

Transmissão Submarina com Sinais Chirp Inspirados em Cetáceos: Implementação Computacional

Marco André Desbrousses Cotta

Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha (CGAEM), Niterói/RJ – Brasil

Resumo – Este artigo apresenta a implementação de um sistema de comunicação submarina baseado em sinais chirp, inspirado nos padrões acústicos de cetáceos como golfinhos e baleias. A proposta explora o mascaramento acústico natural desses sinais como estratégia de dissimulação, dificultando a detecção por sistemas de vigilância de oponentes. A metodologia contempla a geração de sinais chirp (logarítmico e quadrático), a modulação digital por multiplicação com sequências binárias e a demodulação por correlação cruzada. O sistema foi desenvolvido em Python, com interface gráfica em PyQt5, permitindo a visualização em tempo real da transmissão e recepção das mensagens. Os resultados obtidos evidenciam a viabilidade da proposta, assegurando a recuperação eficiente das mensagens. Como desdobramentos futuros, pretende-se otimizar algoritmos de equalização, aplicar técnicas de filtragem adaptativa para mitigar efeitos de ruído ambiente e realizar testes experimentais em campo para validação prática do sistema.

Palavras-Chave – comunicação submarina, sinais chirp, processamento de sinais.

I. INTRODUÇÃO

A comunicação submarina enfrenta desafios significativos devido às características físicas do meio aquático, como variações na velocidade do som, presença de ruído ambiental e múltiplos caminhos de propagação. Sinais acústicos representam a alternativa mais eficiente para a transmissão de dados subaquáticos, aproveitando propriedades como compressão de pulso e capacidade de atravessar longas distâncias mesmo em ambientes com alto nível de interferência [1][2][3].

Sinais do tipo chirp, utilizados em comunicação por cetáceos, surgem como alternativa viável para modulação e transmissão de dados submarinos. Este estudo propõe um sistema de comunicação acústica baseado em sinais chirp inspirados em padrões sonoros naturais de golfinhos e baleias, permitindo transmissão de mensagens textuais por modulação digital. Ao reproduzir sinteticamente sons característicos desses animais, não elimina a percepção do sinal, mas o dissimula de modo que sistemas de vigilância de oponentes o identifiquem como ruído biológico, reduzindo a probabilidade de classificação como transmissão artificial [4][5].

Além da eficiência técnica, esse método oferece vantagem estratégica, tornando a comunicação entre navios de superfície e submarinos menos suscetível à detecção, camuflando transmissões em meio ao ruído biológico ambiente. Dessa forma, reduz-se a probabilidade de correta classificação pelos sistemas passivos de vigilância adversários.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

II.1. PROPAGAÇÃO ACÚSTICA SUBMARINA

A velocidade do som em água depende de temperatura, salinidade e pressão, variando com a profundidade. Essas variações provocam refração das ondas acústicas, enquanto reflexão e espalhamento ocorrem em interfaces como fundo, superfície e objetos submersos, influenciando intensidade e direção do sinal recebido [6][7].

Sinais chirp apresentam vantagem por sua ampla largura de banda e capacidade de compressão de pulso, melhorando a SNR (*Signal to Noise Ratio* – SNR) após correlação. Entretanto, isoladamente, podem não garantir SNR adequada em ambientes altamente ruidosos [3].

II.2. SINAIS CHIRP

O chirp caracteriza-se por variação contínua de frequência ao longo do tempo e pode ser linear, exponencial ou quadrático. Golfinhos utilizam chirps lineares para ecolocalização e navegação, enquanto sinais mais complexos são usados na comunicação social. Baleias utilizam chirps quadráticos para comunicação a longas distâncias [4][5][8].

Estudos recentes destacam técnicas que aumentam a confiabilidade e a segurança de transmissões acústicas de baixa probabilidade de detecção. Demonstraram que o emprego de treinamento sobreposto em comunicações submarinas eleva a razão sinal-ruído (SNR) e reduz a probabilidade de detecção [9], sendo aplicável ao uso de sinais *chirp* em sistemas de comunicação sigilosa.

III. METODOLOGIA

III.1. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

O sistema foi desenvolvido em Python, utilizando: PyQt5: interface gráfica; NumPy: manipulação numérica; SciPy: geração e análise de sinais; e Matplotlib: visualização de espectrogramas [10][11][12].

Foram modelados dois tipos de sinais chirp sintéticos reproduzindo sons de cetáceos: Golfinho: chirp logarítmico da Fig. 1, com frequência de 3 kHz a 12 kHz [4][8].

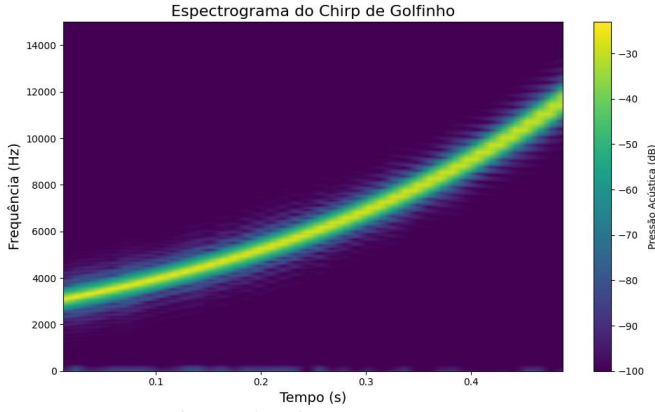


Fig. 1. Chirp Logarítmico - frequência 3kHz e 12kHz com 0,5s de duração.

Baleia: chirp quadrático da Fig. 2, com frequência de 1 Hz a 100 Hz [5].

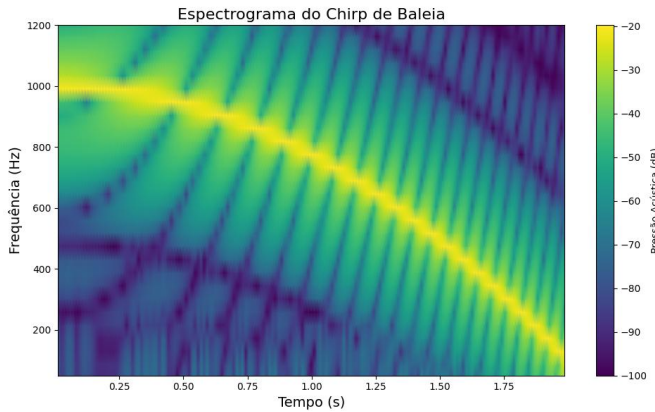


Fig. 2. Chirp quadrático - frequência entre 1kHz e 100Hz com 2s de duração.

A modulação ocorre multiplicando o chirp por um trem de pulsos binários, gerando envelope discreto. O espectrograma permite análise da composição espectral do sinal modulado e avaliação da qualidade de transmissão [6][7].

A demodulação é realizada por correlação cruzada entre o sinal recebido e o chirp original, reconstruindo a sequência binária da mensagem [6][12][13].

III.2. MODELAGEM MATEMÁTICA

O chirp logarítmico é descrito por:

$$s(t) = A \cdot \cos \left[2\pi f_0 \left(\frac{e^{kt} - 1}{k} \right) \right], 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

onde: A é a amplitude do sinal [Pa], f_0 é a frequência inicial [Hz], $k = \frac{\ln(f_1/f_0)}{T}$ é a taxa de variação de frequência [s^{-1}], T é a duração do sinal [s] e f_1 é a frequência final [Hz] [4][5].

No caso do chirp quadrático, a variação da frequência segue uma relação não linear.

A modulação da mensagem é realizada pela multiplicação do sinal chirp por um trem de pulsos representando a sequência binária da mensagem:

$$s(t) = A \cos \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{k}{3} t^3 \right) \right], \quad (2)$$

onde um sinal discreto assumindo valores conforme a codificação da mensagem:

$$s_m(t) = s(t) \cdot b(t), \quad (3)$$

onde $b(t)$ é um sinal discreto assumindo valores 0 ou 1 conforme a codificação da mensagem [4].

Na prática, o sinal recebido $r(t)$ é afetado por ruído ambiental, biológico e instrumental. Para as simulações deste trabalho, o ruído subaquático foi gerado sinteticamente de forma controlada, permitindo reproduzir características espectrais e temporais típicas do ambiente marinho [8][12]. O ruído sintético $n(t)$ foi construído como a soma de quatro componentes principais:

$$n(t) = n_b(t) + n_s(t) + n_{bio}(t) + n_h(t), \quad (4)$$

onde: $n_b(t)$ é o ruído de banda larga (vento e ondas), gerado a partir de ruído Gaussiano branco filtrado no domínio da frequência para obter uma dependência espectral $S(f) \propto f^{-\alpha}$ com $\alpha=1.2$ e frequência de referência $f_{ref} = 1\text{Hz}$ [12]; $n_s(t)$ representa ruído de embarcações e veículos, modelado como soma de K componentes tonais com envelopes de amplitude lenta $A_k(t)$ para simular variações temporais (manobras e aceleração); é o ruído biológico intermitente (cliques e assobios), $n_{bio}(t)$ representado como soma de pulsos Gaussianos modulados por portadora, com tempos de chegada t_i amostrados por processo de Poisson e parâmetros compatíveis com a banda estudada [8]; $n_h(t)$ corresponde ao ruído instrumental do sensor, modelado como ruído Gaussiano branco de baixa potência [12].

O sinal recebido considerado nas simulações é, portanto:

$$r(t) = s_m(t) + n(t). \quad (5)$$

Para uma SNR alvo, a série de ruído foi normalizada e escalada de forma que a potência média do ruído P_n satisfaça $P_n = P_s / 10^{SNR/10}$, onde P_s é a potência média do sinal transmitido $s_m(t)$ [12]. Este procedimento permitiu controlar experimentalmente as condições de SNR (10–30 dB) utilizadas nas simulações, sem aplicação de filtros de mitigação, possibilitando avaliar diretamente o desempenho dos sinais chirp em presença de ruído ambiente.

A demodulação ocorre através da correlação cruzada do sinal recebido $r(t)$ com o sinal chirp original $s(t)$:

$$R(\tau) = \int R(T) s^*(t - \tau) dt. \quad (6)$$

A identificação dos picos de correlação viabiliza a reconstrução da sequência binária transmitida. Contudo, faz-se necessário abordar os mecanismos adotados para a mitigação de erros na transmissão, especificando se há a implementação de técnicas de correção ou se a recuperação dos dados ocorre por um esquema determinístico, sem redundância para a detecção e correção de falhas e, consequentemente, a mensagem original [8].

III.3. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A implementação computacional do sistema de comunicação submarina baseado em sinais chirp envolve estratégias específicas para minimizar os impactos do ruído subaquático. O ambiente marítimo é caracterizado por interferências naturais, como ondas, vento e ruído biológico marinho, além de fontes antropogênicas, como embarcações, sonares e equipamentos submersos [8][12].

Para simular essas condições de forma controlada, o ruído ambiental foi modelado sinteticamente, conforme descrito na Seção III.2. O sinal recebido $r(t)$ é composto pelo chirp modulado $s_m(t)$ somado ao ruído sintético $n(t)$, permitindo avaliar a performance do sistema sob diferentes níveis de relação sinal-ruído (SNR) sem aplicação de filtros adaptativos, garantindo a avaliação do comportamento intrínseco dos sinais chirp frente ao ruído ambiente. [12].

A implementação computacional segue quatro etapas principais:

1. Geração do sinal chirp sintético – Produção dos chirps logarítmicos e quadráticos dentro da faixa de frequência de operação desejada, reproduzindo padrões acústicos de cetáceos [4][5][8].
2. Modulação e transmissão da mensagem – Conversão da mensagem textual em trem de pulsos binários sobreposto ao chirp, produzindo o sinal $s_m(t) = s(t) \cdot b(t)$ [8].
3. Filtragem e mitigação de ruído – Embora nesta etapa das simulações não tenham sido aplicados filtros adaptativos, o sistema está preparado para utilização futura de técnicas como filtros de Wiener, Kalman ou redes neurais, que podem estimar e remover componentes ruidosos do sinal recebido, aumentando a SNR [8].
4. Decodificação da mensagem recebida – Extração da sequência binária transmitida a partir da correlação cruzada entre o sinal recebido $r(t)$ e o chirp original $s(t)$, identificando picos de correlação para reconstrução da mensagem [9].

A interface gráfica, implementada em PyQt5, possibilita ao usuário inserir mensagens e acompanhar, em tempo real, a transmissão e recepção dos sinais, incluindo a análise espectral por meio do espectrograma apresentado na Fig. 4. Controles dedicados permitem iniciar a transmissão,

ajustar parâmetros do chirp e monitorar a potência do sinal e do ruído, viabilizando testes de SNR variando de 10 a 30 dB, conforme a modelagem apresentada na Seção III.2 [10][11][12].

Essa solução integrada assegura que a avaliação do sistema contemple simultaneamente os efeitos da propagação acústica subaquática, a presença de ruído sintético e a performance dos sinais chirp em condições próximas às reais, fornecendo uma base consistente para análise da confiabilidade e eficiência do método proposto.

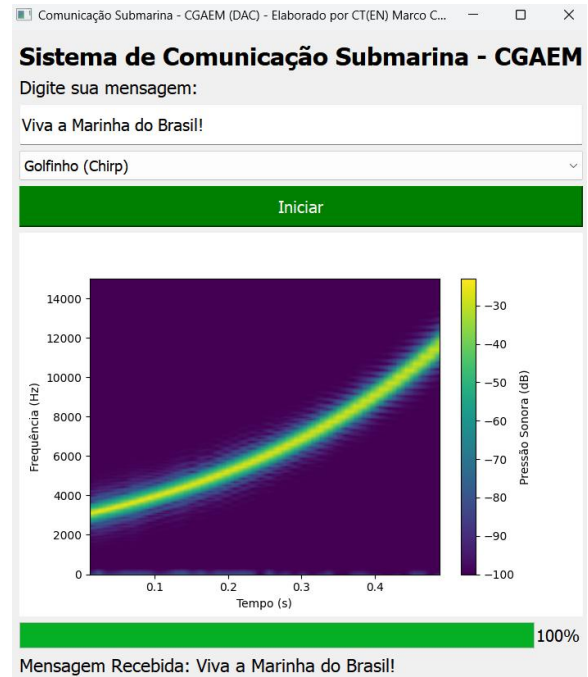


Fig. 4 - Interface Gráfica do Programa de Sistema de Comunicação Submarina do CGAEM

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validar a implementação do sistema de comunicação submarina, foram realizados testes computacionais considerando diferentes cenários de propagação acústica e níveis de interferência representados por ruído sintético modelado. As simulações contemplaram SNR variando de 10 a 30 dB, abrangendo condições que vão desde ambientes relativamente silenciosos até cenários com elevado nível de ruído ambiental, biológico e instrumental [1][6][12]. A potência de transmissão adotada foi de 180 dB re 1 μ Pa a 1 m, valor típico para sistemas de comunicação submarina de médio alcance [7].

Para sinais chirp logarítmicos, a taxa média de erro binário (BER) permaneceu abaixo de 5% para SNR superiores a 20 dB, demonstrando elevada confiabilidade na recuperação das mensagens [14]. O chirp quadrático apresentou desempenho similar, evidenciando maior robustez frente a interferências de baixa frequência [15]. A análise espectral evidenciou que a compressão de pulso e a ampla largura de

banda dos sinais chirp aumentam significativamente a resistência ao ruído, garantindo a recuperação precisa das mensagens mesmo em condições adversas [9][16].

Além disso, os resultados permitiram quantificar a eficiência do sistema em diferentes condições de ruído e distâncias de transmissão, fornecendo parâmetros essenciais para o planejamento de experimentos futuros em campo. O detalhamento das variáveis consideradas — como amplitude do sinal, frequência inicial e final, duração do chirp, potência de transmissão e perfil do ambiente acústico — oferece subsídios para replicação e validação da metodologia proposta, atendendo aos requisitos de confiabilidade e rigor científico exigidos em aplicações navais [17].

V. CONCLUSÃO

A utilização de sinais chirp para comunicação submarina mostrou-se eficaz, permitindo a transmissão de mensagens mesmo em ambientes subaquáticos ruidosos. A modelagem matemática combinada com a implementação computacional, incluindo o uso de ruído sintético representando componentes ambientais, biológicos e instrumentais, demonstrou a viabilidade do sistema e sua capacidade de reconstrução precisa dos sinais transmitidos.

Como perspectivas futuras, é possível investigar otimização de algoritmos de equalização para mitigar interferências, a aplicação de técnicas de filtragem adaptativa e a realização de testes experimentais em cenários reais para validar a aplicabilidade prática do método. Além disso, pretende-se explorar o potencial de furtividade acústica do sistema em operações navais, avaliando seu desempenho frente a sistemas passivos de vigilância e sua eficácia como meio de comunicação sigiloso entre submarinos e navios de superfície.

REFERÊNCIAS

- [1] AKYILDIZ, I. F. et al. State-of-the-art in underwater acoustic sensor networks. *Physical Communication*, v. 1, n. 1, p. 7–27, 2008.
- [2] AU, W. W. L. *The Sonar of Dolphins*. Springer Science & Business Media, 1993.
- [3] HAYKIN, S. *Adaptive Filter Theory*. 4. ed. Prentice Hall, 2002.
- [4] MEDWIN, H.; CLAY, C. S. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press, 1998.
- [5] PAYNE, R.; WEBB, D. Orientation by Means of Long Range Acoustic Signaling in Baleen Whales. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 188, p. 110–141, 1971.
- [6] URICK, R. J. *Principles of Underwater Sound*. 3. ed. McGraw-Hill, 1983.
- [7] JENSEN, F. B.; KUPERMAN, W. A.; PORTER, M. B.; SCHMIDT, H. *Computational Ocean Acoustics*. 2. ed. New York: Springer, 2011.
- [8] TYACK, P. L. Contributions of acoustic biology to the applied problem of noise impacts on marine mammals. *Marine Ecology Progress Series*, v. 395, p. 255–274, 2008.
- [9] LOUZA, F. B.; DEFERRARI, H. A.; et al. Superimposed training low probability of detection underwater communications. *J. Acoust. Soc. Am. Express Letters*, v. 148, n. 3, p. EL211–EL216, 2020.
- [10] HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007.

- [11] OLIPHANT, T. E. *Python for Scientific Computing*. *Computing in Science & Engineering*, v. 9, n. 3, p. 10–20, 2007.
- [12] OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. 3. ed. Pearson, 2009.
- [13] PORTER, M. B.; BOTTOM, L. *Theoretical and Computational Acoustics*. Singapore: World Scientific, 1994.
- [14] STOJANOVIC, M. Recent Advances in High-Speed Underwater Acoustic Communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 21, n. 2, p. 125–136, 1996.
- [15] CHEN, Z.; SONG, A.; ZHOU, S. Chirp Spread Spectrum for Underwater Acoustic Communications. *IEEE OCEANS Conference*, 2018.
- [16] LEPAGE, K.; HANSEN, R. Pulse Compression Techniques in Underwater Acoustics. *IEEE OCEANS Conference*, 2004.
- [17] COATES, R. *Underwater Acoustic Systems*. London: Macmillan, 1989.