHz e largura de banda de 3 kHz, foram emitidos a partir de diferentes posições, variando a distância até o receptor e o ângulo de chegada.

Para permitir a soma coerente dos sinais e melhorar a SNR, cada ponto de transmissão emitiu blocos contendo 55 sequências ST idênticas e consecutivas, seguidas por um período de ruído utilizado para estimativa da SNR. Foram analisados dois pontos de transmissão: PT1, a 1.900 metros do sensor, com transmissões paralelas à costa sobre a isóbata de 20 metros; e PT2, a 1.300 metros, com transmissões perpendiculares à costa, e 30 metros de profundidade. Os canais vetoriais  $V_x$  e  $V_y$  estavam orientados para o Norte e Leste, respectivamente (Fig. 5, esquerda).

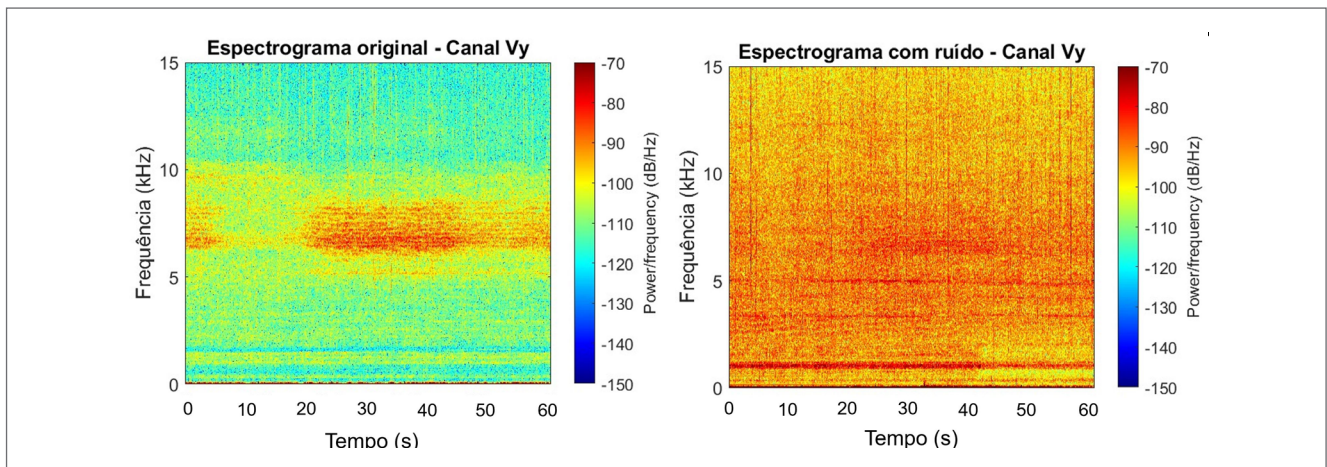
Embora os dados originais apresentassem alta SNR, para simular um cenário de comunicação furtiva, foi adicionado ruído ambiente impulsivo, previamente gravado antes das transmissões. Considerando uma SNR  $< -8$  dB como referência para sistemas CSUB-BPD (Yang; Yang, 2008), os sinais foram processados com SNR variando entre 0 e  $-10$  dB, permitindo avaliar o desempenho do sistema em ambientes altamente ruidosos.

Após a adição do ruído, os sinais recebidos  $y_z(t + \tau)$  foram filtrados na faixa de 6 a 9 kHz, correspondente à banda de transmissão. Para cada canal  $m$ , a SNR de entrada (em dB) para foi estimada usando a fórmula (Equação 6):

$$SNR_m = 10 \log_{10} \left( \frac{S_m - N_m}{N_m} \right) \quad (6)$$



**Figura 5.** Esquerda: Croqui do experimento EMSO'21 VS, na costa do Algarve/Portugal. O PT1 dista cerca de 1900m de VS, transmitindo paralelo à costa. O PT 2 dista 1300m, transmitindo perpendicular à costa. Direita: Foto do sensor vetorial (VS) montado em um tripé, antes de ser posicionado no fundo do mar.



**Figura 4.** Esquerda: Espectrograma do sinal original emitido no PT1, gravado pelo canal  $V_y$ , mostra um forte desvanecimento do sinal entre 5 e 20 segundos. Direita: Espectrograma do mesmo sinal, após adição de ruído, o torna praticamente imperceptível ao operador SONAR.

onde  $S$  representa a potência média da soma dos sinais recebidos com ruído adicionado e  $N$  é a potência média do ruído durante um período de mesma duração de  $S$ , estimado após cada transmissão. Para a combinação multicanal no espaço, a SNR de entrada do arranjo foi calculada pela Equação 7:

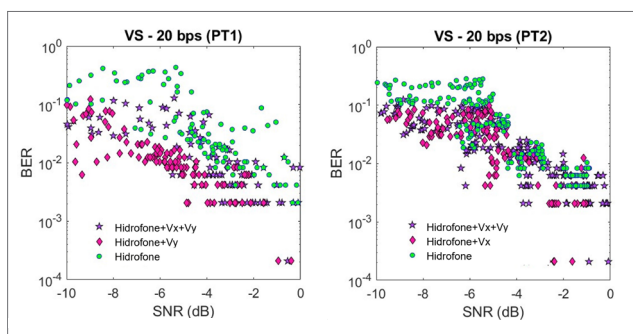
$$SNR_{array} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{S_m - N_m}{N_m} \right) \quad (7)$$

### 4.3. DESEMPENHO DO SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

A Figura 6 apresenta o desempenho do sistema de comunicação, relacionando a BER com a SNR para diferentes configurações: um canal (hidrofone); dois canais (PT1: hidrofone +  $V_y$ ; PT2: hidrofone +  $V_x$ ); e três canais (hidrofone +  $V_x$  +  $V_y$ ).

Para avaliar a robustez do sistema, a BER foi estimada com base em 20 sequências ST, correspondendo à taxa efetiva de 20 bps, favorecendo a correção de erros por meio da média coerente dos sinais.

Neste artigo, a presença de múltiplos caminhos e os altos níveis de ruído adicionados para simular uma condição de furtividade, dificultaram a demodulação dos sinais recebidos. Ainda assim, a Figura 6 mostra que para SNR variando entre 0 e -10 dB, o sistema de comunicação alcançou BER inferiores a  $10^{-2}$ , sendo as mensagens livres de erro indicadas por  $BER = 2 \times 10^{-4}$ .



**Figura 6.** Bit error rate (BER) vs. signal-to-noise ratio (SNR) para transmissões a partir do PT1 (esquerda) e PT2 (Direita). Combinação multicanal de um sensor vetorial (VS): hidrofone (círculo verde), hidrofone +  $V_x$  (PT1) ou hidrofone +  $V_y$  (PT2) (losango rosa), hidrofone +  $V_x$  +  $V_y$  (estrela roxa). Mensagens livres de erro representadas por  $BER = 2 \times 10^{-4}$ .

Além disso, a Figura 6 (esquerda) mostra que para sinais transmitidos de PT1, paralelos à linha de costa e predominantemente alinhados ao canal  $V_y$ , a configuração com 2 canais (hidrofone +  $V_y$ ) reduziu, em média, a BER em 47% em relação ao hidrofone isolado.

Já a Figura 6 (direita) indica que para sinais transmitidos de PT2, alinhados ao canal  $V_x$  e perpendiculares à costa, a combinação (hidrofone +  $V_x$ ) proporcionou uma redução de aproximadamente 31% na BER. Por outro lado, as Figuras 6 (esquerda/direita) evidenciam que as configurações com três canais (hidrofone +  $V_y$  +  $V_x$ ) que incluem canais perpendiculares à direção da propagação, apresentaram desempenho inferior, com BER mais elevadas em comparação às configurações com apenas dois canais.

## 5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou técnicas inovadoras para comunicações submarinas discretas, explorando a combinação multicanal de um sensor acústico vetorial. Para simular cenários de baixa probabilidade de detecção, foi incorporado ruído ambiente aos dados obtidos em experimento de mar, reduzindo a SNR. A aplicação da técnica de treinamento superposto mostrou-se eficaz na restrição da interceptação por receptores não autorizados. O desempenho do sistema de comunicação foi avaliado por meio da BER em função da SNR, comparando um sensor de pressão isolado com configurações multicanal que incluem componentes de velocidade de partícula. Ao explorar simultaneamente a diversidade temporal e espacial do sensor vetorial, o sistema demonstrou desempenho promissor para comunicações furtivas, inclusive em plataformas compactas como os VAS, alcançando BER inferiores a  $10^{-2}$  para SNR entre 0 e -10 dB.

## AGRADECIMENTOS

À Marinha do Brasil, pelo apoio concedido por meio do Programa de Cursos e Estágios no Exterior (Portaria nº 227/MB/2019), que viabilizou parte fundamental desta pesquisa. E ao Professor Sérgio Jesus (Universidade do Algarve, Portugal) pela valiosa parceria e contribuição ao longo desta jornada.

## REFERÊNCIAS

- BOZZI, F. A.; JESUS, S. M. Vector sensor steering-dependent performance in an underwater acoustic communication field experiment. *Sensors*, v. 22, n. 21, p. 8332, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22218332>
- Diamant, R.; LAMPE, L. Low probability of detection for underwater acoustic communication: a review. *IEEE Access*, v. 6, p. 19099-19112, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2818110>
- FELISBERTO, P.; RODRIGUEZ, O.; SANTOS, P.; EY, E.; JESUS, S. M. Experimental results of underwater cooperative source localization using a single acoustic vector sensor. *Sensors*, v. 13, n. 7, p. 8856-8878, 2013. <https://doi.org/10.3390/s130708856>
- LOUZA, F. B.; DEFERRARI, H. A. Superimposed training low probability of detection underwater communications. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 148, n. 3, p. EL273-EL278, 2020. <https://doi.org/10.1121/10.0001934>
- Louza, F. B.; Jesus, S. M. Low probability of detection underwater communications using a vector sensor. *In: 2022 SIXTH UNDERWATER COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (UCOMMS)*, 2022, Lerici, Italy. *Conference [...]*. Italy: IEEE, 2022. p. 1-5. <https://doi.org/10.1109/UComms56954.2022.9905685>
- MCEACHERN, J. F. Overview of vector sensors for undersea applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 114, p. 2450-2451, 2003. <https://doi.org/10.1121/1.4779483>
- PELEKANAKIS, K.; CAZZANTI, L. On adaptive modulation for low SNR underwater acoustic communications. *In: OCEANS 2018 MTS/*
- IEEE Charleston, 2018, Charleston. *Conference [...]*. Charleston: IEEE, 2018. p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2018.8604521>
- Rodriguez, O. C. *Fundamentos de acústica submarina*. 1. ed. Faro: Universidade do Algarve Editora, 2021.
- Schulz, F.; Wiegand, T. Underwater acoustic communications for submarines - a sonar company's perspective. *In: FOURTH UNDERWATER COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE (UCOMMS)*, 2018, Lerici, Italy. *Conference [...]*. Italy: IEEE, 2018. p. 1-5. <https://doi.org/10.1109/UComms.2018.8493179>
- SONG, A.; ABDI, A.; BADIEY, M.; HURSKY, P. Experimental demonstration of underwater acoustic communication by vector sensors. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 36, p. 454-461, 2011. <https://doi.org/10.1109/JOE.2011.2133050>
- WALREE, P. V. UUV covert acoustic communications. *In: UNDERWATER DEFENSE TECHNOLOGY - UDT*, 2006, Hamburg, Alemanha, 2006. *Anais [...]*. 2006. p. 1-8.
- YANG, T. C.; YANG, W. B. Performance analysis of direct-sequence spread-spectrum underwater acoustic communications with low signal-to-noise-ratio input signals. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 123, n. 2, p. 842-855, 2008. <https://doi.org/10.1121/1.2828053>
- YANG, T. C.; YANG, W. B. Interference suppression for code-division multiple-access communications in an underwater acoustic channel. *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 126, n. 1, p. 220-228, 2009. <https://doi.org/10.1121/1.3147484>