

MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
GUERRA ELETRÔNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA MEDIDA DE ATAQUE ELETRÔNICO
SOBRE UM RADAR *PHASED ARRAY*



PRIMEIRO-TENENTE THALES BITENCOURT MAIA

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE THALES BITENCOURT MAIA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA MEDIDA DE ATAQUE ELETRÔNICO
SOBRE UM RADAR *PHASED ARRAY*

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica.

Orientadores:

CC Thales Curioni Raia

D.Sc. Guilherme Ribeiro Colen

CIAA
Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE THALES BITENCOURT MAIA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UMA MEDIDA DE ATAQUE ELETRÔNICO
SOBRE UM RADAR *PHASED ARRAY*

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica.

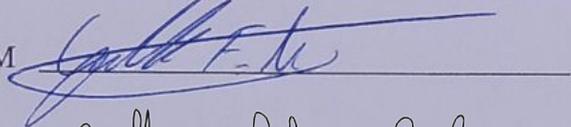
Aprovada em 22/11/23

Banca Examinadora:

Thales Curioni Raia, CC, M.Sc – CGAEM



Guilherme Murrel Liali, CC, M.Sc – CGAEM



Guilherme Ribeiro Colen, D.Sc – CIAA



AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão às pessoas que desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me guiar e me dar forças ao longo dessa jornada. Aos meus orientadores, sou grato pelas orientações valiosas, conhecimento compartilhado e todo suporte.

Minha família merece um agradecimento especial, pois é a fonte de toda a minha inspiração. Agradeço aos meus pais, minha irmã e demais familiares por estarem sempre ao meu lado, independentemente das circunstâncias.

Não posso deixar de mencionar meus amigos, que compartilharam esta caminhada comigo desde o início, vocês tornaram este caminho mais leve e fácil. Agradeço por estarem ao meu lado compartilhando momentos bons e ruins, nossa camaradagem é eterna.

À minha amada esposa, Ana Paula, quero expressar meu amor e profunda gratidão. Mesmo à distância, você esteve presente, oferecendo amor, apoio e força para enfrentarmos juntos os desafios desse ano. Obrigado por ser meu porto seguro e por estar sempre ao meu lado.

APLICAÇÕES DE MEDIDAS DE ATAQUES ELETRÔNICOS EM SISTEMAS DE ESTIMAÇÃO DE POSIÇÃO

RESUMO

Devido ao constante crescimento da tecnologia ao redor do mundo, a Guerra Eletrônica (GE) tem apresentado cada vez mais um horizonte bastante promissor, com diversas possibilidades. No âmbito de suas subdivisões, surgem as Medidas de Ataque Eletrônico (MAE), que desempenham um papel fundamental ao negar o emprego do espectro eletromagnético pelo inimigo. A capacidade de detectar, rastrear e identificar alvos é vital para a superioridade operacional em ambientes estratégicos e táticos. Nesse contexto, os radares desempenham um papel central, sendo essenciais para as operações militares, vigilância do espaço aéreo e marítimo. O objetivo dessa pesquisa, está na otimização da eficácia das MAE para lidar com os sistemas radares *phased array* em constante evolução, com o intuito de verificar estratégias mais adequadas em determinado cenário tático. O estudo envolveu a utilização de literatura acadêmica, incluindo livros e publicações, seguido da execução de simulações utilizando *software* MatLab, explorando uma correlação entre os conceitos de GE, medidas de ataque eletrônico e métodos clássicos de processamento de sinais para estimação da direção de chegada (DoA) de sinais de interesse. As simulações permitiram uma avaliação do desempenho de um radar com arquitetura 3D quando combinados com interferências das MAE e ruídos em cenários diversos. O resultado envolveu técnicas estatísticas e análises numéricas no *Matlab*, proporcionando uma base sólida para as conclusões apresentadas, mostrando que, as MAE podem ser fundamentais para detectar e mitigar ameaças, sendo capazes de comprometer a precisão e a segurança desses sistemas. A garantia da confiabilidade e da segurança dos sistemas radares é vital para o funcionamento eficiente de equipamento. Desta forma, o desenvolvimento e a implementação contínuos de MAE são indispensáveis para proteger e fortalecer esses sistemas em um mundo cada vez mais conectado e dependente do espectro eletromagnético.

Palavras-chave: Guerra Eletrônica (GE); Medidas de Ataque Eletrônico (MAE); Direção de Chegada (DoA); Radares *phased array*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração Radar	17
Figura 2 - Temporização de um Sistema Radar Pulsado.....	18
Figura 3 - Sistema Radar com ambiguidade em distância.....	19
Figura 4 - Diagrama de blocos de um radar de compressão de pulso.....	20
Figura 5 - Forma de onda do <i>Chirp</i>	22
Figura 6 - Código de fase binária com 7 subfaixas.....	22
Figura 7 - Função de autocorrelação de um Código <i>Barker</i> de comprimento 13.....	23
Figura 8 - Códigos <i>Barker</i>	24
Figura 9 - Combinação de Código <i>Barker</i> B54.....	24
Figura 10 - Antena Multifeixe.....	28
Figura 11 - <i>Active Electronically Scanned Array</i> (AESA).....	29
Figura 12 - Estrutura das Medidas de Guerra Eletrônica.....	30
Figura 13 - Medidas de Ataque Eletrônico.....	32
Figura 14 - Tipos de Despistamento.....	35
Figura 15 - Bloqueio de Ponto.....	38
Figura 16 - Bloqueio de Barragem.....	39
Figura 17 - Bloqueio de Varredura.....	40
Figura 18 - Cenários base considerados para a modelagem: a) O bloqueador propulsado é o interferidor; e b) O transmissor ao nível do mar é o interferidor.....	42
Figura 19 - Diferenças angulares em cada algoritmo de estimação da DoA dos radares utilizando: a) modulação intrapulso <i>Barker Code</i> 13; e b) modulação intrapulso <i>Chirp</i>	44
Figura 20 - Discriminação dos alvos em radar com <i>Barker Code</i> 13.....	45
Figura 21 - Discriminação dos alvos em radar com <i>Chirp</i>	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Apresentação do Problema	10
1.2 Justificativa e Relevância	10
1.3 Objetivos	10
1.2.1 Objetivo geral	10
1.2.1 Objetivos específicos.....	10
1.4 Etapas do trabalho	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
3 METODOLOGIA	14
3.1 Classificação da Pesquisa	14
3.1.1 Quanto aos fins	14
3.1.2 Quanto aos meios	14
3.2 Limitações do método	14
3.3 Universo e amostragem	15
3.4 Coleta e tratamento de dados	15
4 PRINCÍPIOS DE RADARES	16
4.1 Radar Pulsado	17
4.2 Frequência de repetição de pulsos e ambiguidade em distância	18
4.3 Compressão de pulso	19
4.4 Formas de onda	21
4.5 Processamento de sinais para estimação da direção de chegada	24
5 RADAR 3D	27
6 MEDIDAS DE GUERRA ELETRÔNICA (MGE)	30
6.1 Medidas de Proteção Eletrônica	30
6.2 Medidas de Ataque Eletrônico	31
6.2.1 Medidas de Ataque Eletrônico Destrutiva.....	32
6.2.2 Medidas de Ataque Eletrônico Não Destrutiva.....	34
6.2.2.1 Despistamento Eletromagnético	34
6.2.2.2 Supressão Eletromagnética	37
7 SIMULAÇÕES E RESULTADOS	41

7.1 Cenário 1	43
7.2 Cenário 2	44
8 CONCLUSÃO	47
8.1 Considerações Finais	47
8.2 Sugestões para Futuros Trabalhos	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Devido ao constante crescimento da tecnologia ao redor do mundo, a Guerra Eletrônica (GE) tem apresentado cada vez mais um horizonte bastante promissor, com diversas possibilidades. No âmbito de suas subdivisões, surgem as Medidas de Ataque Eletrônico (MAE), que desempenham um papel fundamental ao negar o emprego do espectro eletromagnético pelo inimigo. Em contrapartida, as contramedidas estão evoluindo com sistemas cada vez mais resilientes contra esses ataques (NERI, 2018).

A capacidade de detectar, rastrear e identificar alvos é vital para a superioridade operacional em ambientes estratégicos e táticos (NERI, 2018). Nesse contexto, surgem os radares *phased array* que desempenham um papel central, sendo essenciais para as operações militares, vigilância do espaço aéreo e marítimo.

Os radares *phased array* representam um avanço notável na tecnologia de radares militares, destacando-se por sua capacidade de superar algumas estratégias adotadas pelos adversários (FENN et al., 2000). Em um cenário marcado por ameaças complexas em conflitos navais, que variam de minas a mísseis de alta velocidade e letalidade, torna-se essencial a seleção criteriosa de recursos para enfrentá-las. Matrizes faseadas emergem como uma solução crucial para a defesa contra essas ameaças, varredura do espaço para detecção de sinais de interesse em reentrada e o rastreamento simultâneo de diversos alvos em operações de combate.

As antenas destes equipamentos predominam como arquitetura principal em sistemas de radar modernos. Elas consistem em uma coleção de antenas individuais organizadas de maneira geométrica e sincronizadas em fase para criar os padrões de radiação desejados. No entanto, é importante notar que, apesar de sua eficácia notável, os avanços contínuos nas capacidades destes radares também apresentam desafios significativos, pois cada vez mais as MAE estão se desenvolvendo para obter o controle do espectro eletromagnético, fazendo com que esses radares sejam neutralizados ou manipulados (ADAMY, 2015).

Assim, devido à importância vital que as MAE alcançaram para se obter êxito em conflitos contemporâneos e com o propósito de avaliar a eficiência dos radares quando combinados com interferências devido a estas medidas e também os ruídos em cenários diversos, serão realizadas, neste trabalho, análises por meio de simulações, que visam saber qual a distância angular mínima que cada algoritmo de estimação de direção de chegada (DoA) consegue discriminar os alvos na presença de um sinal interferidor. Será utilizada uma

arquitetura de um radar comparável, em estimação da elevação de um alvo, ao Artisan 3D, por se tratar do sistema de detecção mais avançado já integrado à Marinha do Brasil e selecionado para fazer parte dos navios da Classe Tamandaré.

1.1 Apresentação do Problema

No cenário contemporâneo, a crescente sofisticação dos sistemas radares *phased array* representa um desafio significativo para diversas áreas de estudo. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de uma compreensão aprofundada e eficaz das MAE destrutiva e não destrutiva para enfrentar tais sistemas. A delimitação desse problema emerge em aprimorar a eficiência na utilização de MAE diante da constante evolução dos radares.

1.2 Justificativa e Relevância

A relevância do tema torna-se bem compreensível levando em consideração o contexto da guerra atual, em que o espectro eletromagnético está sendo cada vez mais utilizado nos ataques. Diante de uma força armada fundamentada em medidas de apoio à guerra eletrônica, este estudo assume a justificativa de impulsionar a pesquisa em direção a contratos de oportunidade e ao desenvolvimento de sistemas que enfatizem as Medidas de Ataque Eletrônico como elemento central.

1.3 Objetivos

Nesta seção serão apresentados os objetivos do trabalho, sendo que na primeira seção abordará os objetivos gerais do estudo, e posteriormente se detalharão os objetivos específicos da pesquisa.

1.3.1 Objetivo geral

Realizar uma revisão bibliográfica abrangente e integrar conceitos para o estudo de supressões eletrônicas, despistadores e os radares *phased array*. Produzir análises através de simulações dos fundamentos abordados para otimizar a eficácia das MAE para lidar com os radares *phased array* em constante evolução, com o intuito de aprimorar estratégias que permitam enfrentar de maneira eficiente os desafios apresentados pelos sistemas modernos de detecção.

1.3.2 Objetivos específicos

Realizar uma análise comparativa da eficácia de uma MAE empregando um interferidor em amplitude (AM) diante de dois tipos distintos de radares, os quais fazem uso de codificações intrapulsos diferentes, Código Barker 13 e *Chirp*.

1.4 Etapas do trabalho

Esta seção destaca o horizonte promissor da GE com foco nas MAE para negar o uso do espectro eletromagnético pelo inimigo.

A segunda seção aborda a evolução da GE até os radares sofisticados da era moderna. Destaca-se a importância crescente da Capacidade de Guerra Eletrônica (CGE) diante dos desafios contemporâneos.

Na terceira seção, são apresentados os métodos utilizados no trabalho, abrangendo a explanação sobre os tipos e classificações de pesquisa. O estudo incorporou análise de literatura acadêmica, como livros e publicações, além da realização de simulações por meio de software especializado.

Na quarta seção são detalhados os princípios e a operação dos radares pulsados, desde a emissão de energia até a tomada de decisão no receptor.

Na quinta seção, aborda-se a importância dos radares 3D. Explora-se a evolução desses radares, além de discutir Medidas de Proteção Eletrônica (MPE).

A sexta seção discute as MAE como elementos estratégicos cruciais em cenário de guerra moderna, destacando seu papel decisivo no controle do espectro eletromagnético.

Na sétima seção foi realizada uma avaliação do desempenho de um sistema radar 3D, utilizando o *software* MatLab.

Na oitava seção foi realizada uma conclusão sobre o tema proposto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Conforme estabelecido na Doutrina Básica da Marinha (DBM) no Manual de GE, o conceito de Guerra Eletrônica é definido da seguinte forma:

Conjunto de ações que visam a explorar as emissões do inimigo, em toda a faixa do espectro eletromagnético, com a finalidade de conhecer a sua ordem de batalha, intenções e capacidades e, também, utilizar medidas adequadas para negar, reduzir ou prevenir o uso efetivo dos seus sistemas, enquanto se protege e utiliza, com eficácia, os seus próprios sistemas (BRASIL, 2023, p. 31).

Principalmente após o século XX, a GE ganhou força e vem se desenvolvendo, tendo como ponto de partida a Batalha Naval de Tsushima, conflito entre Rússia e Japão ocorrido em 1905. Este evento marcou, pela primeira vez na história, a interceptação de comunicações por telegrafia sem fio (BRASIL, 2009). Com o avanço das tecnologias, os ambientes de guerra também evoluíram significativamente em comparação com décadas atrás.

Durante a Segunda Guerra Mundial, especialmente sob a perspectiva americana, os radares de alerta antecipado colocados em solo desempenharam um papel fundamental nos conflitos, detectando aeronaves inimigas a grandes distâncias. Esses radares terrestres desempenharam um papel crucial ao aumentar consideravelmente as chances de sucesso das defesas aéreas, uma vez que mantinham comunicação com as baterias antiaéreas, possibilitando a interceptação das aeronaves inimigas. Diante desse cenário desafiador, tanto os Aliados quanto os países do Eixo responderam de maneira ágil, desenvolvendo rapidamente uma série de contramedidas com o intuito de neutralizar ou enfraquecer a eficácia desses radares. Além disso, foram implementados bloqueios nos radares e ajustes nas estratégias aéreas para reduzir o tempo de exposição das aeronaves à cobertura dos radares inimigos (USAF, 2016).

Nesse cenário de crescente progresso tecnológico, a CGE, que é definida como o “somatório de meios e recursos de toda ordem que permita ao Poder Naval empreender eficazmente ações de GE em proveito de suas operações” (BRASIL, 2023, p. 32-33), desempenha um papel cada vez mais crucial. Esta se subdivide em atividades e medidas de GE. Medidas de GE se subdividem em três categorias principais: Medidas de Apoio a Guerra Eletrônica (MAGE), MPE e MAE. No contexto da última, esta se desdobra em duas subcategorias: MAE não destrutivas e MAE destrutivas (BRASIL, 2017). Este trabalho irá abordar técnicas destas categorias, tais como bloqueios, que podem ser de ponto, barragem e varredura, e despistamentos, que englobam medidas “*chaff*” e despistadores do tipo “*decoy*”.

Tecnologias cada vez mais inovadoras têm possibilitado a incorporação de radares ainda mais sofisticados, com características como agilidade em frequência, que oferecem uma combinação única de detecção, precisão e adaptabilidade. Por outro lado, esse avanço tecnológico também resultou em um surgimento significativo de ataques capazes de interferir e degradar o funcionamento destes equipamentos. É nesse contexto de desenvolvimento na área de GE que se enfatiza a importância dessa disputa pelo domínio do espectro eletromagnético a fim de obter vantagem em cenário de conflito.

3 METODOLOGIA

Nesta seção, serão detalhados os métodos empregados no decorrer deste trabalho, incluindo a explanação dos diferentes tipos de pesquisa e suas classificações. O estudo envolveu a utilização de literatura acadêmica, incluindo livros e publicações, seguido da execução de simulações utilizando o *software* MatLab.

3.1 Classificação da Pesquisa

Conforme Vergara (2016), os tipos de pesquisa podem ser categorizados quanto aos fins e quanto aos meios. Estes podendo ser bibliográficos, documentais, experimentais e pesquisa de campo e de laboratório, e aqueles subdividem-se em descritivas, explicativas, pesquisas exploratórias, explicativas, metodológicas, aplicadas e intervencionistas.

3.1.1 Quanto aos fins

Esta pesquisa pode ser classificada como descritiva e exploratória, visto que explora uma correlação entre os conceitos de GE e MAE. Foram realizadas simulações no MatLab e posteriormente analisados os resultados obtidos.

3.1.2 Quanto aos meios

Pode-se classificar o trabalho como uma pesquisa exploratória. Foram utilizadas uma ampla gama de fontes, como livros, artigos científicos, dissertações, monografias e teses disponíveis em sítios da internet, todas relacionadas ao tema proposto.

3.2 Limitações do Método

As simulações foram à única forma de experimentação realizada, não envolvendo testes práticos. O escopo da pesquisa se concentrou na análise de radares 3D e nas medidas de ataque eletrônico discutidas nas fontes referenciadas neste trabalho.

3.3 Universo e amostragem

A interpretação dos dados foi exclusivamente conduzida por meio do software Matlab.

3.4 Coleta e tratamento de dados

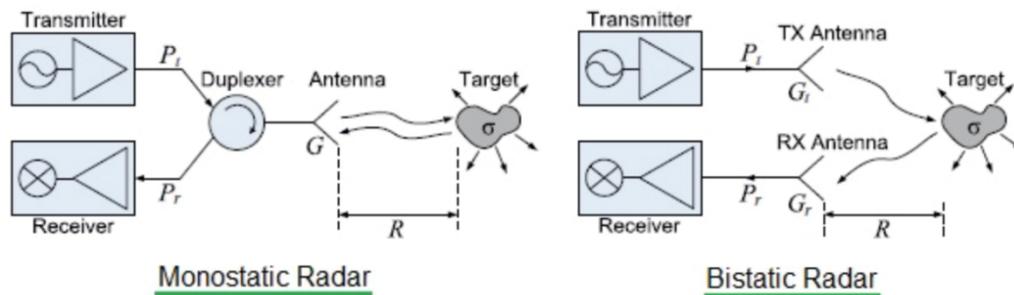
A coleta de dados envolveu uma análise qualitativa, incorporando fontes acadêmicas, livros relevantes, trabalhos de conclusão de curso e artigos científicos sobre o tema de GE, sistema de radares e MAE. Foram realizadas também simulações computacionais realizadas por meio do *software* MatLab. As simulações permitiram uma análise prática do desempenho das MAEs em cenários diversos. O tratamento de dados envolveu técnicas estatísticas e análises numéricas no MatLab.

4 PRINCÍPIOS DE RADARES

Um radar, que significa “Radio Detection And Ranging” (Detecção e Medição por Rádio), é uma tecnologia que utiliza ondas eletromagnéticas para medir a distância, direção e, em alguns casos, a velocidade do alvo em relação ao sistema de radar. Portanto, no cenário da GE, o radar é muito utilizado para estimar a posição de alvos de interesse em movimento, como aeronaves, navios ou até mesmo fenômenos meteorológicos. A operação do radar pode ser delineada da seguinte forma: o sistema emite energia eletromagnética por meio de uma antena, propagando-a pelo espaço livre; uma porção dessa energia lançada encontra-se com um objeto refletor, usualmente denominado de alvo, situado a uma distância radial, conhecida como *Range*, em relação ao radar; o objeto refletor, ao interceptar a energia, reirradia-a em várias direções; parte dessa energia reirradiada, conhecida como eco, retorna ao radar e é capturada por sua antena receptora; subsequentemente, o sinal é amplificado e processado devidamente; ao final desse processo, uma decisão é tomada no receptor quanto à presença ou ausência de um sinal de eco proveniente de um alvo. Por meio dessa operação, não apenas é determinada a presença de um alvo, mas também informações sobre sua localização e, potencialmente, outros detalhes são adquiridos. Este ciclo de emissão, interação, recepção e processamento forma a essência do funcionamento do radar, proporcionando a capacidade de detecção e caracterização de objetos no ambiente circundante (SKOLNIK, 2008).

A estrutura fundamental de um sistema radar compreende a formulação da forma de onda, a transmissão por meio da cadeia de radiofrequência (RF), o emprego de uma ou mais antenas (dependendo da configuração específica), a cadeia de recepção de RF e o dispositivo detector de alvos. O esquema de blocos, apresentado na Figura 1, esboça a organização simplificada de um sistema radar, tanto na configuração monostática quanto na biestática. A distinção central entre essas configurações reside na utilização de uma única antena para ambas as funções de transmissão e recepção no caso do radar monostático, facilitado pelo Duplexer que interconecta o transmissor e o receptor à cadeia de RF. Já o radar biestático envolve locais distintos para transmissão e recepção, fazendo com que a transmissão e recepção possam ser simultâneas (RICHTER; PEREIRA, 2020).

Figura 1 - Configuração Radar.



Fonte: Automotive Radar System Basics | Automotive Radar tutorial. RF Wireless World, 2012. Disponível em: <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/Automotive-radar-basics.html>. Acesso em 06 de set. 2023.

Com base na Figura 1 e nos princípios operacionais mencionados, pode-se notar que a distância radial do alvo, R , é obtida ao medir o tempo entre a transmissão do sinal e a recepção da sua reflexão. Existem também outros parâmetros do alvo que são extraídos do sinal recebido, como a posição (que engloba azimute e elevação), velocidade radial, natureza e direção de movimento.

No decorrer do tempo e devido aos avanços tecnológicos, o sistema evoluiu em diversas frentes, destacando-se a utilização do efeito doppler (BARLOW, 1949) para medição de velocidade; a aplicação da técnica de compressão de pulso (SKOLNIK, 2008), que utiliza formas de onda extensas e de alta energia sem comprometer a resolução em distância; o avanço das antenas do tipo *phased array* (FENN et al., 2000), possibilitando cada vez mais a utilização do sistema com mais recursos e de maneira mais confiável.

4.1 Radar Pulsado

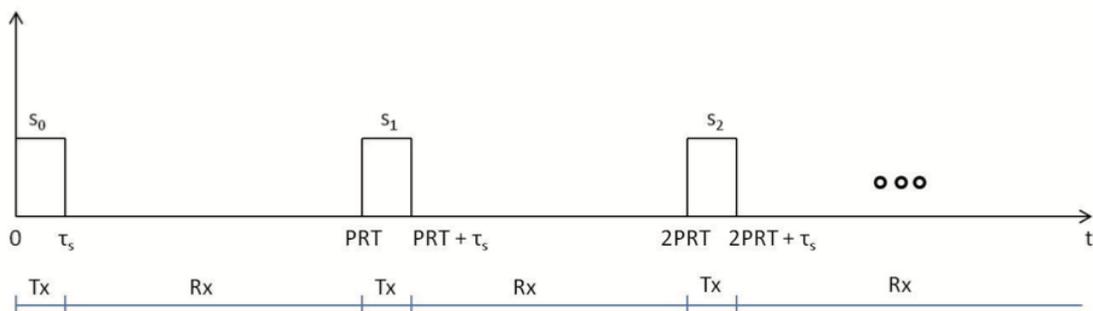
A categorização dos sistemas de radar está diretamente ligada aos tipos de sinais de transmissão que utilizam, sendo essencialmente divididos em dois grupos principais: aqueles que utilizam ondas contínuas (CW, do inglês *Continuous Wave*) e os que se utilizam de ondas pulsadas. Os radares CW podem operar com sinais modulados ou não, no entanto, por serem bastante simples, enfrentam limitações significativas em suas funcionalidades. Uma dessas restrições é a incapacidade de determinar a distância do alvo, fornecendo apenas informações relacionadas à sua velocidade (SKOLNIK, 1981). Este tipo de radar não será objeto de estudo deste trabalho.

Por outro lado, os radares que adotam formas de onda pulsadas, apesar de apresentarem uma maior complexidade, conseguem extrair uma quantidade mais significativa

de informações úteis a partir do sinal refletido, quando comparados aos radares CW (SKOLNIK, 1981). As características associadas às formas de onda pulsadas são de grande relevância neste trabalho, pois constituem a base para o desenvolvimento do presente estudo.

O funcionamento básico do radar pulsado, tipo de sistema que utiliza pulsos curtos e intermitentes de ondas eletromagnéticas, envolve a transmissão de pulsos $s_i(t)$ de alta potência e curta duração, seguidos por períodos de escuta (Rx) para receber os ecos refletidos, como mostrado na Figura 2. Esses pulsos são caracterizados por sua largura de pulso, frequência de repetição de pulso (PRF, do inglês *Pulse Repetition Frequency*) e período de repetição de pulso (PRT, do inglês *Pulse Repetition Time*), que define o intervalo entre pulsos consecutivos. A largura de pulso determina a resolução em distância do radar, enquanto a PRF está relacionada à capacidade do radar de lidar com alvos próximos e a PRT define o intervalo de tempo entre pulsos sucessivos (PRALON, 2014).

Figura 2 - Temporização de um Sistema Radar Pulsado.



Fonte: Pralon, 2014.

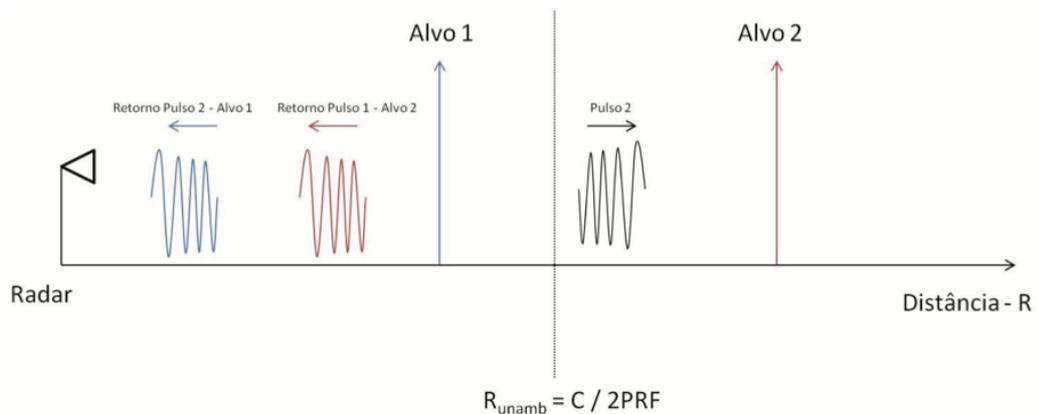
4.2 Frequência de repetição de pulsos e ambiguidade em distância

Após a transmissão de um pulso, é necessário aguardar um tempo, PRT, suficientemente grande antes que outro pulso seja enviado, assegurando que os sinais refletidos por todos os objetos de interesse no cenário de observação sejam devidamente recebidos. Dessa forma, o PRT e, por conseguinte, a taxa de transmissão dos pulsos são determinados pela maior distância que se deseja detectar. Quando a PRF é muito elevada, isto é, o intervalo de tempo entre a transmissão de dois pulsos consecutivos é reduzido, o sinal refletido por determinados alvos pode ser recebido após a transmissão do pulso seguinte, criando ambiguidades em relação à distância. Nesse cenário, se os pulsos de transmissão forem idênticos, esses retornos podem ser interpretados como provenientes de alvos próximos, se considerados em relação ao segundo pulso de transmissão e não ao primeiro,

como deveriam (PRALON, 2014).

O fenômeno mencionado é representado na Figura 3, em que o retorno proveniente do alvo 2, em relação ao primeiro pulso de transmissão, é registrado após a emissão do segundo pulso. A fórmula descrita na imagem se refere a distância máxima sem ambiguidade, R_{unamb} .

Figura 3 - Sistema Radar com ambiguidade em distância.



Fonte: Pralon, 2014.

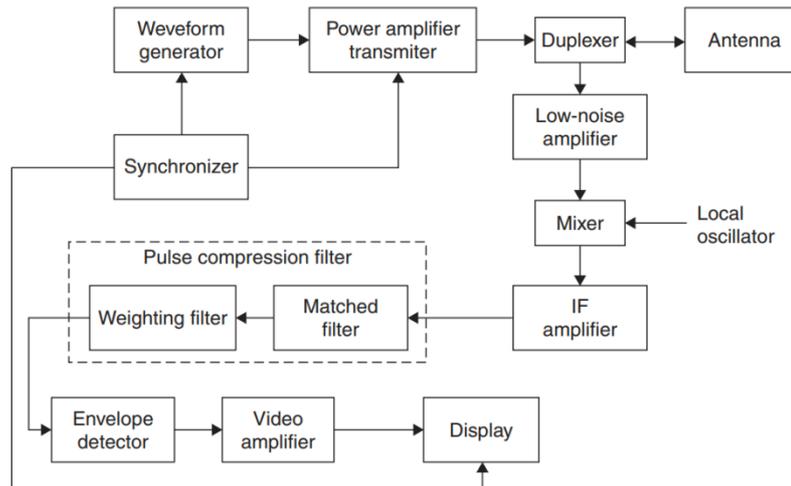
4.3 Compressão de pulso

Um radar de compressão de pulso transmite um pulso longo com largura de pulso T e potência de pico P_t , que é codificado usando modulação de frequência ou fase para alcançar uma largura de banda B que é grande em comparação com a de um pulso não codificado com a mesma duração. A largura de pulso de transmissão é escolhida para alcançar a energia de transmissão de pulso único, dada por $E_t = P_t T$, necessária para detecção ou rastreamento de alvos. O eco recebido é processado usando um filtro de compressão de pulso para produzir uma resposta de pulso comprimido estreito com uma largura de lóbulo principal de aproximadamente $1/B$ que não depende da duração do pulso transmitido (SKOLNIK, 2008).

A Figura 4 mostra um diagrama de bloco de um radar básico de compressão de pulso. O pulso codificado é gerado em um nível de baixa potência no gerador de formas de onda e amplificado até a potência de transmissão de pico necessária usando um transmissor de amplificador de potência. O sinal recebido é misturado a uma frequência intermediária (IF) e amplificado pelo amplificador IF. O sinal é então processado usando um filtro de compressão de pulso que consiste em um filtro casado para alcançar a máxima relação sinal-ruído (SNR).

Como discutido abaixo, o filtro casado é seguido por um filtro de ponderação se necessário para a redução dos lóbulos laterais temporais. A saída do filtro de compressão de pulso é aplicada a um detector de envelope, amplificada pelo amplificador de vídeo e exibida a um operador (SKOLNIK, 2008).

Figura 4 - Diagrama de blocos de um radar de compressão de pulso.



Fonte: Skolnik, 2008.

A razão entre a largura de pulso de transmissão e a largura de lóbulo principal do pulso comprimido é definida como a taxa de compressão de pulso. A taxa de compressão de pulso é aproximadamente $T/(1/B)$ ou TB , definido como o produto tempo-largura de banda da forma de onda. Tipicamente, a taxa de compressão de pulso e o produto tempo-largura de banda são grandes em comparação com a unidade (SKOLNIK, 2008).

O uso da compressão de pulso oferece várias vantagens de desempenho. A capacidade aumentada de detecção em longo alcance de um sistema radar de pulso longo é alcançada com a compressão de pulso, mantendo a capacidade de resolução em distância de um radar, que é a capacidade de discernir e diferenciar dois alvos que estão próximos entre si em termos de distância, que usa um pulso não codificado estreito. A energia de transmissão necessária pode ser estabelecida aumentando a largura de pulso da forma de onda sem exceder as restrições na potência de pico do transmissor. A potência média do radar pode ser aumentada sem aumentar a PRF e, portanto, diminuindo a faixa inambígua do radar. Além disso, o radar é menos vulnerável a sinais interferentes que diferem do sinal transmitido codificado (SKOLNIK, 2008).

O lóbulo principal do pulso comprimido na saída do filtro casado tem lóbulos laterais no tempo, ou de alcance, que ocorrem dentro de intervalos de tempo de duração T ,

antes e depois do pico do pulso comprimido. Os lóbulos laterais no tempo podem ocultar alvos, que de outra forma seriam resolvidos usando um pulso não codificado estreito. Em alguns casos, como formas de onda codificadas em fase, o processamento do filtro casado sozinho alcança níveis aceitáveis de lóbulos laterais no tempo. No entanto, para o caso de uma forma de onda de modulação linear em frequência, o filtro casado é geralmente seguido por um filtro de ponderação para fornecer uma redução nos níveis de lóbulo lateral temporal. Nesse caso, o filtro de ponderação resulta em uma perda na relação sinal-ruído em comparação com o processamento do filtro casado sozinho (SKOLNIK, 2008).

4.4 Formas de onda

Nos sistemas radar pulsados, é comum utilizar formas de onda caracterizadas por portadoras moduladas em fase ou frequência. Entre essas opções, os sinais de transmissão modulados linearmente em frequência, conhecidos como *chirps*, são amplamente preferidos devido à sua menor sensibilidade a distorções. Essa escolha destaca-se pela popularidade, facilidade de geração e imunidade a desvios Doppler, fatores cruciais para preservar a resolução em distância e manter os níveis adequados do lóbulo secundário no sinal de saída (SKOLNIK, 1981). A aplicação de formas de onda de transmissão moduladas linearmente em frequência em conjunto com a técnica de compressão de pulso na recepção, teve sua proposta inicial em 1945 (DICKE, 1953).

A forma de onda do *chirp* possui uma modulação de amplitude retangular com largura de pulso T e uma modulação linear de frequência com uma largura de banda varrida B aplicada ao longo do tempo. Durante a transmissão, a frequência da onda não é constante, em vez disso, ela aumenta ou diminui de forma linear ao longo do tempo, conforme mostrado na Figura 5. Essa variação linear cria uma ampla largura de banda em comparação com pulsos de frequência constante, o que é benéfico para a resolução em distância em sistemas radar (SKOLNIK, 2008).

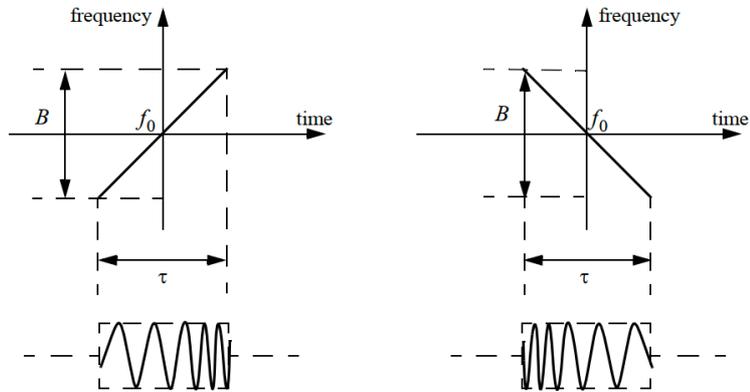
Nesses sistemas, o sinal *chirp*, $S(t)$, é caracterizado por uma função linear em relação ao tempo, conforme definido por

$$S(t) = A_s \cos \left[2\pi \left(f_0 t + \frac{K_p}{2} t^2 \right) \right], \quad (1)$$

em que A_s é a amplitude do sinal, f_0 a frequência central do *chirp* e K_p a constante de modulação, indica o quanto a frequência do *chirp* está variando com o tempo. Percebe-se que o último termo desta equação é o responsável pela variação quadrática na fase ao longo do

tempo, isso significa que a taxa de mudança de frequência está aumentando linearmente com o tempo.

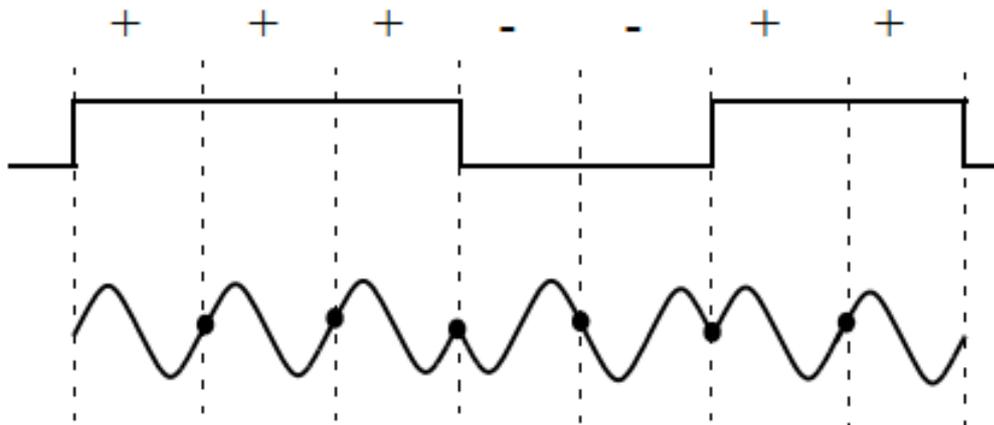
Figura 5 - Forma de onda do *Chirp*.



Fonte: Mahafza; Elsherbeni, 2004.

Na técnica de modulação de fase, a fase do sinal é alterada em vários pontos durante a transmissão. É comum realizar esse processo dividindo o pulso longo em uma série de subfaixas idênticas, a cada uma das quais é atribuído um deslocamento de fase de 0° grau ou 180° graus. Tradicionalmente, um deslocamento de fase de 0° grau é representado por um sinal de "1" ou "+", enquanto uma mudança de fase de 180° graus é representada por "0" ou "-", como pode-se observar na Figura 6. Nesse contexto, tem-se um código binário, pois existem apenas duas mudanças de fase possíveis (0° e 180° graus). Embora existam esquemas mais complexos chamados códigos polifásicos, esse trabalho será limitado aos códigos binários.

Figura 6 - Código de fase binária com 7 subfaixas.

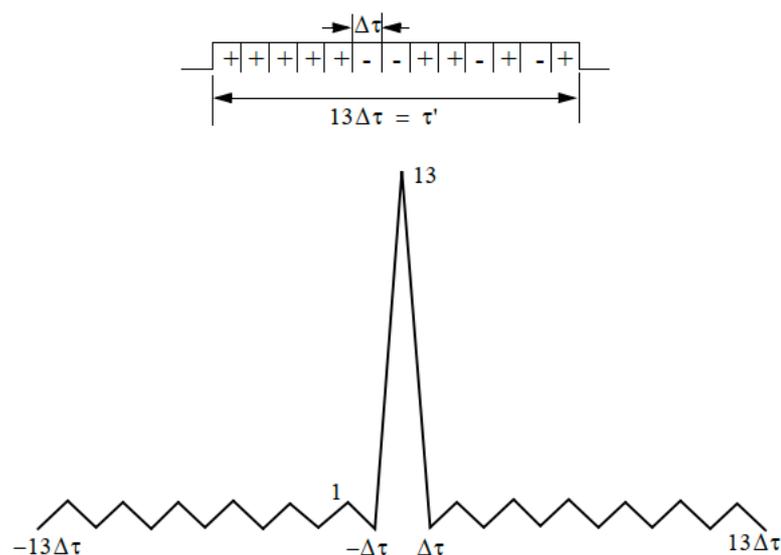


Fonte: Mahafza; Elsherbeni, 2004.

A decisão sobre o número de subfaixas e a fase atribuída a cada uma é crucial para a precisão na determinação do atraso do pulso recebido, esta é alcançada por meio do processo de correlação. Nele é medido a semelhança entre o pulso recebido e o pulso transmitido, deslizando o primeiro em relação ao segundo e avaliando a correspondência em diferentes deslocamentos de tempo. Idealmente, busca-se um pico claro e inequívoco na correlação que corresponda à faixa ou distância do alvo. Contudo, este processo também gera picos menores, chamados de lóbulos laterais, e minimizar esses lóbulos é crucial para identificar corretamente o pico verdadeiro. Os códigos de Barker, uma família de códigos nomeada em homenagem a RH Barker, que publicou pela primeira vez um artigo sobre eles em 1953, são especialmente úteis nesse contexto. Eles oferecem alta relação entre o pico e o lóbulo lateral, possuindo a energia mínima teórica nos lóbulos laterais e distribuindo uniformemente essa energia (MAHAFZA; ELSHERBENI, 2004).

De forma geral, a função de autocorrelação (que é uma aproximação da saída do filtro casado) para um código de Barker B_N , em que N é o comprimento do código, será $2N\Delta\tau$ larga. O lóbulo principal tem uma largura de $2\Delta\tau$, o valor de pico é igual a N . Existem $(N-1)/2$ lóbulos laterais de cada lado do lóbulo principal. Isso é ilustrado na Figura 7 para um código de Barker B_{13} . O lóbulo principal é igual a 13, enquanto todos os lóbulos laterais são unitários (MAHAFZA; ELSHERBENI, 2004).

Figura 7 - Função de autocorrelação de um Código *Barker* de comprimento 13.



Fonte: Mahafza; Elsherbeni, 2004.

Os códigos de Barker têm diferentes comprimentos, como 2, 3, 4, 5, 7, 11, 13, e

quanto maior o código, menor o nível dos lóbulos laterais. O nível do lóbulo lateral pode ser calculado usando a fórmula $-20\log(N)$. Curiosamente, apesar de extensa pesquisa, nenhum código adicional de Barker foi descoberto nos últimos sessenta e cinco anos. A Figura 8 mostra os códigos de Barker e todos os seus tamanhos.

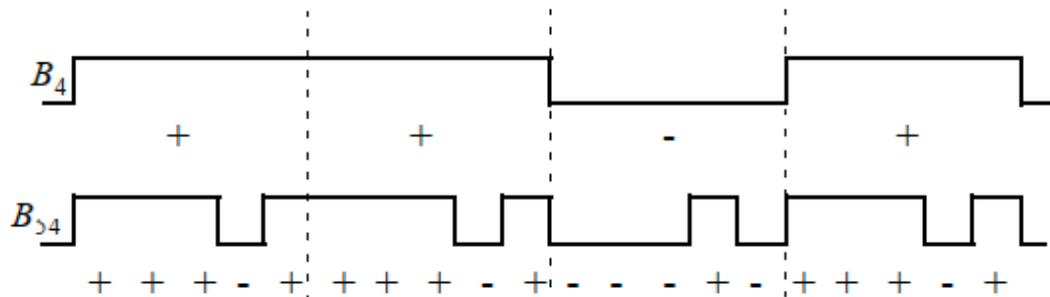
Figura 8 - Códigos Barker.

Code symbol	Code length	Code elements	Side lobe reduction (dB)
B_2	2	1 -1 1 1	6.0
B_3	3	1 1 -1	9.5
B_4	4	1 1 -1 1 1 1 1 -1	12.0
B_5	5	1 1 1 -1 1	14.0
B_7	7	1 1 1 -1 -1 1 -1	16.9
B_{11}	11	1 1 1 -1 -1 -1 1 -1 -1 1 -1	20.8
B_{13}	13	1 1 1 1 1 -1 -1 1 1 -1 1 -1 1	22.3

Fonte: Mahafza; Elsherbeni, 2004.

A redução máxima dos lóbulos laterais é oferecida pelo código Barker de tamanho 13, em que atinge o valor de -22,3 dB. No entanto, os códigos podem ser combinados para gerar códigos muito mais longos. Nesse caso, um código B_m pode ser usado dentro de um código B_n (m dentro de n) para gerar um código de comprimento mn . A taxa de compressão para o código combinado B_{mn} é igual a mn . Como um exemplo, na Figura 9 é combinado um B_{54} (MAHAFZA; ELSHERBENI, 2004).

Figura 9 - Combinação de Código Barker B54.



Fonte: Mahafza; Elsherbeni, 2004.

4.5 Processamento de sinais para estimação da direção de chegada

Existem diversas técnicas de estimação da direção de chegada (DoA) em arranjos de sensores essenciais para o processamento de sinais em sistemas radar modernos. A DoA refere-se à medida angular que compõe a posição de um alvo detectado, sendo um aspecto crucial no âmbito militar. Essas técnicas podem ser categorizadas como não-paramétricas e paramétricas, cada uma com abordagens distintas para identificar as direções de chegada dos sinais de interesse. Técnicas paramétricas envolvem uma busca simultânea por todos os parâmetros de interesse. Embora essa estratégia frequentemente resulte em estimativas mais precisas, ela vem acompanhada de uma maior complexidade computacional. Este trabalho irá abordar as não-paramétricas. No escopo destas, destacam-se métodos como *Delay and Sum* (DS), Capon ou *Minimum Variance Distortionless Response* (MVDR) e *MUltiple Signal Classification* (MUSIC). Esses métodos exploram o espectro dos sinais para identificar os ângulos de chegada (KRIN; VIBERG, 1996).

O método *Delay and Sum* (DS), também conhecido como *Beamformer* Convencional, representa uma abordagem inicial no campo da estimação da DoA em arranjos de sensores. Essa técnica opera realizando uma varredura angular para identificar os ângulos de chegada dos sinais de interesse. A essência do DS reside na estimativa da DoA medindo a intensidade do sinal em cada ângulo possível. Ao direcionar o feixe para uma determinada direção, o DS obtém a melhor estimativa do sinal que chega nessa direção. O ângulo estimado de chegada do sinal é aquele que recebe a maior potência. No entanto, este método enfrenta desafios na presença de interferências, pois a potência de saída inclui não apenas o sinal desejado, mas também sinais interferentes, o que pode limitar sua eficácia em ambientes complexos (GODARA, 1997).

O Método de Capon, ou MVDR, surge como uma evolução do DS, buscando superar suas limitações. Introduzido por Capon, esse método propõe uma solução para um problema de otimização ao avaliar a potência do sinal recebido em todas as direções possíveis. A principal inovação do MVDR é restringir o ganho do *beamformer* na direção do sinal desejado, minimizando as contribuições de potência de sinais em outras direções. Isso proporciona uma melhoria significativa na resolução angular, permitindo uma estimativa mais precisa da DoA em comparação com o DS. No entanto, o MVDR também apresenta desafios, como a necessidade de realizar uma computação de matriz inversa, que pode se tornar pouco condicionada na presença de sinais altamente correlacionados, o que torna a operação de inversão menos estável e mais propensa a erros numéricos, ou seja, pequenas mudanças nos dados de entrada podem resultar em grandes variações nos resultados da inversão (CAPON, 1969).

O método MUSIC é uma abordagem baseada em subespaços que se destaca por sua capacidade superior de resolução angular. Este método explora a geometria dos subespaços gerados pela matriz de correlação dos sinais. Os vetores diretores das direções de chegada pertencem todos ao subespaço do sinal, sendo ortogonais ao subespaço do ruído. Essa característica permite ao MUSIC distinguir fontes próximas umas das outras, desde que sejam descorrelacionadas. No entanto, exige uma quantidade substancial de amostras para estimação da matriz de correlação dos sinais, e seu desempenho está fortemente ligado à SNR do sistema. Apesar de suas vantagens de resolução angular, o alto custo computacional pode ser uma consideração crítica em implementações práticas (SCHMIDT, 1986).

5 RADAR 3D

Em um cenário marítimo, sistemas de vigilância radar eficiente é primordial para quem utiliza o espectro eletromagnético. A capacidade que este sistema possui de oferecer dados na presença de algum alvo de interesse ou até mesmo a ausência de dados, se nada for encontrado pelo radar, é de extrema relevância em um ambiente de guerra, contribuindo para a capacidade de projeção de uma Força Naval (FERREIRA, 2020).

Um sistema de vigilância que utiliza um radar 3D fornece informações sobre a direção, distância e, o que os difere dos radares 2D, a altitude do alvo. Em função disso, são extremamente valiosos no cenário atual em que a defesa antiaérea de uma Força Naval deve ser altamente eficaz diante das diversas ameaças no teatro de operações, como aeronave remotamente pilotada (ARP) e aeronaves propriamente ditas (FERREIRA, 2020).

Antes da chegada dos radares 3D, essa tarefa complexa, de se obter a e levacão do alvo, exigia a integração de múltiplos radares separados, cada um posicionado em altitudes diferentes, que cooperavam para calcular a altitude do alvo (FERREIRA, 2020). O cálculo da altitude do alvo era possível graças às discrepâncias nos ângulos de recepção desses equipamentos. Contudo, ao longo do século XX, o mundo passou por uma profunda transformação tecnológica, e com a chegada do sistema tridimensional, estes estão sendo cada vez mais alvos de medidas de ataque eletrônico.

Apesar de sua complexidade e sofisticação, os radares 3D apresentam diversas vantagens, como a redução do tempo de reação ao designar alvos para os sistemas de armas associados em todas as três coordenadas. Dependendo do método de varredura do feixe, esses radares podem ser categorizados em duas principais categorias, sendo elas: Radares que realizam varredura mecânica em azimute e por vários outros métodos na elevação (Artisan 3D, TRS 4D) e radares que realizam varredura eletrônica em azimute e elevação, cobrindo todas as direções dentro da área de cobertura, como os radares planares *phased array* (NERI, 2018).

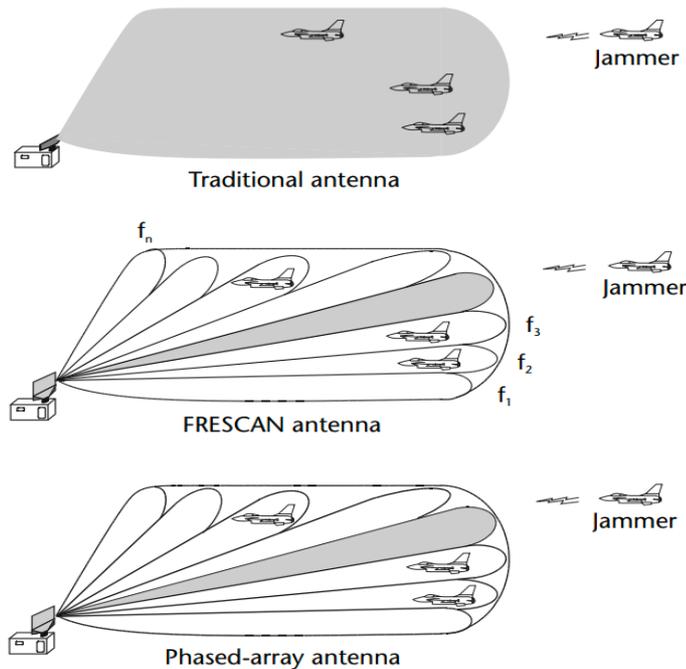
A primeira categoria, baseada na rotação mecânica da antena em azimute, é mais utilizada que a segunda. Na verdade, é uma opção mais simples e econômica em comparação com o tipo *phased array*. Os radares dessa categoria são distinguíveis pela técnica usada para a varredura do feixe na elevação, podendo ser, em etapas ou continuamente, por modulação linear da frequência de transmissão. Essa modulação pode ser aplicada dentro do pulso (varredura intrapulso) ou por divisão de tempo dentro do tempo alvo da antena no azimute, isso é chamado de varredura de frequência (FRESCAN), como é mostrado na Figura 10, em

que um interferidor (*jammer*) pode interferir apenas em um dos feixes, deixando inalterada a capacidade do radar em relação aos demais (NERI, 2018).

A segunda categoria de radar 3D, o *phased array*, que pode ser ativo ou passivo, é a última etapa na evolução dos radares de busca. Nesse caso, o radar usa um arranjo de antenas fixas, cada um cobrindo 90 a 120 graus em azimute, compreendendo uma grande matriz de elementos de transmissão-recepção capazes de produzir os deslocamentos de fase necessários para gerar e direcionar o feixe desejado (NERI, 2018).

Se estes radares forem passivos, são conhecidos como *Passive Electronic Scanned Array* (PESA). Em um PESA, um único transmissor centralizado, conhecido como Amplificador de Potência (PA, do inglês *Power Amplifier*), divide e distribui igualmente a energia gerada por uma rede de elementos. Além disso, há um Amplificador de Baixo Ruído (LNA, do inglês *Low Noise Amplifier*) para definir a figura de ruído após a combinação de todos os elementos do *array*. Todos os elementos da antena estão conectados a esse único transmissor de alta potência, como uma *Traveling Wave Tube* (TWT) ou válvula Klystron. Essa arquitetura não envolve amplificação nos elementos radiantes individuais (RICHARDS et al., 2010).

Figura 10 - Antena Multifeixe.

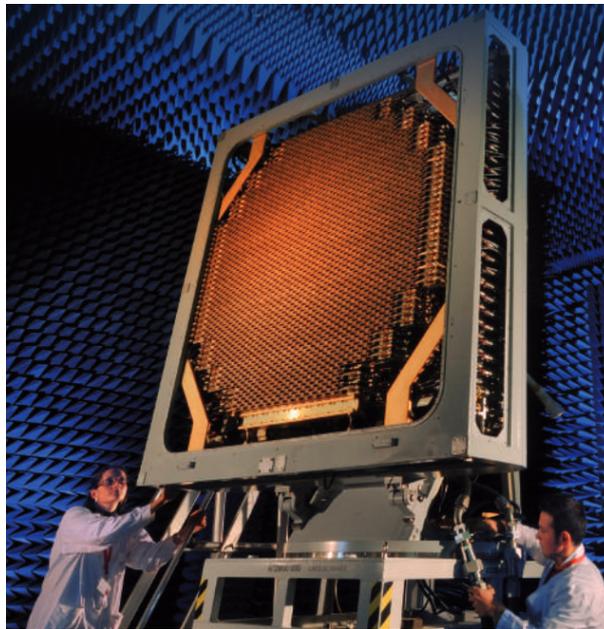


Fonte: Neri, 2018.

Com a introdução dos radares de varredura eletrônica ativa, também conhecidos como *Active Electronically Scanned Array* (AESA), houve uma significativa melhora nos sistemas de vigilância implementados em vários navios e plataformas navais. O AESA é um tipo de radar no qual tanto o transmissor quanto o receptor são compostos por numerosos módulos independentes, controlados por computador, formando um sistema de varredura eletrônica ativa, baseado em uma espécie de "macroantena faseada" (FERREIRA, 2020).

Nessa antena, o feixe de ondas de rádio é direcionado para várias direções e elevações, utilizando diferentes frequências de operação, ou seja, diversas miniantenas operando em várias "mini frequências", direções e elevações. É possível observar um arranjo dessas antenas menores na Figura 11. Isso torna mais difícil a interceptação dos sinais emitidos por equipamentos de Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica (MAGE), possibilitando que os radares 3D irradie sinais em alta potência mantendo a discricção. Cada elemento da antena está conectado individualmente a um pequeno módulo de transmissão ou recepção, que, sob o controle de um computador, desempenha as funções de transmissão e recepção da antena (FERREIRA, 2020).

Figura 11 - *Active Electronically Scanned Array* (AESA).

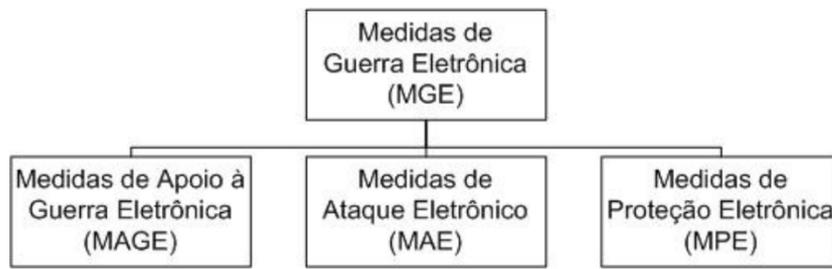


Fonte: Ferreira, 2020.

6 MEDIDAS DE GUERRA ELETRÔNICA (MGE)

As MGE referem-se às ações efetivamente executadas durante uma operação de guerra naval. Sua natureza é predominantemente tática, e sua implementação deve ser respaldada por um planejamento eficaz, bem como pela adequação dos procedimentos e equipamentos utilizados. As MGE estão subdivididas em três ramos principais: MAGE, MAE e MPE, como pode ser visto na Figura 12. As MAGE são responsáveis por assegurar a consciência situacional do ambiente eletromagnético, através de operações de busca, interceptação, registro e análise da energia eletromagnética emitida (BRASIL, 2023). Esta subdivisão não será abordada neste trabalho.

Figura 12 – Estrutura das Medidas de Guerra Eletrônica.



Fonte: Brasil, 2023.

6.1 Medidas de Proteção Eletrônica (MPE)

O fato de um radar se proteger contra um ataque eletrônico é uma tarefa contraditória e difícil de resolver na prática. Isto é, se um radar deve realizar sua missão, ele deve emitir uma energia eletromagnética. Essa emissão oferece ao inimigo, condições excelentes para a recepção, análise, seleção, bem como o tempo necessário para tomar contramedidas. Consequentemente, a proteção eletrônica do radar contra esses ataques envolve um grupo de medidas e procedimentos bem calculados que devem ser realizados com consistência e em todos os níveis de controle do radar para aproveitar ao máximo o radar bloqueado (GRZAN; COVO; BELAK, 2011).

A batalha contínua para controlar o espectro eletromagnético para um emprego irrestrito de radar resultou em mais de 150 técnicas de MPE de radar. Essas técnicas são projetadas para negar a eficácia de interferência eletrônica e alvos falsos em sistemas de radar. Essas técnicas de MPE de radar podem ser incorporadas ao design de um sistema de radar ou adicionadas a um sistema de radar existente em resposta a uma técnica de interferência (USAF, 2000).

De acordo com Neri (2018), as principais técnicas incluem a indicação de alvo em movimento (MTI, do inglês *Moving Target Indication*), para minimizar ecos devido ao *clutter*; Constante de Falso Alarme (CFAR, do inglês *Constant false alarm rate*), que são receptores capazes de ajustar sinais recebidos para manter constante a taxa de falso alarme; agilidade de frequência, técnica que permite que os radares mudem rapidamente os modos de operação em uma base pulso-a-pulso e a compressão de pulso, já citada anteriormente.

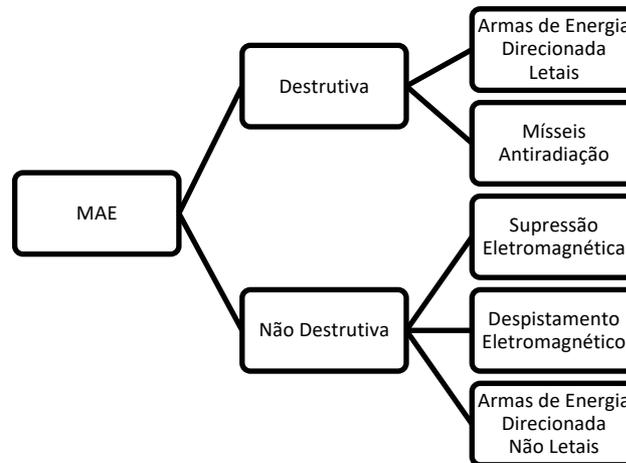
6.2 Medidas de Ataque Eletrônico

As MAE são o conjunto de ações tomadas para evitar ou reduzir o uso efetivo do espectro eletromagnético pelo oponente. Podem ser utilizadas, também, para degradar, neutralizar ou destruir a capacidade de combate por meio de equipamentos e armamentos que utilizem este espectro. A finalidade destas medidas é reduzir os efeitos de um radar e a capacidade da utilização de técnicas comuns destes equipamentos, como agilidade de frequência e compressão de pulso (BRASIL, 2018).

As MAE, então, emergem como elementos cruciais no cenário moderno de guerra, desempenhando um papel estratégico na perturbação e neutralização de sistemas eletrônicos inimigos, seja em combate aéreo, marítimo ou terrestre. Ao interromper as comunicações, desorientar radares e desabilitar sistemas de orientação e navegação, essas medidas conferem uma vantagem tática substancial e demonstram uma supremacia no controle do espaço eletromagnético, fator decisivo em um ambiente de guerra contemporânea.

Estas medidas podem ser classificadas em dois grupos: destrutiva ou não destrutiva. A primeira introduz o conceito de letalidade na GE, anteriormente considerada uma ferramenta defensiva. Mísseis antirradiação e dispositivos de energia direcionada estão entre as medidas destrutivas existentes. Por outro lado, a não destrutiva faz uso ativo ou passivo do espectro eletromagnético para realizar operações de ataque eletrônico sem causar danos físicos ao oponente. Essas medidas são subdivididas em Supressão Eletromagnética, Despistamento Eletromagnético e Armas de Energia Direcionada. Esta subdivisão está descrita no diagrama de blocos da Figura 13.

Figura 13 - Medidas de Ataque Eletrônico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

6.2.1 Medidas de Ataque Eletrônico Destrutiva

O míssil antirradiação (ARM) é capaz de direcionar-se com alta precisão para um radar, guiado pela radiação emitida pelo próprio radar. Isso é realizado por meio de um buscador passivo, na prática muito semelhante a um pequeno sistema MAGE, capaz de extrair os dados angulares necessários das emissões do radar alvo. Os ARMs têm grande importância no teatro operacional, sua presença reconhecida levanta muitas dúvidas sobre o uso de radar na mente do inimigo. Eles são comumente mísseis ar-terra instalados em aeronaves para missões dedicadas à supressão da defesa aérea inimiga (NERI, 2008).

Normalmente, o sistema MAGE a bordo da aeronave intercepta, identifica e localiza o radar alvo, designando-o para o buscador do ARM por meio de parâmetros como, PRT, frequência e possivelmente uma porta de tempo em tempo real (ou seja, o intervalo de tempo no qual a chegada dos pulsos do radar é esperada). O receptor do ARM guarda as informações recebidas e, quando o buscador detecta a emissão designada, ignorando todo o resto, ele trava nos sinais do radar alvo, enviando um sinal de "feedback" para o piloto que pode então preparar o lançamento. A partir dos sinais, o receptor deduz os erros angulares necessários para o guiamento, que ocorre exatamente como no caso de mísseis com orientação ativa. Uma vez lançado, o míssil não requer assistência. Para se proteger, o radar alvo pode parar de transmitir, mas isso não garante a sobrevivência, já que o míssil pode continuar rastreando com base em coordenadas memorizadas (NERI, 2008).

O objetivo principal de um ARM é impedir o uso do radar; se ele não pode operar, se torna completamente ineficaz. O ARM pode representar técnica de MAE não apenas ativa,

mas também do tipo "*hard kill*", já que pode levar à destruição do radar. Tipicamente, é uma arma de longo alcance que pode ser lançada a uma grande distância, o que significa que a aeronave não precisa se aproximar perigosamente do alvo (NERI, 2008).

Já as armas de energia direcionada (DEW, do inglês *Directed Energy Weapons*) são dispositivos que utilizam fontes de energia eletromagnética com o objetivo de causar danos diretos ou destruir equipamentos, instalações e pessoal inimigo. Estas armas podem também não causar danos diretos ao alvo, nesse caso são classificadas como não letais. Além disso, podem ser empregues para identificar, explorar, reduzir ou impedir o uso pelo inimigo do espectro eletromagnético, provocando danos, destruição e interrupção (DEVECI, 2007). Elas podem ser dos tipos:

- Armas de feixes de partículas (PBW, do inglês *Particles Beam Weapons*);
- Microondas de alta potência (HPM, do inglês *High Power Microwave*);
- Laser de alta energia (HEL, do inglês *High Energy Laser*); e
- Armas de canal de plasma induzido por laser (LIPC, do inglês *Laser-induced plasma channel*).

Com exceção das armas LIPC, elas utilizam principalmente energia direcionada na forma de um feixe concentrado de energia eletromagnética ou partículas atômicas ou subatômicas na direção alvo para causar danos pretendidos aos equipamentos, instalações e pessoal do inimigo. Os danos pretendidos podem ser letais ou não letais (ZOHURI, 2016).

Uma PBW compartilha mais semelhança com armas convencionais do que com armas a laser ou de pulsos eletromagnéticos, pois operam com base na energia cinética. Em vez de utilizar projéteis convencionais, essas armas lançam partículas atômicas ou subatômicas em direção a um alvo, com o propósito de perturbar ou destruir a estrutura molecular ou atômica desse alvo. Basicamente, elas elevam rapidamente a temperatura das moléculas e/ou átomos do alvo a ponto de induzir a explosão do material alvo. Considerada a menos desenvolvida das quatro tecnologias, se difere das armas de laser de alta energia e micro-ondas de alta potência, que direcionam energia eletromagnética. Uma PBW ao entregar energia cinética na estrutura atômica do alvo, funciona apenas como uma arma de destruição (ROBERDS, 1984).

Os sistemas DEW baseados em micro-ondas visam gerar interferência eletromagnética para danificar os sistemas eletrônicos inimigos, sendo preferíveis em veículos aéreos de combate não tripulados devido a preocupações com efeitos colaterais. A possibilidade de uso delas como arma para atacar alvos subterrâneos também está em

consideração. No centro das armas DEW está um laser de alta potência, capaz de infligir danos físicos ao alvo por meio de onda contínua ou pulsada, representando uma mudança significativa no equilíbrio militar nas próximas duas décadas. Por fim, as armas LIPC são híbridas, usando um laser para ionizar um caminho de moléculas até o alvo, permitindo a entrega de uma carga elétrica e causando danos a tudo que conduza eletricidade melhor que o ambiente ao seu redor (ZOHURI, 2016).

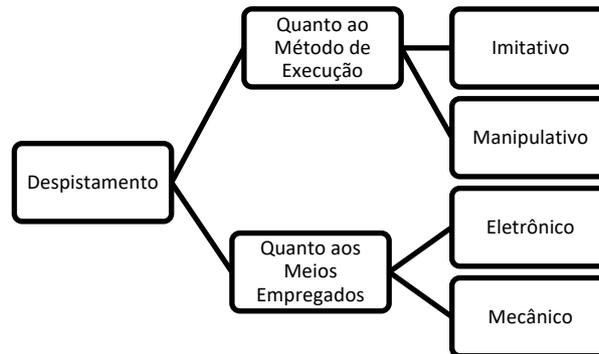
6.2.2 Medidas de Ataque Eletrônico Não Destrutiva

As técnicas não destrutivas comuns em ataques eletrônicos podem ser agrupadas em duas categorias principais: bloqueio, inserido na supressão eletromagnética, que visa aumentar o ruído no receptor do radar usando sinais semelhantes a ruídos, e despistamento, que busca criar alvos falsos no processador do radar com sinais falsos semelhantes aos alvos reais. Enquanto o bloqueio procura impedir a detecção ou medição precisa do alvo, o despistamento busca confundir o radar com informações falsas. Essas abordagens diferem não apenas em seus objetivos, mas também na estrutura espectral dos sinais. No bloqueio, a interferência está fortemente relacionada à forma de onda do radar alvo, ficando principalmente dentro de sua largura de banda, ao passo que o despistamento envolve sinais que imitam alvos, oferecendo maior flexibilidade na largura de banda. Em casos em que radares alvos empregam técnicas avançadas, como salto de frequência, o sucesso do bloqueio depende da capacidade do sistema interferente de antecipar o padrão de salto do radar, levando muitas vezes a um uso mais amplo de sinais que cobrem uma largura de banda superior à do radar alvo para garantir eficácia (CAROTENUTO; DE MAIO, 2021).

6.2.2.1 Despistamento Eletromagnético

A respeito do despistamento eletromagnético, este pode ser subdividido em Tecnologia de Furtividade “*Stealth*” e Despistamento. Esta pode ser classificado quanto ao seu método de execução e aos meios empregados, conforme diagrama de blocos da Figura 14.

Figura 14 - Tipos de Despistamento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Em termos dos métodos de execução, o imitativo é caracterizado pela tentativa de introduzir nos sistemas inimigos sinais que se assemelham às suas próprias emissões. Por outro lado, o método manipulativo é obtido por meio da alteração ou simulação das emissões eletromagnéticas de nossas próprias forças amigas. Ao fazer isso, pretende-se induzir o oponente ao erro ao tentar interpretar os dados relacionados às nossas forças (BRASIL, 2018).

Em relação aos meios empregados, podemos subdividi-los em despistamento mecânico e eletrônico. O primeiro não requer o uso ativo de emissões eletromagnéticas, age através da absorção ou reflexão de energia. Outrossim, o segundo envolve o uso ativo de emissões eletromagnéticas, utilizando técnicas como irradiação, reirradiação e alteração de sinais para confundir ou enganar os sistemas inimigos (BRASIL, 2018).

Nesse contexto, as estratégias de despistamento eletromagnético têm se revelado vitais para a salvaguarda das Forças contra investidas inimigas. Técnicas que envolvem o uso de *chaff* e *decoys* têm se destacado como medidas eficazes no cenário das MAE (ADAMY, 2003).

Ressalta-se que tanto o *chaff* quanto o *decoy* podem utilizar técnicas passivas de despistamento, ou seja, atuam como refletores de sinais eletromagnéticos. Sendo assim, é classificado como uma forma de despistamento e/ou bloqueio mecânicos, dependendo da exploração das propriedades eletromagnéticas do ambiente, especialmente das ondas de radar emitidas pelo inimigo.

O termo "*chaff*", traduzido em português como "palha" ou "estolho", são tiras de materiais metálicos ou plástico metalizado em forma de fita, que são liberadas por aeronaves ou navios para mascarar ou ocultar outros 'alvos'. As reflexões de radar das partículas de *chaff* podem fazer com que um radar de rastreamento perca o alvo. Os materiais em folha são

geralmente cortados em pequenos pedaços, cujo tamanho depende da frequência de interrogação do radar (aproximadamente metade do comprimento de onda da frequência do radar-alvo). Sendo deste comprimento, o *chaff* age como um dipolo ressonante e reflete grande parte da energia de volta para o radar (USA, 2013).

O princípio de funcionamento está relacionado às características dos sistemas de radar, que ao emitir pulsos de energia eletromagnética em direção a objetos, são capazes de determinar a presença, localização e informações adicionais desses objetos com base nos sinais refletidos. No contexto de MAE, o *chaff* desempenha um papel crucial. Ao ser dispersado no ar, cria múltiplos alvos falsos, refletindo as ondas do radar inimigo de maneira semelhante a aeronaves reais. Essa estratégia sobrecarrega os sistemas de detecção e confunde os radares adversários, dificultando a distinção entre alvos verdadeiros e falsos ao formar uma seção reta radar (RCS, do inglês *radar cross-section*) idêntica à dos alvos a serem ocultados (ADAMY, 2011).

A eficiência do *chaff* em bloquear a detecção do radar é influenciada pela avaliação do espalhamento eletromagnético (EM) da nuvem de *chaff* e pela proporção de mistura dos elementos em conformidade com as frequências de operação do radar. Essa técnica de dispersão, frequentemente realizada por meio de sistemas de lançamento, cria corredores amplos nos quais os radares de busca são bloqueados, tornando difícil a identificação de alvos de aeronaves, mesmo em altitudes diferentes daquelas preenchidas pela nuvem (NERI, 2018).

Os *decoys*, elementos fundamentais na GE, desempenham um papel crucial ao confundir adversários e proteger forças amigas. Estes dispositivos, projetados para imitar assinaturas eletromagnéticas de sistemas militares reais, são divididos principalmente em duas categorias: ativos e passivos. Os *decoys* passivos são alvos fictícios do radar, consideravelmente menor do que a aeronave, destinados a protegê-la. Buscam camuflar ou assemelhar-se a alvos reais, explorando o ambiente circundante, como características geográficas, para criar a ilusão de uma presença militar significativa. Utilizando técnicas como o padrão de refletor, eles conseguem aparentar ser maiores, enganando os sistemas de detecção inimigos. Por outro lado, os *decoys* ativos emitem sinais próprios, simulando assinaturas eletromagnéticas de sistemas militares reais, como sinais de radar ou comunicações falsas. Esta categoria tem a capacidade de atrair e confundir sensores inimigos, levando-os a acreditar na presença de alvos genuínos (ADAMY, 2015).

Os modos de utilização destes equipamentos variam, sendo classificados como descartáveis, rebocados e independentes. *Decoys* descartáveis são dispositivos compactos e

leves, lançados rapidamente no campo de batalha por aeronaves, embarcações ou lançadores terrestres. Sua função é criar alvos falsos durante um ataque, desviando a atenção e os recursos inimigos, similar ao *chaff*. Os rebocados, maiores, imitam de maneira mais convincente alvos como aeronaves, navios ou veículos terrestres, sendo rebocados por aeronaves ou embarcações. Eles simulam movimentos e assinaturas eletromagnéticas, enganando o inimigo e direcionando seus recursos para alvos fictícios. Por fim, os independentes operam autonomamente, equipados com sistemas de propulsão próprios, permitindo manobras táticas para confundir o inimigo. Esses *decoys* têm a capacidade de imitar aeronaves, mísseis ou veículos terrestres, emitindo sinais falsos e interferindo nas comunicações inimigas, atraindo a atenção e os recursos do adversário para criar oportunidades estratégicas para as forças amigas (ADAMY, 2015).

Em relação a tecnologia *stealth*, ou capacidade de ocultação, representa uma subdivisão do despistamento eletromagnético, empregando vários métodos para tornar ativos menos detectáveis por radares, infravermelhos e outros sensores. Essa tecnologia confere uma vantagem estratégica, dificultando a detecção do usuário, permitindo a realização de missões militares surpresa e, em última instância, aumentando sua capacidade de sobrevivência no combate. No contexto das MAE, estratégias furtivas ou *stealth* são fundamentais para evitar detecção, com estudos dedicados ao desenvolvimento de materiais e geometrias que minimizam a RCS do alvo. Técnicas mais sofisticadas podem até mesmo usar o sinal do inimigo para replicar sua assinatura, ajustando os dados de eco de destino correspondentes e tornando o eco invisível ou reproduzindo uma posição falsa (NERI, 2018).

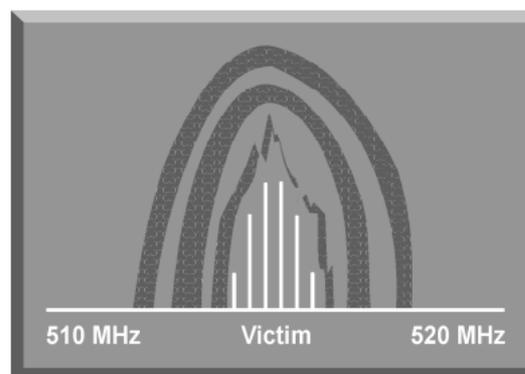
6.2.2.2 Supressão Eletromagnética

Esta categoria de MAE, que é caracterizada por ser uma interferência de ruído, pode ser subdividida em bloqueio mecânico e eletrônico. Aquele utiliza dispositivos que absorvem ou refletem radiação quando colocados entre o transmissor e o receptor. Já o eletrônico, os bloqueadores emitem sinais de interferência em direção ao radar do adversário. Esse processo consiste em obstruir o receptor com sinais de energia altamente focalizados, resultando na interrupção da comunicação. Essa tática é empregada para prevenir ou, no mínimo, dificultar a recepção de sinais nos dispositivos de detecção do oponente, sendo mais efetivos em radares de busca quando comparados com os de acompanhamento. O bloqueio eletrônico compreende três categorias principais conhecidas como bloqueio de ponto (*spot*), barragem (*barrage*) e varredura (*swept*) (FAB, 2011).

Um aspecto importante sobre interferência é a densidade de potência. A interferência de ruído depende da densidade de potência para sua eficácia. A densidade de potência é uma função da faixa de frequência, ou largura de banda, do sinal de interferência. Se um interferidor cobre uma faixa estreita de frequências, ele pode concentrar energia em uma banda estreita, aumentando sua densidade de potência. Já se cobrir uma ampla faixa de frequências, a energia é distribuída por toda essa faixa, reduzindo a densidade de potência (USAF, 2000).

Quando um bloqueador direciona toda a sua potência para uma única frequência, ocorre o bloqueio de ponto. É um ruído com largura de banda muito estreita, cobrindo uma largura de banda de 10 megahertz ou menos, ou seja, ajustado apenas para a frequência do radar alvo (Figura 15). A vantagem é a sua densidade de potência, capaz de neutralizar por completo, mesmo em faixas mais longas, os receptores de radar. Uma desvantagem é quanto a sua faixa estreita, uma vez que seja preciso interferir mais de um radar, mais de um bloqueador seria necessário. Ainda que isso fosse possível, essa abordagem demandaria consideráveis recursos e contra sistemas modernos, como radares com agilidade de frequência, que podem mudar de frequência a cada pulso, seria, provavelmente, pouco eficaz (USAF, 2000).

Figura 15 - Bloqueio de Ponto.

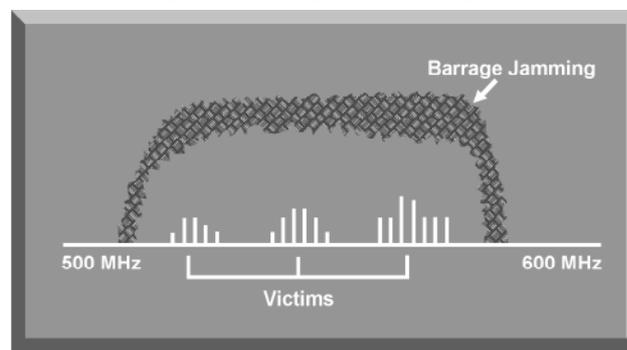


Fonte: USAF, 2000.

A técnica de bloqueio de barragem é uma abordagem em que a potência elevada é extinta em prol da cobertura contínua de várias frequências de radar, conforme Figura 16. O sinal de interferência é espalhado por uma ampla faixa de frequências, o que reduz a potência efetiva irradiada em uma frequência específica. Esta técnica é útil contra radares com agilidade de frequência, sistemas de radar que usam múltiplos feixes ou vários sistemas de radar operando em uma faixa de frequência específica. Ao espalhar a interferência por uma ampla faixa de frequências, há algum nível de interferência, independentemente da frequência

usada pelo radar (USAF, 2000). A sua grande vantagem é que não requer informações em tempo real sobre as frequências de operação do radar. A capacidade de "*look-through*" (interrupção da interferência para procurar sinais de radar de ameaça) não é necessária. O problema é que a interferência de barragem geralmente tem eficiência de interferência muito baixa. A maior parte da potência de interferência é desperdiçada porque a SNR efetiva é reduzida pelo fator de eficiência, e a faixa de *burn-through* correspondente é aumentada. Este termo se refere ao ponto em que a potência do sinal do radar alvo é suficientemente forte para superar a interferência, permitindo que o radar detecte o alvo, mesmo em meio ao ruído gerado pelo interferidor (ADAMY, 2015).

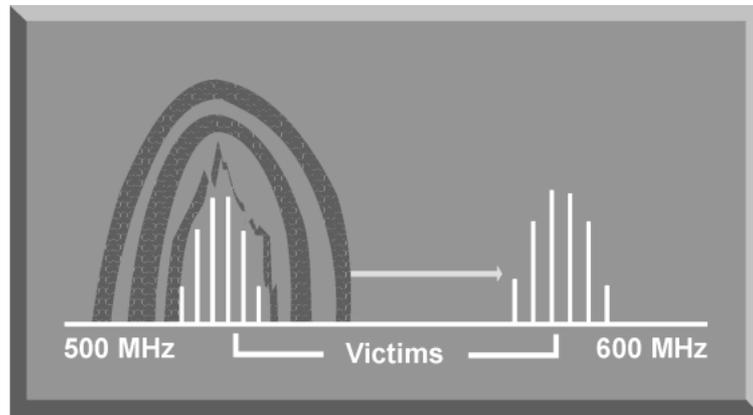
Figura 16 - Bloqueio de Barragem.



Fonte: USAF, 2000.

Se um bloqueador de banda estreita é varrido por toda a faixa de frequência esperada para conter sinais de ameaça, conforme mostrado na Figura 17, ele é chamado de bloqueador de varredura. Assim como o bloqueador de barragem, esse não requer uma verificação para sinais e bloqueará qualquer sinal dentro da faixa de varredura. Enquanto o bloqueador estiver dentro da largura de banda de um radar-alvo, ele fornecerá a mesma eficiência de bloqueio que um bloqueador de ponto. No entanto, o tempo de duração do bloqueio será reduzido pela razão entre a largura de banda do ponto e a faixa de varredura, ou seja, a eficácia do bloqueio é determinada predominantemente pela potência do sinal de interferência, sua largura de banda e taxa de varredura desse sinal. A vantagem dessa técnica reside no fato de que, simultaneamente, concentra toda a potência do bloqueio em uma faixa estreita de frequências, abrangendo, no entanto, uma ampla banda que pode conter diversos equipamentos. Entretanto, sua desvantagem reside no fato que apesar de bloquear várias frequências em sequência, não as afeta simultaneamente, restringindo assim sua eficácia até certo ponto (ADAMY, 2015).

Figura 17 - Bloqueio de Varredura.



Fonte: USAF, 2000.

7 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

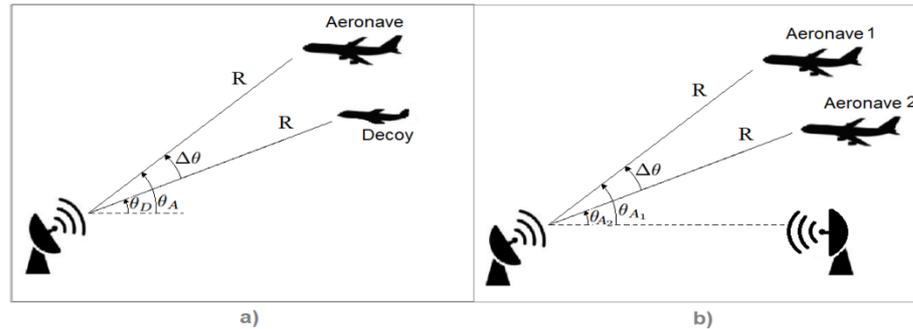
Com o propósito de avaliar o desempenho do sistema radar discutido na seção 5, foi conduzida uma modelagem computacional utilizando o software MatLab. Essa modelagem abrange a cadeia de recepção de um radar com arquitetura *phased array* para estimação da elevação. Nesse contexto, sinais complexos em tempo contínuo, provenientes dos ecos de alvos presentes no volume de busca, foram considerados. Esses sinais foram combinados com interferências e ruídos gerados, respectivamente, por um interferidor e pela própria cadeia de recepção do radar.

A escolha dessa geometria de arranjo, em que se tem uma coleção de antenas individuais organizadas e sincronizadas em fase, baseia-se na arquitetura implementada no Radar de Busca Aérea Artisan 3D, fabricado pela BAE SYSTEMS MARITIME, visto que é o equipamento mais moderno da Marinha do Brasil, sendo embarcado no Navio-Aeródromo Multipropósito Atlântico. Além disso, foi o mesmo escolhido para equipar os navios da classe Tamandaré.

O cenário fundamental para os experimentos envolve um radar com a capacidade de estimar a posição de alvos aéreos em três dimensões: a distância radial (conhecida como "*Range*"), R , o azimute, ϕ , e a elevação θ . O radar está localizado em uma plataforma estabilizada no mar, enquanto dois alvos com a mesma RCS estão a uma distância R do sistema radar, com uma diferença angular de elevação $\Delta\theta$ entre eles e mesmo azimute. Como o cenário base representa sistemas no mar, onde os únicos alvos presentes no volume de busca são os já considerados detectados em um azimute específico para os cenários 1 e 2, não é necessário estimar os azimutes, ϕ , desses alvos. A análise está restrita apenas às suas elevações estimadas. As Figuras 18-a e 18-b ilustram os dois cenários considerados para os experimentos, em que no primeiro caso o *decoy* propulsado é o interferidor e no segundo caso o interferidor está em terra.

O sinal emitido pelo interferidor é modulado em amplitude (AM), sem a supressão da portadora. Esse *jammer* identifica o sinal do radar e introduz uma modulação de amplitude incompatível, resultando em uma sobreposição de sinais que compromete a integridade do sistema de radar alvo, sendo, portanto, um bloqueador de ponto. Ao introduzir variações na amplitude do sinal transmitido, o *jammer* AM dificulta a extração precisa de informações úteis pelos sistemas receptores, levando a erros significativos na detecção e rastreamento de alvos.

Figura 18 - Cenários base considerados para a modelagem: a) O *decoy* propulsado é o interferidor; e b) O transmissor ao nível do mar é o interferidor.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os experimentos foram conduzidos utilizando o mesmo radar, mas com duas modulações intrapulso diferentes, *chirp* e *Barker code 13*, descritas na subseção 4.4. Os sinais usados são de banda estreita, $x_m(k)$, gerados por um simulador. Na saída de cada um dos m canais de recepção, esses sinais já passaram pelo processo de compressão e integração coerente de pulsos. Simulações foram realizadas utilizando os parâmetros descritos da Tabela 1. Considerando que diversos fabricantes optam por não compartilhar os algoritmos de seus radares, a estimativa do ângulo vertical foi realizada por meio dos métodos clássicos de estimativa de DoA, conforme descrito na subseção 4.5. A mesma grade de busca foi empregada para todos os métodos, com um passo de $0,01^\circ$. Além disso, foram realizados 50 ensaios independentes. Quanto ao alvo, as RCS utilizadas foram iguais a 10m^2 , pois se assemelha a uma aeronave. Não foi considerada a presença de *clutter* nos cenários, e as simulações não incorporaram modelagem de multipercurso.

Tabela 1 - Parâmetros de Entrada.

PARÂMETRO	VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE
Freq. de amostragem (banda-base)	f_s	5	MHz
Frequência da portadora	f_c	3	GHz
Duração do pulso de transmissão	l_s	40	μs
Frequência de repetição de pulso	PRF	1,800	kHz
Larg. banda do sinal de transmissão	B	3	MHz
Largura de banda do ruído térmico	B_n	3	MHz
Potência de transmissão	P_t	10	W
Ganho de transmissão	G_t	35,4	dB
Perdas do sistema	L	6	dB
Figura de ruído	F	3	dB
Número de pulsos integrados	n_p	7	adm
Espaç. vertical entre elementos	dz	0,1	m

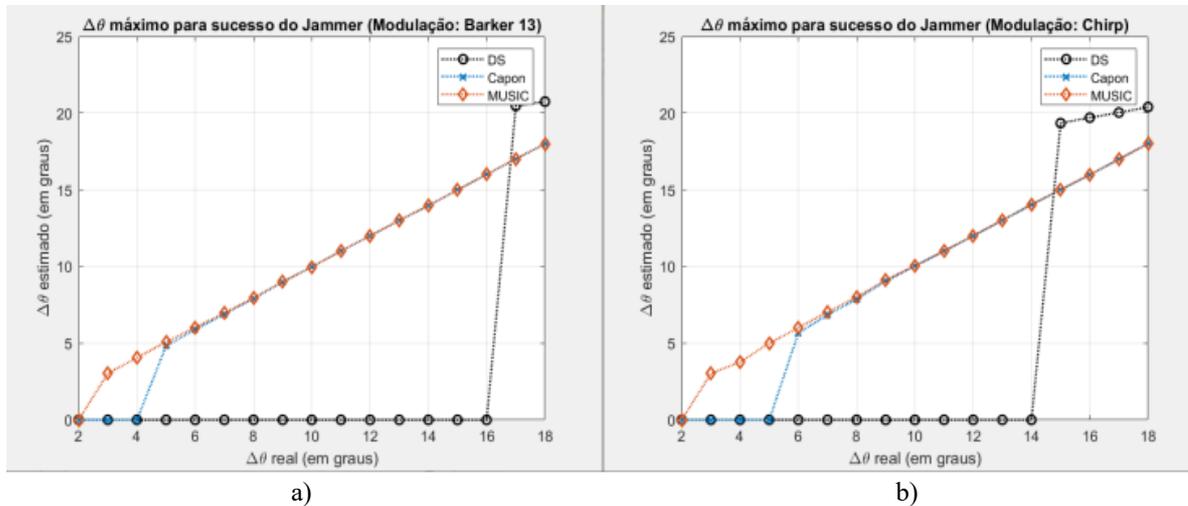
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

7.1 Cenário 1

Neste cenário, os alvos são uma aeronave e um *decoy* propulsado, com elevações designadas como θ_A e θ_D , conforme ilustrado na Figura 18-a. A aeronave posiciona-se para realizar um ataque, enquanto o *decoy* emite sinais de bloqueio em banda estreita, modulados em amplitude, com o objetivo de criar interferência no radar 3D em análise. A cada experimento, a diferença angular selecionada, $\Delta\theta = \theta_A - \theta_D$, aumenta gradualmente em intervalos de 1° . O propósito deste experimento é saber qual a distância angular mínima que cada algoritmo de estimação da DoA consegue discriminar os alvos na presença de um sinal interferidor modulado em AM, proveniente de um bloqueador.

É fundamental destacar que, neste cenário, os alvos estão posicionados a uma distância radial de $R = 20$ km, e a razão sinal-interferência (SIR) é de -3 dB. No decorrer deste experimento, o critério estabelecido para a seleção dos parâmetros dos sinais gerados foi a amplitude de pico. Para isso, considera-se que o sinal pulsado transmitido pelo radar, conhecido como *chirp*, tem uma amplitude de pico duas vezes maior que a amplitude da portadora do sinal AM, representada por $A_{ch} = 2A_c$. A Figura 19 apresenta as curvas para os algoritmos escolhidos, nos diferentes tipos de modulação intrapulso, sendo a Figura 19-a o *Barker Code 13* e a Figura 19-b o *Chirp*. São apresentadas as diferenças angulares reais entre a aeronave e o bloqueador propulsado, $\Delta\theta$, e a diferença entre seus valores estimados pelo radar, $\Delta\hat{\theta}$. No eixo das abscissas representa a diferença angular real entre a aeronave e o bloqueador propulsado, enquanto no eixo das ordenadas são apresentados os valores estimados por cada algoritmo de DoA.

Figura 19 – Diferenças angulares em cada algoritmo de estimação da DoA dos radares utilizando: a) modulação intrapulso *Barker Code* 13; e b) modulação intrapulso *Chirp*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os resultados do primeiro experimento indicam que a eficácia do *decoy* propulsado não varia significativamente com as diferentes modulações intrapulso adotadas pelos radares. O algoritmo MUSIC demonstrou uma notável resistência ao *jammer* em modulação AM, seja utilizando o *chirp* ou o *Barker* 13, apresentando uma limitação na discriminação angular apenas até 2 graus, considerando um *Range* de 20 km.

Na comparação entre dois radares que empregam a técnica DS, o interferidor AM atuando no radar com modulação intrapulso do tipo *chirp* revelou-se menos eficiente, pois o radar começa a discriminar dois alvos distintos após 14 graus neste caso e 16 graus no *Barker Code* 13, mesmo não conseguindo discernir a diferença angular certa entre eles. Similarmente, ao analisar dois radares que utilizam o algoritmo Capon como estimador de DoA, o interferidor AM atuando no radar com modulação intrapulso do tipo *Barker Code* 13 mostrou-se menos eficaz, visto que este consegue discriminar os alvos com 4 graus e o *Chirp* apenas com 5 graus.

7.2 Cenário 2

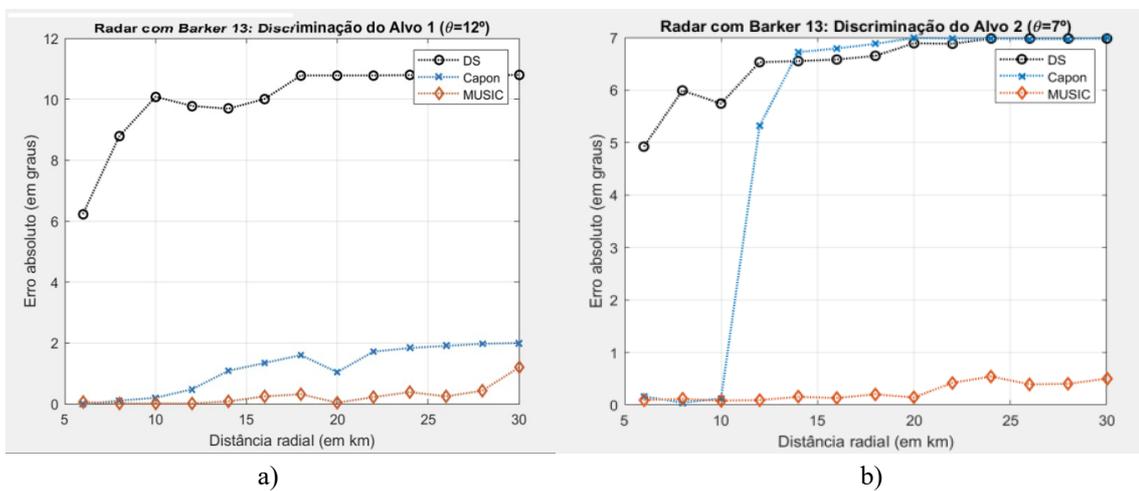
Um segundo experimento foi realizado com base na Figura 18-b, em que há duas aeronaves com uma separação angular fixa entre elas, ou seja, velocidades iguais. Enquanto varia apenas o *Range* entre as aeronaves e o radar que tenta detectá-las.

À medida que as aeronaves variam seus respectivos *Ranges* em relação ao radar de busca, a SNR altera. Em contrapartida, a distância do radar em relação ao interferidor de

terra permanece constante. Isso conduz a variações na relação da razão do sinal com o ruído somado a interferência (SINR) - Sinal/(Ruído+Interferência). O objetivo do experimento é identificar a condição em que o *jammer* de terra se mostra mais eficaz em interferir o radar, considerando os dois tipos de modulações intrapulso, em resposta às variações da SINR.

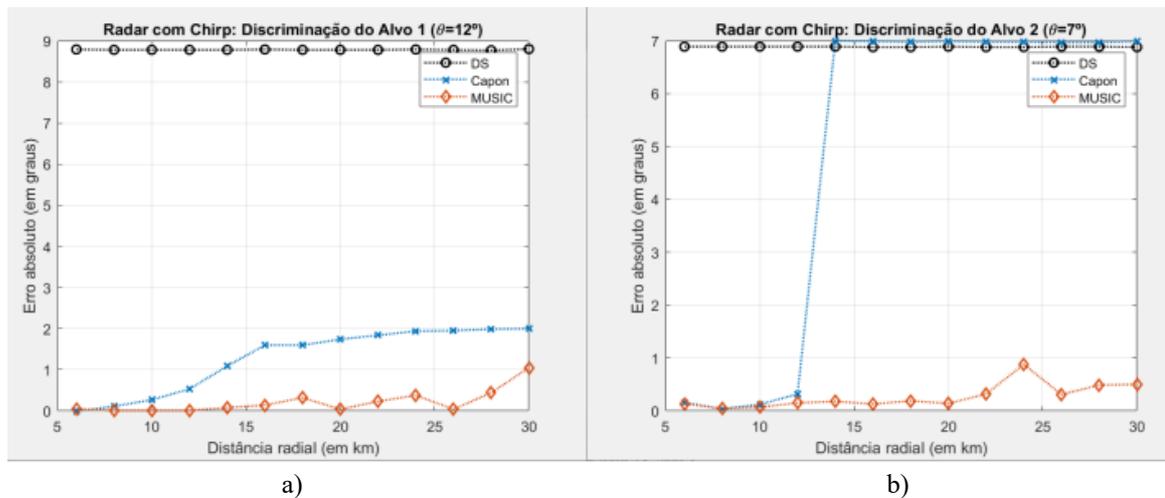
Os gráficos correspondentes a seguir, foram delineados separadamente para cada alvo, sendo a Figura 20-a e 21-a para o Alvo 1 e Figura 20-b e 21-b para o Alvo 2, e tipo de modulação intrapulso, Figura 20 o *Barker Code 13* e Figura 21 o *Chirp*. O eixo das abscissas representa o *range* dos alvos, enquanto o eixo das ordenadas retrata o erro estimado em discriminar os dois alvos.

Figura 20 - Discriminação dos alvos em radar com *Barker Code 13*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Figura 21 - Discriminação dos alvos em radar com *Chirp*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Quando o erro se aproxima de zero, ou atinge esse valor, indica que o algoritmo

de estimação de DoA foi capaz de estimar a elevação dos dois alvos, distintamente, mesmo na presença do *jammer* de terra, para o *range* específico. No caso do método DS, que possui uma resolução relativamente baixa, o erro estimado, mesmo em curtas distâncias, já se mostrou bem elevado, o que torna o interferidor eficaz contra esse método.

Pode ser observado do cenário 2 que, para *ranges* relativamente menores, ou seja, para SINR mais elevados, um radar que emprega o algoritmo DS em conjunto com modulação intrapulso do tipo *Barker* 13, por exemplo, o interferidor AM mostra-se menos eficaz contra o radar do que quando comparado a um que utiliza DS com *Chirp*, visto que com este o erro estimado é fixo e no primeiro caso o erro é significativamente menor para *ranges* menores. Além disso, observa-se que a eficiência do *jammer* é menor contra os algoritmos Capon e MUSIC. Tem-se também que à medida que a distância angular entre o alvo e o próprio interferidor, θ_{A1} e θ_{A2} da Figura 18-b, aumenta, o erro é menor, ou seja, quanto mais longe do interferidor, menos interferência foi observada. A diminuição do erro é mais nítida na utilização do método Capon, em que o erro é de aproximadamente 7 graus no alvo mais próximo do interferidor.

8 CONCLUSÃO

Ao final dessa pesquisa, pode-se afirmar que a GE emergiu como uma peça fundamental no cenário moderno de conflitos, desempenhando um papel essencial na defesa e ataque em operações militares. Em particular, as MAE desempenham um papel crucial na interrupção, negação e degradação das capacidades do inimigo no espectro eletromagnético.

A crescente dependência de sistemas eletrônicos nos combates tornou a GE uma ferramenta estratégica. A MAE, como componente vital da GE, oferece a capacidade de atacar sistemas de radar e ganhar vantagem tática. Essas medidas não apenas minam a eficácia dos sistemas adversários, mas também contribuem para a proteção das próprias forças, criando uma zona de negação eletrônica.

Com base nas simulações conduzidas nesse trabalho, foi possível observar que as MAE são capazes de ser o diferencial em uma guerra, visto que podem confundir um radar ao discriminar a presença de alvos hostis em determinada área de conflito. Isso faria com que o elemento surpresa oferecesse a oportunidade de explorar essa vantagem e propagasse o poder militar sobre o adversário.

No contexto da crescente sofisticação tecnológica, o estudo bibliográfico demonstrou que as MAE evoluíram para lidar com sistemas de radar avançados, como os radares 3D, que estão evoluindo cada vez mais. A habilidade de controlar o espectro eletromagnético não apenas fornece uma vantagem tática significativa, mas também destaca a importância da constante adaptação e inovação nas operações militares contemporâneas. O sucesso em um conflito atualmente muitas vezes depende da eficácia das MAE, consolidando assim sua grande relevância no panorama da segurança global.

8.1 Considerações Finais

No âmbito nacional, a crescente importância de GE e das MAE revela a necessidade de investimentos estratégicos por parte da Marinha do Brasil. A adoção de tecnologias avançadas, como o radar Artisan 3D, evidencia o compromisso com a modernização e aprimoramento das capacidades operacionais.

Diante do cenário global em constante evolução, em que as ameaças eletrônicas desempenham um papel cada vez mais proeminente, a Marinha do Brasil deve intensificar seus esforços para desenvolver e implementar medidas adaptadas às especificidades de suas operações navais. O investimento contínuo nessa área é crucial para garantir o elevado grau de prestamento, a segurança das operações e a proteção eficaz contra potenciais adversários,

contribuindo, assim, para a soberania nacional e a projeção de poder em águas territoriais.

8.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Um tema importante para futuros trabalhos seria continuar o estudo na área de MAE, em virtude da importância cada vez maior de domínio do espectro eletromagnético. Com base nesse assunto, poderia ser explorado técnicas alternativas, como o bloqueio de varredura, e sua análise específica em uma arquitetura de radar com agilidade em frequência. Ao direcionar esforços para compreender em detalhes a aplicação do bloqueio de varredura em radares que incorporam agilidade em frequência, pode-se contribuir para o desenvolvimento de contramedidas mais adaptáveis e eficientes. A agilidade em frequência representa um desafio adicional e interessante, pois implica mudanças dinâmicas nas características do sinal transmitido. Investigar como as técnicas de MAE, como o bloqueio de varredura, podem ser otimizadas para lidar com essa agilidade em frequência é fundamental para antecipar e mitigar potenciais ameaças eletrônicas em ambientes cada vez mais complexos.

REFERÊNCIAS

ADAMY, David L. **Electronic Warfare Pocket Guide**. Raleigh: Scitech Publishing Inc., 2011.

_____. **EW 104: EW Against a New Generation of Threats**. Norwood: Artech House, 2015.

_____. **Introduction to Electronic Warfare: Modeling and Simulation**. Norwood: Artech House, 2003.

Automotive Radar System Basics | Automotive Radar tutorial. **RF Wireless World**, 2012. Disponível em: <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/Automotive-radar-basics.html>. Acesso em 06 de set. 2023.

BARLOW, E. J. **Doppler radar**. In: J., B. E. (Ed.). Proceedings of Institute of Radio Engineers. [S.l.: s.n.], 1949.

BRASIL, C 34-1: **Emprego da Guerra Eletrônica**. 2. ed. Brasília, DF: EME, 2009.

_____, Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha. **GE-101: Introdução ao Contexto da Guerra Eletrônica**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2023.

_____, Comando de Operações Navais. **ComOpNav-220: Manual de Ações de Guerra Eletrônica**. Rio de Janeiro, 2018.

_____, **Doutrina Militar-Naval (EMA-305)**. Brasília: Comando da Marinha, 2017.

_____, Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica - FAB. **Guerra Eletrônica, Medidas de Ataque Eletrônico**. Brasília, DF, 2011.

CAPON, J. **High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis**. Proceedings of the IEEE, v. 57, n. 8. 1969.

CAROTENUTO, V.; DE MAIO, A. **A Clustering Approach for Jamming Environment Classification**. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Nápoles, v. 57, n. 3. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9319240>. Acesso em: 01 out 2023.

DICKE, R. **Object detection system**. US Patent 2, 1953. Disponível em: <https://revistaeletronica.fab.mil.br/index.php/spectrum/article/view/74/68>.

FENN, Alan et al. **The Development of Phased-Array Radar Technology**. Proceedings of the IEEE, v. 12, n. 2, 2000.

FERREIRA, George. **Radar 3D**. Rio de Janeiro. Revista Passadiço, (1): 3-5. (Centro de Adestramento Almirante Marques de Leão – CAAML), 2020.

GRZAN, M; COVO, P; BELAK, B. **Radar Jamming Protection - Technical Solutions**. Annals of DAAAM & Proceedings. Viena, Austria: B. Katalinic, 2011. Disponível em:

https://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/proceedings/proceedings_2011/202.pdf. Acesso em: 6 set 2023.

KRIN, H.; VIBERG, M. **Two decades of array signal processing research**. IEEE Signal Processing Magazine, v. 13, n. 4, 1996.

GODARA, L. **Application of Antenna Arrays to Mobile Communications II Beam-Forming and Direction-of-Arrival Considerations**. Proceedings of the IEEE, vol. 85, no. 8, 1997.

MAHAFZA, R; ELSHERBENI, Z. **MATLAB Simulations for Radar Systems Design**. Chapman & Hall/CRC, 2004.

NERI, Filippo. **PIRR: a Methodology for Distributed Network Management in Mobile Networks**. WSEAS Transaction on Information Science and Applications, WSEAS Press (Athens,Greece), ed. 3, vol. 5, 2008.

NERI, Filippo. **Introduction to Electronic Defense Systems**. 3. ed. Norwood: Artech House, 2018.

PRALON, L. G. **Modelagem Probabilística de Sinais em Radares de Ruído que Utilizam Pulsos Senoidais Modulados em Frequência**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2014.

RICHARDS, M et al. **Principles of Modern Radar: Basic Principles**, SciTech Publishing, Raleigh, NC, 2010.

RICHTER, R. M.; PEREIRA, T. de S. M. **Análise de desempenho de radares LPI (Low Probability of Intercept) frente a sensores passivos aeroembarcados de guerra eletrônica**. Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, [S. l.], v. 21, n. 1, p. 33–39, 2020. DOI: 10.55972/spectrum.v21i1.74. Disponível em: <https://spectrum.ita.br/index.php/spectrum/article/view/74>. Acesso em: 10 set. 2023.

ROBERDS, Richard M. **Introducing the Particle-Beam Weapon**. Air University Review, 1984.

SCHMIDT, R. **Multiple emitter location and signal parameter estimation**. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-34, n. 3. March, 1986.

SKOLNIK, M. I. **Introduction to Radar Systems**. 2nd. ed. London: McGraw Hill Inc., 1981. ISBN 0-07-057909-1.

_____. **Radar Handbook**. [S.l.]: McGraw Hill, 2008.

USA. NAVAL AIR WARFARE CENTER WEAPONS DIVISION. **Electronic Warfare and Radar Systems: Engineering Handbook**. 4ª Edição. ed. Point Mugu: NAWCWD TP 8347, 2013.

USAF, United States Air Force. **Electronic Warfare Fundamentals**. U.S.A, 2000.

_____. **U.S. Electronic Attack Aircraft**. U.S.A, Jul., 2016.

VERGARA, Sylvia Constant. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 16a ed. São Paulo: Atlas, 2016.

ZOHURI, Bahman. **Dimensional Analysis Beyond the Pi Theorem**. (English Edition) 1st ed. 2016.