

ESTEGANOGRAFIA: As comunicações acústicas furtivas na guerra submarina

FÁBIO BARBOSA LOUZA*

Capitão de Fragata

ANTÔNIO WALKIR SIBANTO CALDEIRA**

Capitão-Tenente (EN)

SUMÁRIO

Introdução

Esteganografia nas comunicações submarinas

Principais métodos da esteganografia nas

comunicações submarinas

A esteganografia na guerra submarina

Perspectivas na Marinha do Brasil

Considerações finais

INTRODUÇÃO

Em um cenário internacional marcado por uma crescente instabilidade política e pelos inúmeros conflitos em curso, a defesa nacional emerge como uma prioridade inquestionável para as

nações que investem consideravelmente em novas tecnologias que garantam não apenas a proteção de suas fronteiras, mas também a dissuasão de possíveis ameaças. Neste contexto, emergem como principais protagonistas os submarinos e os veículos autônomos submarinos (AUV – Auto-

*PhD. Engenheiro de Telecomunicações pela Universidade do Algarve, Portugal. Encarregado da Divisão de Comunicações Submarinas no Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM).

**MSc. Engenharia de Defesa pelo Instituto Militar de Engenharia. Ajudante da Divisão de Comunicações Submarinas no IEAPM.

nomous Underwater Vehicles), peças de inestimável valor no tabuleiro geopolítico pela habilidade de patrulhar vastas extensões de mar mantendo-se ocultos sob a vigilância inimiga, desempenhando, portanto, um papel crucial no exercício do poder dissuasório ao inibir uma variedade de ameaças em potencial.

No âmbito do Programa de Submarinos da Marinha (Prosub), destacam-se o projeto e a construção dos novos submarinos convencionais diesel-elétricos (S-BR) classe *Riachuelo* e o futuro submarino convencional com propulsão nuclear (SN-BR) classe *Álvaro Alberto*. A ocultação dos submarinos, em qualquer circunstância, possui máxima prioridade, a fim de preservar o sigilo das ações submarinas [1]. Porém,

apesar do nível de sofisticação tecnológica, para estabelecer comunicações rádio ou satelital, os S-BR ainda precisam se deslocar até a cota periscópica, perdendo a sua capacidade de ocultação, tornando-se vulneráveis ao ataque inimigo. Neste cenário, o emprego de um sistema de comunicação acústica permitiria que os S-BR reduzissem sua taxa de indiscrição e mantivessem sua ocultação, evitando subidas à cota periscópica para fins exclusivos de comunicação. Já para o SN-BR, o modem acústico seria fundamental para o recebimento de mensagens operativas, visto que não necessitam realizar esnorquel para o recarregamento das baterias. Além disso, o crescente uso dos AUV na guerra moderna tem impulsionado o desenvolvimento de novos sistemas de comunicação acústica submarina que permitam a sua

interoperabilidade com submarinos, potencializando as capacidades de vigilância e defesa marítima, possibilitando a troca de informações digitais em tempo real e a coordenação de operações conjuntas, o que facilitaria uma resposta coordenada às diferentes ameaças.

Entretanto, a depender do cenário tático, as comunicações acústicas podem ser detectadas por sonares passivos adversários, revelando a localização da fonte. Sendo assim, o sucesso das operações envolvendo submarinos e/ou AUV depende, fundamentalmente, de comunicações acústicas robustas e confiáveis que garantam a furtividade dos meios quando mergulhados. Neste contexto, o propósito deste artigo é apresentar o conceito de

esteganografia e as principais técnicas de processamento de sinais empregadas para reduzir a probabilidade de detecção e interceptação dos sinais de comunicação pelo sonar inimigo.

A esteganografia visa ocultar a existência da mensagem, camuflando a informação dentro de sinais conhecidos

ESTEGANOGRAFIA NAS COMUNICAÇÕES SUBMARINAS

A esteganografia é um ramo da criptologia que tem atraído especial atenção nas comunicações acústicas submarinas com ênfase nas aplicações militares, sendo objeto de diversos estudos e artigos científicos publicados por pesquisadores de grandes potências militares mundiais, como Estados Unidos, China e Coreia do Sul [2,3,4].

O termo esteganografia origina-se do grego *estegano*, que significa “esconder ou mascarar”, sendo este conceito muitas vezes confundido com a criptografia, embora haja fundamental diferença entre

estes dois ramos. A criptografia tem como propósito ocultar o significado da mensagem, garantindo que apenas os receptores que possuam a chave criptográfica possam decifrar a informação transmitida, reduzindo a probabilidade de interceptação. Já a esteganografia visa ocultar a existência da mensagem, escondendo ou camuflando a informação dentro de sinais conhecidos.

Operacionalmente relevante, este tipo de comunicação pode contribuir para o comando e controle de submarinos e AUV, em operações submarinas diversas, melhorando a furtividade dos meios ao reduzir a probabilidade de um sonar inimigo detectar a existência desses sinais e,

consequentemente, localizar e neutralizar a plataforma transmissora.

PRINCIPAIS MÉTODOS DA ESTEGANOGRAFIA NAS COMUNICAÇÕES SUBMARINAS

Existem dois métodos para emprego da esteganografia nas comunicações submarinas, conforme ilustrado na Figura 1:

- Comunicações com Baixa Probabilidade de Detecção (CSUB-BPD); e
- biomimetização de sons naturais de vida marinha, como vocalizações de baleias e golfinhos, para ocultar as mensagens.



Figura 1 – (a) Acima, a esteganografia com baixa probabilidade de detecção. Os sinais são visíveis apenas aos sonares e receptores amigos, reduzindo a probabilidade de detecção por submarinos inimigos. (b) Abaixo, a esteganografia biomimética camufla as mensagens em sons biológicos conhecidos, como golfinhos e baleias, confundindo os sonares inimigos. Sem saber se a transmissão é real ou sintética, a partir de um submarino, o contato é descartado e tratado como ruído.

No primeiro método (Fig. 1a), o propósito é permitir uma comunicação segura na maior distância possível enquanto minimiza as chances de detecção. Para isso, as CSUB-BPD transmitem sinais com baixa relação sinal-ruído, de modo a tentar torná-los indetectáveis e inaudíveis aos sonares. Porém o canal submarino é considerado um dos mais complexos ambientes de propagação para o estabelecimento de comunicações robustas e confiáveis, por variar com o tempo, a profundidade, a frequência de transmissão e a distância transmissor-receptor, entre outros fatores. Dessa forma, para compensar essa redução na potência do sinal e as complexidades da propagação acústica, são utilizadas diversas técnicas de modulação para comunicações digitais que exploram a redundância do sinal no tempo ou na frequência, como DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) e processamento por tempo reverso [5]. Entre as principais vantagens, além da possibilidade de ocultação das comunicações durante as operações submarinas, as CSUB-BPD contribuem com a redução do ruído submarino antropogênico, mitigando possíveis impactos sobre a vida marinha. Além disso, também colaboram com a economia de baterias dos AUV, responsáveis por alimentar os diversos sistemas embarcados, aumentando sua autonomia. Entretanto cabe destacar que a probabilidade de detecção é inversamente proporcional à distância, de modo que um sonar inimigo mais próximo da fonte observará um sinal mais forte e, portanto, terá maiores chances de detecção.

Já o segundo método da esteganografia consiste em biomimetizar ou imitar ruídos ambientais conhecidos, como as vocalizações de cetáceos (baleias e golfinhos),

para confundir o operador sonar inimigo (Fig. 1b). A premissa básica não é evitar a detecção do sinal como as CSUB-BPD, mas disfarçar a comunicação entre os veículos submersos, ocultando a mensagem dentro de sinais sintéticos similares aos dos cetáceos [3, 4, 6]. Dessa forma, o operador sonar tende a detectar e classificar a fonte acústica como ruído, descartando o contato. Os sinais acústicos desempenham múltiplos papéis vitais para estas espécies de mamíferos marinhos e variam de acordo com sua função, como a reprodução, interação social e defesa contra predadores, além do sofisticado recurso de ecolocalização (biosonar) utilizado para navegação e identificação de presas para alimentação.

A escolha da espécie de mamífero marinho a ser mimetizada depende dos seguintes fatores:

- O tipo de sinal gerado pela espécie, sendo os mais comuns:

- os cliques (*clicks*): utilizados para ecolocalização e comunicação a curtas distâncias, emitidos em séries rápidas que podem variar de acordo com a proximidade do objeto de interesse. Caracterizam-se por serem sinais impulsivos de alta intensidade e pequena duração (40 a 70 μ s), na faixa de frequências de 10 a 150 kHz; e

- os assobios (*whistles*): usados para comunicação social a grandes distâncias. São sinais de longa duração e menor frequência (1 a 20 kHz) e intensidade. Podem apresentar complexos padrões de transmissão, incluindo modulações de frequência e amplitude, permitindo uma grande variedade de sons distintos.

- A fauna marinha local, pois sinais gerados por espécies que não pertencem à uma determinada região podem despertar a atenção do operador sonar, levando-o a desconfiar do sinal biomimetizado.

A ESTEGANOGRAFIA NA GUERRA SUBMARINA

Um dos projetos militares pioneiros nesta área foi o Projeto Combo, concebido pelo Laboratório de Eletrônica da Marinha dos Estados Unidos em 1959, como uma forma dos submarinos americanos enviarem e receberem mensagens secretas sem levantarem suspeitas dos sonares russos na época da Guerra Fria [2]. Entre os diversos mamíferos marinhos estudados, optou-se por espécies que possuíam bandas de frequência adequadas para as comunicações submarinas e que fossem de ocorrência cosmopolita, como as baleias-piloto e as orcas, a fim de evitar suspeitas por parte dos navios e submarinos ao identificar espécies não pertencente a determinada região.

Institutos de pesquisa das principais Marinhas do mundo têm apresentado resultados satisfatórios para as comunicações esteganográficas

Desde então, diversas universidades e institutos de pesquisa das principais Marinhas do mundo têm apresentado resultados satisfatórios para as comunicações esteganográficas [3,5,7].

A Figura 2 apresenta as comunicações BPD e biomimetizadas no domínio do tempo (Fig. 2 – Superior) e da frequência (Fig. 2 – inferior).

Enquanto os sinais com baixa SNR são praticamente invisíveis ao operador sonar (Fig. 2 – esquerda), os cliques e assobios aparecem de forma clara e precisa (Fig. 2 – direita). Dessa forma, as caracte-

rísticas das vocalizações das espécies são estudadas, como a faixa de frequências, a duração do pulso acústico e a presença de harmônicos, entre outras. Tais características são utilizadas pelos pesquisadores para modular a onda portadora, visando à

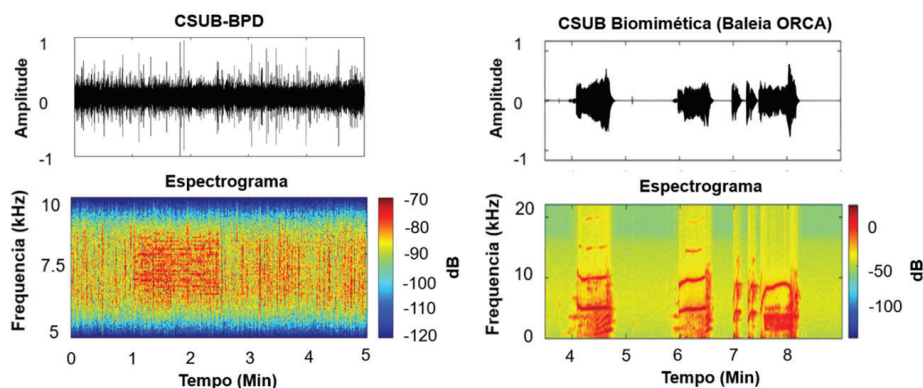


Figura 2 – À esquerda, o gráfico mostra um exemplo de sinal empregado nas CSUB-BPD, composto por dois blocos de mensagens de potências diferentes. Acima, ambos os blocos estão escondidos dentro do ruído marinho, não sendo possível sua visualização. Abaixo, no espectrograma, é possível ver apenas o bloco #1 entre 1 e 2,5 min. O bloco #2 entre 3 e 4,5 min não é visível ao operador sonar. À direita, o gráfico mostra um exemplo de CSUB-Biomimética, com características de frequência da baleia orca. Acima, é possível visualizar as vocalizações sintéticas emitidas com alta potência por uma fonte acústica, em diferentes instantes de tempo. Abaixo, no espectrograma, os assobios e seus harmônicos aparecem entre 4 e 7 min, enquanto os cliques se localizam entre 7 e 8 min.

transmissão da mensagem com diferentes símbolos, ou conjuntos de *bits*. Com a surpreendente evolução da Inteligência Artificial, alguns artigos já propõem, inclusive, adotar algoritmos de Aprendizado de Máquina e Redes Neurais Profundas para gerar sinais artificiais com praticamente 100% de correlação com os sinais reais reproduzidos pelos animais marinhos [8], a partir de um banco de dados contendo esses sinais gravados no mar por sonoboias.

Entretanto ainda existem questões técnicas para o pleno emprego da esteganografia. Na biomimética, a taxa de transmissão é limitada pelas faixas de frequência do ruído biológico emitido pelos cetáceos, para que o sinal transmitido seja o mais fidedigno possível. Já nas CSUB-BPD, sinais com baixa SNR tendem a apresentar uma taxa de erros maior e alcançam menor em comparação a sinais mais potentes, o que tem fomentado novas técnicas de processamento de sinais.

PERSPECTIVAS NA MARINHA DO BRASIL

As comunicações esteganográficas são de tecnologia crítica e de uso restrito, no âmbito da Organização do Tratado do Atlântico Norte (Otan). A venda de sistemas de comunicação furtiva é regulada, nos Estados Unidos da América, pela United States Munition List (USML), que, na Categoria XI (iv), inclui *modems* acústicos que empreguem técnicas com baixa probabilidade de interceptação/detecção [9]. Em que pese o projeto

Comunicações Submarinas ter sido descontinuado e não existirem projetos na MB que contemplem as comunicações furtivas, pesquisadores do Departamento de Acústica Submarina do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) têm desenvolvido novas técnicas para as CSUB-BPD. Em parceria com pesquisadores da Universidade de Miami (EUA), a técnica de treinamento superposto foi validada com experimentos na área de testes do IEAPM e publicada na literatura internacional [10]. Fruto de uma tese de doutorado, uma nova técnica sobre CSUB-BPD, utilizando sensores vetoriais, foi desenvolvida a partir de experimentos realizados na costa sul portuguesa e apresentada na Conferência UComms (Itália, 2022), patrocinada pelo CMRE (Centre for Maritime Research and Experimentation), da Otan [7].

O domínio dessas tecnologias de comunicação permitirá que tais sistemas possam ser embarcados em meios navais de superfície, submarinos e em veículos autônomos, incrementando o comando e controle de operações submarinas com múltiplos vetores, contribuindo, assim, com o avanço tecnológico do setor operativo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os recentes conflitos têm demonstrado que a guerra moderna exige o desenvolvimento de novas tecnologias para melhorar a comunicação furtiva entre diferentes vetores submarinos e de superfície no teatro de operações. Considerando que a capacidade de ocultação é característica

**Pesquisadores do
IEAPM têm desenvolvido
novas técnicas para as
comunicações com baixa
probabilidade de detecção**

intrínseca dos submarinos e AUV, apresentamos o conceito de esteganografia e seus principais métodos (comunicações BPD e biomiméticas), sua evolução e algumas perspectivas na Marinha do Brasil. Este artigo espera, portanto, con-

tribuir para o fomento de novos projetos relacionados ao tema, o que permitiria aumentar a furtividade dos novos S-BR e do futuro SN-BR enquanto se comunicam, reduzindo a probabilidade de detecção e uma possível neutralização pelo inimigo.

 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:
<CIÊNCIA E TECNOLOGIA>; Acústica; Acústica Submarina;

REFERÊNCIAS

- [1] SCHULZ, F.; WIEGAND, T. “Underwater Acoustic Communications for Submarines – A Sonar Company’s Perspective”. Fourth Underwater Communications and Networking Conference (UComms), Lerici, Italy, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/UComms.2018.8493179.
- [2] NAVAL OCEAN SYSTEMS CENTER (NOSC). “Technical Report 422: Project combo: review and recommendations, 1980”. Disponível em: https://www.governmentattic.org/22docs/NOSCrptProjCOMBO_1980.pdf.
- [3] JIAJIA, J.; XIANQUAN, W.; FAJIE, D.; XIAO, F.; CHUNYUE, L.; ZHONGBO, S. “A Basic Bio-Inspired Camouflage Communication Frame Design and Applications for Secure Underwater Communication Among Military Underwater Platforms”, in IEEE Access, vol. 8, pp. 24.927-24.940, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970746.
- [4] SONGZUO, L.; TIANLONG, M.; QIAO, G.; LU, M.; YANLING, Y. “Biologically inspired covert underwater acoustic communication by mimicking dolphin whistles”, *Applied Acoustics*, v. 120, pp. 120-128, 2017.
- [5] DIAMANT, R.; LAMPE, L., “Low Probability of Detection for Underwater Acoustic Communication: A Review”, in IEEE Access, vol. 6, pp. 19.099-19.112, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2818110.
- [6] DOL, H. S.; QUESSON, B. A. J.; BENDERS, F. P. A. “Covert underwater communications with marine mammal sounds”, in UDT Europe, 2008.
- [7] LOUZA, F. B.; JESUS S. M. “Low probability of detection underwater communications using a vector sensor”, in Sixth Underwater Communications and Networking Conference (UComms), Lerici, Italy, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/Ucomms56954.2022.9905685.
- [8] KIM Y.; SEOL S.; LEE H.; PARK G.; CHUNG J. “WhistleGAN for Biomimetic Underwater Acoustic Covert Communication”, *Electronics*, v. 13, 2024.
- [9] THE UNITED STATES MUNITION LIST. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/current/title-22/chapter-I/subchapter-M/part-121>.
- [10] LOUZA, F. B.; DEFERRARI, H. A. “Superimposed training low probability of detection underwater communications”. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 148, nº 3, pp. EL273–EL278, Sep. 2020.