

**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**

**APLICAÇÃO DE BEAMFORMING COMO TÉCNICA ANTI-JAMMING EM  
RECEPTORES ADS-B**



**1ºTen MICHEL SALVIANO RIVERA**

**Rio de Janeiro  
2023**

1ºTen MICHEL SALVIANO RIVERA

APLICAÇÃO DE BEAMFORMING COMO TÉCNICA ANTI-JAMMING EM  
RECEPTORES ADS-B

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

Orientadores:

Prof. DSc Carlos Vinicio Rodríguez Ron

CMG Adriano Pires da Cruz

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

1ºTen MICHEL SALVIANO RIVERA

APLICAÇÃO DE BEAMFORMING COMO TÉCNICA ANTI-JAMMING EM  
RECEPTORES ADS-B

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

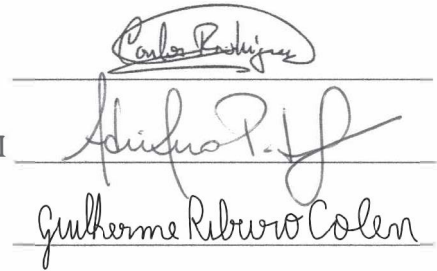
Aprovada em 21 de NOVEMBRO de 2023

Banca Examinadora:

Carlos Vinicio Rodriguez Ron, D.Sc. – PUC Rio

Capitão de Mar e Guerra Adriano Pires da Cruz – RPBOMI

Guilherme Ribeiro Colen, D.Sc. – CIAA



The image shows three handwritten signatures, each written above a horizontal line. The top signature is 'Carlos Vinicio Rodriguez Ron', the middle one is 'Adriano Pires da Cruz', and the bottom one is 'Guilherme Ribeiro Colen'.

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

Dedico este trabalho aos fiadores da minha felicidade e motivação em buscar aprimoramento pessoal: à minha esposa Patrícia, aos meus pais José Antônio e Denise e, sobretudo, a Deus, que até aqui nos ajudou.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ser o meu refúgio em todos os momentos, pela força e capacitação a mim prestadas e, sobretudo, por rodear a minha trajetória de pessoas boas.

Aos meus pais, Denise e José Antonio, reservo a minha profunda gratidão e amor incondicional. Apesar das dificuldades, nunca deixaram de entregar dedicação e cuidado. Frases proferidas como “ninguém nos tira o conhecimento” e que “sou metade sem você” representam o carinho e a disciplina que, certamente, me acompanharão por toda a vida.

Agradeço à minha amada esposa, Patrícia. Saiba que a minha grande motivação em evoluir como profissional e como pessoa reside no desejo de desfrutar contigo uma vida melhor e uma família feliz. Apesar dos desafios que a vida sempre nos reservou, tenho ao meu lado uma parceira, um ombro amigo, uma guerreira e a minha melhor amiga. Este trabalho não existiria sem a sua presença incondicional ao meu lado.

Aos meus orientadores, Professor Carlos e CMG Adriano, por todo o apoio a mim oferecidos e pela disponibilidade em guiar-me na direção sem a qual este trabalho não seria possível. Vossa sabedoria e disposição em ensinar motivaram-me a elevar o trabalho e a ser um aluno melhor.

Ao 1º Ten Rodolfo Lopes, os meus sinceros agradecimentos, por todo o apoio prestado durante o curso e por toda a troca de conhecimentos enquanto servíamos na Esquadra, que proporcionaram o desenvolvimento do tema deste trabalho.

Aos companheiros da Fragata Liberal, agradeço pela oportunidade de aprimoramento pessoal em um ambiente cercado de pessoas de grande nível de capacitação e respeito mútuo. Saibam que o tema deste trabalho foi construído em decorrência do pioneirismo do “Nosso Barco” na implementação de um receptor ADS-B embarcado.

Aos meus irmãos quase sanguíneos, 1º Ten Alex Ramos, 1º Ten Alhanati, 1º Ten Maués, 1º Ten Ian Leal, 1º Ten Phelipe Barbosa, 1º Ten Luiz Amaral e 1º Ten Fernando Melo, por todo o apoio e camaradagem compartilhados em diversos períodos de minha carreira e durante o curso. Saibam que os senhores contribuíram na realização do presente trabalho e na construção de um amigo e de um Oficial melhor.

Por fim, é fundamental ressaltar que “se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”!

*“Aquele que se empenha a resolver as dificuldades resolve-as antes que elas surjam. Aquele que se ultrapassa a vencer os inimigos triunfa antes que as suas ameaças se concretizem”.*

(TZU, [500 a.C])

# APLICAÇÃO DE BEAMFORMING COMO TÉCNICA ANTI-JAMMING EM RECEPTORES ADS-B

## RESUMO

A evolução do controle do tráfego aéreo reflete o amadurecimento da aviação ao longo do tempo. Diante das demandas crescentes por harmonização e interoperabilidade, órgãos especializados foram estabelecidos para regular e padronizar a gestão do tráfego aéreo. Nesse contexto, iniciativas inovadoras lideraram a revisão global dos sistemas de aviação e gestão do tráfego aéreo. O produto emblemático desses esforços é o sistema *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B), usado tanto na aviação civil quanto militar. Em que pesem os avanços significativos em proveito da consciência situacional no espaço aéreo, tornam-se frequentes os questionamentos acerca da susceptibilidade do ADS-B a Medidas de Ataque Eletrônico do tipo *jamming*. No âmbito militar, essas interferências exigem soluções capazes de assegurar o uso eficiente do espectro eletromagnético pela própria Força, dentre as quais se destaca o *beamforming*, pela possibilidade de otimização da diretividade de um arranjo de antenas. Diante do exposto, a presente pesquisa examinou conceitos e conduziu experimentos que pudessem fundamentar a argumentação que respondeu à questão central do estudo: em que medida o emprego de técnicas de *beamforming* em receptores ADS-B sujeitos à Medidas de Ataque Eletrônico do tipo *jamming* seriam eficientes? A metodologia utilizada foi o método dedutivo, com finalidades exploratórias, valendo-se das técnicas de pesquisa bibliográfica e experimental. Por fim, concluiu-se que há indícios de que a técnica de *beamforming* utilizando o algoritmo *Linear Constrained Minimum Variance* (LCMV) seria eficiente contra efeitos adversos causados pelo *jamming*, em virtude da manutenção do parâmetro de taxa de bits errados estatisticamente abaixo do nível correspondente ao corrompimento arbitrário de mensagens ADS-B.

**Palavras-chave:** ADS-B. Medidas de Ataque Eletrônico. *Jamming*. *Beamforming*. LCMV.

# APPLICATION OF BEAMFORMING AS ANTI-JAMMING TECHNIQUE IN ADS-B RECEIVERS

## ABSTRACT

The evolution of air traffic control reflects the maturing of aviation over time. Specialized bodies have been established to regulate and standardize air traffic management in response to increasing demands for harmonization and interoperability. In this context, innovative initiatives lead to a global review of aviation and air traffic management systems. The main product of these efforts is the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) system, used in both civil and military aviation. Despite significant advances in favor of situational awareness in airspace, questions arise about the susceptibility of ADS-B to Electronic Attack Measures such as jamming. In the military context, these interferences require solutions for the Force to use the electromagnetic spectrum efficiently. Beamforming stands out for the possibility of optimizing the directivity of an antenna array. This research studied concepts and conducted experiments to answer the central question of the study: How effective are beamforming techniques in ADS-B receivers when faced with jamming? The methodology used was the deductive method for exploratory purposes, using bibliographic and experimental research techniques. Finally, it was concluded that there is evidence that the beamforming technique using the Linear Constrained Minimum Variance (LCMV) algorithm would be efficient against adverse effects caused by jamming due to the maintenance of the wrong bit rate parameter statistically below the level corresponding to arbitrary corruption of ADS-B messages.

**Keywords:** ADS-B. Electronic Attack Measures. Jamming. Beamforming. LCMV.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: A infraestrutura NextGen e a evolução da gestão do tráfego aéreo.....	22
Figura 2: Hierarquia ADS-B .....	26
Figura 3: Quadro de resposta ADS-B.....	27
Figura 4: (a) Comunicações ADS-B ar-ar e (b) Comunicações ADS-B ar-terra .....	28
Figura 5: Espaço Aéreo sob responsabilidade do Brasil .....	30
Figura 6: Técnicas de ataque ADS-B em relação às suas camadas de protocolo.....	33
Figura 7: Técnicas de ataque ADS-B em relação a requisitos de segurança.....	33
Figura 8: Definições das subdivisões da Guerra Eletrônica .....	35
Figura 9: Categorias de soluções de segurança ADS-B e técnicas subsequentes.....	36
Figura 10: (a) arranjos lineares, (b) arranjos circulares e (c) arranjos retangulares de antenas. .....	40
Figura 11: ULA com distância de DOA igual a $\theta$ .....	42
Figura 12: Beamforming convencional: esquema simplificado .....	46
Figura 13: Beamforming adaptativo: esquema simplificado.....	47
Figura 14: Beamforming adaptativo: esquema detalhado .....	55
Figura 15: Caso zero: recepção ADS-B sem <i>jamming</i> e sem técnicas de <i>beamforming</i> .....	60
Figura 16: Caso zero: recepção ADS-B sem <i>jamming</i> e sem técnicas de <i>beamforming</i> , com limiar.....	60
Figura 17: Caso zero: recepção ADS-B com <i>jamming</i> e sem técnicas de <i>beamforming</i> .....	61
Figura 18: Caso zero: recepção ADS-B com <i>jamming</i> e sem técnicas de <i>beamforming</i> , com limiar.....	61
Figura 19: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “PS” (cenário “sinal desejado + ruído”) .....	63
Figura 20: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “PS” (cenário “sinal desejado + ruído”) com limiar.....	63
Figura 21: Gráfico Azimute x Ganho após “PS” (cenário “sinal desejado + ruído”) .....	64
Figura 22: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “PS” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> ”).....	65
Figura 23: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “PS” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> ”) com limiar.....	65
Figura 24: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> ”).....	66

Figura 25: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> ”) com limiar.....	66
Figura 26: Gráfico Azimute x Ganho após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> ”) com elevação de 10° .....	67
Figura 27: Gráfico Azimute x Ganho após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> ”) com elevação de 20° .....	67
Figura 28: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> + imprecisões de estimativa da DOA”).....	69
Figura 29: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> + imprecisões de estimativa da DOA”) com limiar.....	69
Figura 30: Gráfico Azimute x Ganho após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> + imprecisões de estimativa da DOA”) com elevação de 10° .....	70
Figura 31: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “LCMV” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> + imprecisões de estimativa da DOA”).....	71
Figura 32: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “LCMV” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> + imprecisões de estimativa da DOA”) com aplicação de limiar.....	71
Figura 33: Gráfico Azimute x Ganho após “LCMV” (cenário “sinal desejado + ruído + <i>jamming</i> + imprecisões de estimativa da DOA”) com elevação de 10° .....	72

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Comparação entre os modos de interrogação dos SSR e o ADS-B .....	25
Quadro 2: Campos do bloco de dados de uma transmissão ADS-B .....	27
Quadro 3: Compêndio de informações relevantes sobre ataques às vulnerabilidades do ADS-B .....	34
Quadro 4: Restrições típicas utilizadas no LCMV .....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros empregados nas simulações.....	59
Tabela 2: Parâmetros adicionais para o cenário “sinal desejado + ruído” .....	62
Tabela 3: Parâmetros adicionais para o cenário “sinal desejado + ruído + jamming” .....	64
Tabela 4: Parâmetros adicionais para o cenário “sinal desejado + ruído + jamming + imprecisões de estimativa da DOA” .....	68
Tabela 5: Compêndio de taxas de bits errados calculadas durante a pesquisa .....	72

## LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

1090ES	<i>Extended Squitter</i>
AA	<i>Aircraft Address</i>
ADS-B	<i>Automatic Dependent Surveillance-Broadcast</i>
ADS-R	<i>Automatic Dependent Surveillance-Rebroadcast</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
AoA	<i>Angle of Arrival</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
CA	<i>Capability</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DF <sup>1</sup>	<i>Downlink Format</i>
DF <sup>2</sup>	<i>Direction Finding</i>
DOA	<i>Direction of Arrival</i>
DoS	<i>Denial of Service</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EEM	Espectro Eletromagnético
ESPRIT	<i>Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques</i>
EUA	Estados Unidos da América
EUROCONTROL	<i>European Organisation for the Safety of Air Navigation</i>
FA	Forças Armadas
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FIR	<i>Flight Information Region</i>

FIS-B	<i>Flight Information Service-Broadcast</i>
GE	Guerra Eletrônica
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IFF	<i>Identification Friend or Foe</i>
LCMV	<i>Linear Constrained Minimum Variance</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
MAE	Medidas de Ataque Eletrônico
MAGE	Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica
ME	<i>Message</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
METAR	<i>Meteorological Aerodrome Report</i>
MMSE	<i>Minimum Mean Square Error</i>
MPE	Medidas de Proteção Eletrônica
MUSIC	<i>Multiple Signal Classification</i>
MV	<i>Minimum Variance</i>
MVDR	<i>Minimum Variance Distortionless Response</i>
NAS	<i>National Airspace System</i>
NextGen	<i>Next Generation</i>
NOTAM	<i>Notices to Airmen</i>
OTAN	Organização do Tratado do Atlântico Norte
PI	<i>Parity</i>
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i>
PS	<i>Phase Shift</i>
PSR	<i>Primary Surveillance Radar</i>

RF	Radiofrequência
RTCA-DO	<i>Radio Technical Commission for Aeronautics Standards Documents</i>
SESAR	<i>Single European Sky ATM Research</i>
SIGMET	<i>Significant Meteorological Information</i>
SINR	<i>Signal-to-interference-plus-noise ratio</i>
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
SSR	<i>Secondary Surveillance Radar</i>
TAF	<i>Terminal Aerodrome Forecast</i>
TIS-B	<i>Traffic Information Service-Broadcast</i>
UAT	<i>Universal Access Transceiver</i>
ULA	<i>Uniform Linear Array</i>
URA	<i>Uniform Rectangular Array</i>
USA	<i>United States of America</i> (o mesmo que EUA)
VANT	Veículos aéreos não-tripulados

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Atribuições dos órgãos especializados em controle do tráfego aéreo</b>	<b>20</b>
<b>2.2 NextGen e o papel do <i>Automatic Dependent Surveillance-Broadcast</i> (ADS-B)</b>	<b>21</b>
<b>2.3 <i>Automatic Dependent Surveillance-Broadcast</i> (ADS-B)</b>	<b>23</b>
2.3.1 Características básicas	23
2.3.2 Da Vigilância Primária ao ADS-B: o processo evolutivo dos sensores	24
2.3.3 Características gerais do sinal ADS-B transmitido	26
<b>2.4 Regulação do ADS-B no espaço aéreo</b>	<b>29</b>
<b>2.5 Vulnerabilidades do ADS-B</b>	<b>31</b>
<b>2.6 Medidas de Proteção Eletrônica</b>	<b>34</b>
<b>2.7 Mitigação de vulnerabilidades e as técnicas anti-<i>jamming</i></b>	<b>36</b>
<b>3 DELINEAMENTO ANTI-<i>JAMMING</i> BASEADO EM <i>BEAMFORMING</i></b>	<b>39</b>
<b>3.1 <i>Beamforming</i></b>	<b>39</b>
3.1.1 Arranjo de antenas	40
3.1.1.1 Simplificações úteis ao estudo de arranjos de antenas	41
3.1.1.2 Apresentação matemática	41
3.1.2 Matriz de <i>snapshots</i> e matriz de covariância	44
3.1.3 Tipos de <i>Beamforming</i> em função do ajuste de pesos	45
3.1.3.1 <i>Beamforming</i> convencional	46
3.1.3.2 <i>Beamforming</i> adaptativo	47
3.1.3.2.1 MVDR	49
3.1.3.2.2 LCMV	51
<b>3.2 Considerações sobre a implementação</b>	<b>53</b>
3.2.1 Escolha do arranjo e do tipo de antenas	53
3.2.2 Processamento de sinais	54
3.2.3 Algoritmos de estimação da DOA	56
3.2.4 Interface gráfica e decodificação ADS-B	56



<b>4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>58</b>
<b>4.1 Aspectos preliminares</b>	<b>58</b>
<b>4.2 Comparação dos resultados obtidos</b>	<b>62</b>
4.2.1 Primeiro caso: <i>Phase Shift</i> (PS)	62
4.2.2 Segundo caso: MVDR	66
4.2.3 Terceiro caso: LCMV	70
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A evolução do controle do tráfego aéreo é um reflexo notável do desenvolvimento da aviação ao longo do tempo. No início do século XX, a humanidade presenciava os primeiros passos da exploração dos céus, pelas aeronaves tripuladas. Esse marco histórico, embora preliminar à época, trouxe consigo a tendência irreversível de expansão do ambiente operacional aéreo. Com o aumento da quantidade de aeronaves e da complexidade das operações aéreas, surgia a necessidade inequívoca de controlar o tráfego aéreo, de forma mais segura e eficiente.

Nesse sentido, diversos órgãos especializados foram concebidos, com o intuito de sistematizar o controle do tráfego aéreo, por meio de normas e regulamentos. Essas organizações possuem competências complementares e, por vezes, desempenham papéis semelhantes nas suas respectivas jurisdições, fornecendo diretrizes técnicas, conduzindo pesquisas e facilitando a cooperação internacional em prol da evolução contínua do controle do tráfego aéreo para atender às crescentes demandas da aviação moderna.

Diante dos esforços progressivos pela harmonização e interoperabilidade, surgem iniciativas de vanguarda, a fim de liderar a revisão global do sistema de aviação e de gestão do tráfego aéreo. O sistema de comunicação e vigilância em implementação que representa a evolução do controle do tráfego aéreo recebe o nome de *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B)<sup>1</sup>, utilizado no âmbito civil e militar para fornecer informações sobre posição, velocidade, altitude e identificação de aeronaves em tempo real.

O ADS-B é caracterizado pela comunicação em radiodifusão, o que significa que as mensagens são transmitidas de forma ampla e indiscriminada, possibilitando a captura desses sinais por qualquer receptor dentro do alcance. Se por um lado essa característica provê vantagens significativas à consciência situacional no espaço aéreo, por outro lado, constitui uma vulnerabilidade, facilitando as explorações acintosas desses sinais, diante da carência de mecanismos de segurança.

Dentre as diversas modalidades de ataque, o *jamming* é uma técnica potencialmente danosa à disponibilidade do sinal de interesse, que não exige elevado grau de complexidade na sua implementação e consiste na emissão de sinais de interferência com o objetivo de perturbar ou interromper a comunicação ou o funcionamento normal de um sistema. Dessa forma, o presente trabalho analisa o resultado da aplicação da técnica *beamforming*<sup>2</sup> na otimização da

---

<sup>1</sup> ADS-B - Vigilância Dependente Automática por Radiodifusão.

<sup>2</sup> O termo *beamforming*, em tradução livre, significa formação de feixes.

diretividade por meio de um arranjo de antenas e, portanto, assegurar a detecção do sinal desejado, ainda que sob Ataques Eletrônicos do tipo *jamming*.

Ademais, a tendência de crescimento do sistema aeroviário em relação a voos, aeronaves e aeroportos demandará maior capacidade de gestão do tráfego aéreo. Essa exigência terá como consequências a redução da separação de altitudes entre as aeronaves e o fomento à utilização do ADS-B em larga escala. Diante desses desafios iminentes, faz-se mister a implementação de mecanismos de segurança que possam tornar receptores ADS-B menos susceptíveis a ações maliciosas.

Em um conflito, ser surpreendido por ataques em decorrência de uma consciência situacional deficiente pode gerar resultados catastróficos, com perdas de material e pessoal, podendo influenciar decisivamente no resultado de uma operação militar. Diante disso, existe a necessidade de utilização segura do sistema ADS-B por meios militares, de forma a prover a compilação confiável do quadro tático aéreo. Para tanto, são constantes as buscas pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas capazes de assegurar o uso eficiente do espectro eletromagnético pela própria Força.

Em face do exposto, esta pesquisa responde à seguinte questão central: em que medida o emprego de técnicas de *beamforming* em receptores ADS-B sujeitos à Medidas de Ataque Eletrônico do tipo *jamming* seriam eficientes?

A relevância desta pesquisa reside na apreciação de métodos de contraposição à possíveis interferências em receptores ADS-B, comparando diferentes modalidades do *beamforming* e analisando-as em termos de adequação ao ambiente operacional aéreo. Assim, este estudo coopera com a construção de conhecimento acerca do ADS-B e das soluções para mitigação de possíveis vulnerabilidades que afetem a disponibilidade do sinal.

Vale ressaltar que a operacionalização do ADS-B no território brasileiro tende a aumentar a capacidade de vigilância aérea no país, a exemplo do que ocorre em localidades em estágios avançados de implementação (COMAER, 2023a), resultando em incrementos na segurança no voo e na consciência situacional de pilotos e controladores, bem como de operadores e controladores aerotáticos embarcados. A fim de que esses resultados sejam plenamente alcançados, faz-se necessário o fomento à minoração das lacunas de segurança existentes.

O objeto de pesquisa é verificar o comportamento de diferentes aplicações do *beamforming* em ambientes operacionais aéreos progressivamente complexos, a partir das simulações. Nesse sentido, a pesquisa tem como proposição analisar o emprego de técnicas de *beamforming*, como medidas anti-*jamming* em receptores ADS-B.

Para tal propósito, esta pesquisa foi dividida em cinco capítulos, incluindo a introdução. Como metodologia, empregou-se o método dedutivo, com finalidades exploratórias, valendo-se das técnicas de pesquisa bibliográfica e experimental, conforme discriminado a seguir.

O capítulo dois, posterior a este capítulo introdutório, caracteriza-se pelo emprego da pesquisa bibliográfica para apresentar o compêndio de informações que possam estabelecer a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento deste trabalho. Foram descritos os aspectos básicos do ADS-B, e partindo de uma breve contextualização, foi possível enunciar as características básicas do sistema e expor sua regulação do ADS-B no espaço aéreo. Em seguida, foram apontadas as vulnerabilidades do sistema e a importância de mitigá-los sob à luz do conceito de Medidas de Proteção Eletrônica. Esse capítulo tem por objetivo específico descrever os conceitos relacionados ao ADS-B e as suas lacunas de segurança, que possam afetar a disponibilidade do sinal no receptor.

O capítulo três lança mão da pesquisa bibliográfica para descrever o conceito de *beamforming* e as suas possíveis aplicações na supressão de sinais indesejados. Posteriormente, utilizou-se da mesma técnica de pesquisa para identificar possíveis especificações dos componentes para operacionalizar o sistema em termos da proposição requerida. Esse capítulo tem por objetivo específico esboçar uma possível solução ao jamming, por meio da implementação de um sistema baseado em *beamforming*.

No quarto capítulo, utilizou-se da pesquisa experimental para analisar a possibilidade de emprego de técnicas de *beamforming* como método anti-jamming em receptores ADS-B. Os dados utilizados foram coletados e exportados para os *softwares* MATLAB 2023b e *Simulink*, cujo tratamento obedeceu aos conceitos do capítulo anterior. Por fim, os resultados obtidos foram apresentados graficamente no domínio do tempo e ratificados sob uma abordagem estatística. Esse capítulo tem por objetivo analisar os resultados da simulação do emprego de técnicas de *beamforming* nos receptores ADS-B sujeitos a Medidas de Ataque Eletrônico do tipo *jamming*.

No último capítulo, são apresentadas as considerações finais, seguidas pela resposta à questão central da pesquisa, culminando em sugestões para trabalhos futuros que possam dar continuidade ao conteúdo estudado.

A condução das pesquisas foi restrita ao domínio bibliográfico e experimental, tendo sido possível conceituar e analisar a possibilidade de utilização do *beamforming* como técnica anti-jamming em receptores ADS-B. Dessa forma, convém pontuar que o trabalho não

se propõe a obter dados concretos, a partir de investigações empíricas, mediante aplicação de testes em pesquisas de campo.

O universo da pesquisa é composto pelo receptor ADS-B submetido ao ruído térmico e às Medidas de Ataque Eletrônico do tipo *jamming*. O critério de representatividade atribuído para a determinação da amostra foi o de receptores ADS-B aplicados à ambientes operacionais progressivamente complexos. Tratam-se de elementos escolhidos em proveito da observação do desempenho de diferentes algoritmos de *beamforming* na supressão de interferências.

Os conceitos apresentados no próximo capítulo são cruciais na contextualização e no dimensionamento da temática deste trabalho. Baseado no referencial teórico apresentado, foi possível construir o conhecimento necessário ao desenvolvimento da pesquisa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O estudo sobre a supressão de interferências em receptores ADS-B se encontra intrinsecamente relacionado à compreensão do sistema de interesse. Para tanto, esta seção é composta por um compêndio de informações para estabelecer a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento deste trabalho. Considera-se fundamental o entendimento acerca da evolução do controle do tráfego aéreo, dos sensores primários e do surgimento do ADS-B como método primário de vigilância aérea. A partir dessa contextualização, é possível descrever as características gerais do sinal transmitido e as vulnerabilidades inerentes à essa tecnologia, proporcionando uma visão geral da mitigação dessas lacunas de segurança, com foco no conceito de *beamforming*.

### 2.1 Atribuições dos órgãos especializados em controle do tráfego aéreo

A evolução do controle do espaço aéreo tem sido marcada por avanços tecnológicos significativos que visam tornar o sistema mais seguro, eficiente e sustentável, frente aos desafios atuais (Aireon, 2023). Essas questões, relacionadas à necessidade de gerenciamento eficaz do crescente número de aeronaves em operação, ao desenvolvimento e popularização dos veículos aéreos não-tripulados (VANT), somadas às preocupações com a sustentabilidade e segurança cibernética, têm sido objetos de estudo de órgãos especializados, cujos papéis se mostram progressivamente importantes.

A *International Civil Aviation Organization (ICAO)*<sup>3</sup> é a agência especializada das Nações Unidas, que tem como missão estabelecer padrões e práticas recomendadas para garantir o desenvolvimento seguro e ordenado da aviação civil em escala global. Fundada em 1944, a ICAO possui competência para estabelecer padrões e regulamentações obrigatórias e recomendatórias para todos os Estados-Membros. As suas normas são adotadas pelos Estados e incorporadas nas suas regulamentações nacionais (ICAO, 2023a, 2023b).

A partir desse órgão, é possível observar o papel de agências que, seguindo os padrões globais, gerenciam o espaço aéreo nas suas jurisdições, como a *Federal Aviation Administration (FAA)*<sup>4</sup> e a *European Organisation for the Safety of Air Navigation*<sup>5</sup>

---

<sup>3</sup> ICAO - Organização da Aviação Civil Internacional.

<sup>4</sup> FAA - Administração Federal de Aviação.

<sup>5</sup> EUROCONTROL - Organização Europeia para a Segurança da Navegação Aérea.

(EUROCONTROL). A FAA é a agência governamental dos Estados Unidos da América (EUA) responsável por regular e supervisionar a aviação civil no país, certificar aeronaves e aeroportos, gerir as licenças dos pilotos, investigar acidentes aéreos, proteger o espaço aéreo e trabalhar em conjunto com organizações internacionais, como a ICAO (USA, 2023a). Uma das suas maiores atribuições tem sido a implementação da *Next Generation* (NextGen), uma iniciativa que visa modernizar o sistema de gerenciamento de tráfego aéreo nos EUA, incorporando tecnologias avançadas e conceitos operacionais mais eficientes, que serão amplamente explorados nas próximas décadas (USA, 2023d).

A EUROCONTROL, por sua vez, apresenta-se como o órgão que cumpre funções análogas à FAA no âmbito da União Europeia, com responsabilidade, inclusive, sobre a coordenação de uma iniciativa similar à NextGen (EUROCONTROL, 2023), conhecida como *Single European Sky ATM<sup>6</sup> Research* (SESAR)<sup>7</sup>. Dessa maneira, torna-se evidente a preocupação das autoridades em controlar um ambiente operacional complexo e em adequar-se à novas tendências que possam aprimorar a utilização desse ambiente.

No Brasil, as principais entidades no contexto da aviação e do controle de tráfego aéreo são o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). A ANAC é responsável pela regulamentação e fiscalização da aviação civil, quanto ao DECEA se atribui o controle do espaço aéreo, incluindo o controle de tráfego e a navegação aérea (COMAER, 2023b; BRASIL, 2023).

## 2.2 NextGen e o papel do *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B)

A *NextGen* é uma revisão global do sistema de aviação dos EUA e uma evolução da gestão do tráfego aéreo. Segundo a FAA, “é uma série de programas, portfólios, sistemas, políticas e procedimentos interligados. Ele implementa tecnologias e capacidades avançadas que melhoram drasticamente a operação do *National Airspace System* (NAS)”<sup>8:9</sup> (USA, 2020, p.7).

A abrangência da *NextGen*, no entanto, não se limita apenas ao território estadunidense: a FAA tem liderado a revisão do roteiro global de gestão do tráfego aéreo descrito no plano global de navegação aérea da ICAO. A quantidade de colaborações mútuas

---

<sup>6</sup> ATM - Gerenciamento de Tráfego Aéreo, do inglês, *Air Traffic Management*.

<sup>7</sup> SESAR - Pesquisa do Céu Único Europeu em Gerenciamento de Tráfego Aéreo.

<sup>8</sup> NAS - Sistema de Espaço Aéreo Nacional.

<sup>9</sup> No original: “[...] *it is a series of interlinked programs, portfolios, systems, policies, and procedures. It implements advanced technologies and capabilities that dramatically improve the operation of the NAS*”.

entre órgãos e países são indícios da importância dada pela comunidade aeronáutica à padronização e consolidação dessas novas tendências. O Estado de Harmonização *NextGen-SESAR* (USA, 2018a)<sup>10</sup> e as tratativas da Agência de Comércio e Desenvolvimento dos EUA com o Brasil, a China e a Índia são exemplos da busca por maior interoperabilidade de aviônicos, protocolos de comunicação e métodos operacionais (USA, 2020).

A FAA fomenta o desenvolvimento de sistemas facilitadores essenciais que melhorem as comunicações, a navegação, a vigilância, o fluxo de tráfego, a automatização do apoio à decisão e a partilha de informações. A Figura 1 mostra como a infraestrutura *NextGen* permitirá a transformação da gestão do tráfego aéreo (USA, 2020).

Como é possível inferir da Figura 1, a transição do NAS de um sistema terrestre para um sistema baseado em satélite se constitui como um dos maiores avanços tecnológicos fornecidos pela implementação da *NextGen* (USA, 2020). Ainda que fossem mais acessíveis, os sistemas de vigilância baseados em terra possuem sérias limitações relacionadas à linha de visada em terrenos montanhosos e, sobretudo, à cobertura em espaços aéreos remotos, como regiões oceânicas e polares. Assim, a implementação de sistemas globais de vigilância por meio de Satélites *Low Earth Orbit* (LEO)<sup>11</sup>, com sobreposição e redundância, têm o potencial de fornecer vigilância em áreas remotas e maior capacidade de otimização de altitudes e rotas (Aireon, 2023).

Figura 1 - A infraestrutura NextGen e a evolução da gestão do tráfego aéreo



Fonte: Adaptado e traduzido de USA (2020, p. 18).

<sup>10</sup> O Estado de Harmonização *NextGen-SESAR* é uma publicação que descreve os esforços colaborativos entre os EUA e a União Europeia no alinhamento e coordenação das suas iniciativas de modernização de gerenciamento de tráfego aéreo, bem como a busca por padrões e práticas comuns, a fim de garantir a harmonização e a interoperabilidade entre os sistemas *NextGen* e *SESAR*.

<sup>11</sup> LEO - Órbita terrestre baixa. É a trajetória na qual satélites orbitam a uma altitude entre 500 e 1.500 km da Terra. São usadas por muitos satélites de comunicação, de observação da Terra e outros tipos de satélites que operam mais próximos do planeta em comparação com órbitas mais altas, como as geostacionárias.



O principal estímulo à vigilância satelital do espaço aéreo é dado pelo amadurecimento da infraestrutura *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B). O ADS-B é uma tecnologia de comunicação e vigilância usada na aviação civil e militar para fornecer informações precisas sobre a posição, velocidade, altitude e identificação de aeronaves em tempo real. O resultado é a transmissão automática de informações para outras aeronaves e estações terrestres, melhorando a eficiência, segurança e capacidade do controle de tráfego aéreo. Ao contrário dos sistemas de vigilância predecessores, o ADS-B fornece atualizações de posição mais frequentes e precisas, permitindo um rastreamento contínuo e em tempo real das aeronaves, o que é vital para a vigilância satelital eficaz. Adicionalmente, o ADS-B pode ser integrado aos sistemas de satélite para melhorar a cobertura de vigilância, especialmente em áreas remotas onde outras formas de monitoramento podem ser limitadas (Aireon, 2023).

### **2.3 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B)**

O ADS-B, que é considerado como uma tecnologia de vigilância dependente cooperativa<sup>12</sup>, possibilita o incremento na capacidade de vigilância, ao passo que reduz custos de manutenção e instalação observados nos sistemas de vigilância antecessores (Abdulaziz *et al.*, 2015). Outro diferencial proposto pelo ADS-B é a habilitação de estações terrestres para operação em áreas outrora inimagináveis, como o espaço aéreo oceânico e áreas montanhosas (Galati *et al.*, 2002). Em prol de uma rápida adaptação aos novos paradigmas do controle do tráfego aéreo, é de extrema necessidade a compreensão do ADS-B como sistema primário de vigilância aérea em implementação global. Para tanto, faz-se mister a descrição das suas características básicas, a sua ascensão como método de vigilância, o processamento de sinais e as camadas de protocolo.

#### **2.3.1 Características básicas**

O acrônimo ADS-B facilita a sua própria distinção como tecnologia de vigilância: o termo *Automatic* deriva da capacidade de transmissão de informações sem qualquer

---

<sup>12</sup> A principal diferença entre vigilância aérea cooperativa e não-cooperativa reside no fato das aeronaves com tecnologia cooperativa transmitirem as suas posições de maneira consentida, isso é, não necessitam de nenhum mecanismo de estímulo externo, como é o caso dos radares convencionais, que fazem uso da reflexão eletromagnética (FAB, 2011).

interrogação; *Dependent*, da necessidade de contar com fontes de navegação e outros subsistemas para provimento de informações de vigilância; *Surveillance*, do provimento de informações das aeronaves pelo *Global Navigation Satellite System*<sup>13</sup> (GNSS), e *Broadcast*, do recebimento de dados por qualquer receptor ADS-B dentro do alcance (USA, 2017).

A operação do ADS-B é categorizada em duas partes distintas, conhecidas por ADS-B *OUT* e ADS-B *IN* (Strohmeier *et al.*, 2014a). Instalado nas aeronaves, o ADS-B *OUT* realiza a transmissão em *broadcast* de informações de velocidade, posição, altitude, identidade, dentre outras. O ADS-B *IN*, por sua vez, é o “braço receptor” do sistema, que permite a quaisquer usuários receber os dados transmitidos pelo ADS-B *OUT* (USA, 2017).

### 2.3.2 Da Vigilância Primária ao ADS-B: o processo evolutivo dos sensores

Vieira (2018) contextualiza que o tráfego aéreo foi tradicionalmente marcado pela simbiose entre *Primary Surveillance Radars*<sup>14</sup> (PSR) e *Secondary Surveillance Radars*<sup>15</sup> (SSR). Os PSR são sensores consagrados de detecção pela reflexão de ondas eletromagnéticas e são, sobretudo, independentes de qualquer cooperação por parte do contato de interesse. Parâmetros como distância, marcação e velocidade são obtidos pelo PSR. Os SSR, por sua vez, utilizam-se do mecanismo de interrogação para obter informações precisas de altitude, identificação ou até mesmo de problemas técnicos. A interrogação consiste no envio de mensagens pela unidade transmissora para alvos dotados de *transponders* habilitados a responder a partir dos dados codificados.

Vale ressaltar o significado dos chamados modos de interrogação, denominados em função do tipo de informações requeridas pelo interrogador. O Modo A demanda a identificação do alvo, o Modo C exige a altitude e o Modo S requisita um conjunto de informações que incluem altitude e identificação, tornando os dois primeiros modos obsoletos e hierarquicamente inferiores ao Modo S (Vieira, 2018).

Strohmeier *et al.* (2014b) lembram que, antes do ADS-B, todos os SSR eram baseados na interrogação. A necessidade de extensão desse mecanismo para além do alcance dos controladores aéreos, como forma de acompanhar o desenvolvimento da aviação mundial, deu origem ao ADS-B. O ADS-B, como tecnologia, é uma atualização dos SSR e, em termos

---

<sup>13</sup> GNSS - Sistema Global de Navegação por Satélite. Refere-se à constelação de satélites que possibilita o posicionamento em tempo real de objetos, bem como a navegação em terra ou mar.

<sup>14</sup> PSR - Radar de Vigilância Primária.

<sup>15</sup> SSR - Radar de Vigilância Secundária.

de mensagens, é uma evolução do Modo S. A diferença fundamental entre o ADS-B e o Modo S é a capacidade de transmissão em *broadcast*, sem fazer uso dos reconhecidos mecanismos de interrogação. O Quadro 1 sumariza o conteúdo apresentado neste parágrafo. Cabe salientar que o tamanho das mensagens acompanhou a evolução dos modos de interrogação. Outro aspecto relevante é relacionado à frequência: nos modos anteriores, a interrogação era feita na frequência de 1030 MHz e a resposta, na de 1090 Mhz. Na tecnologia ADS-B, a frequência de 1030 MHz não se faz mais necessária.

Quadro 1: Comparação entre os modos de interrogação dos SSR e o ADS-B

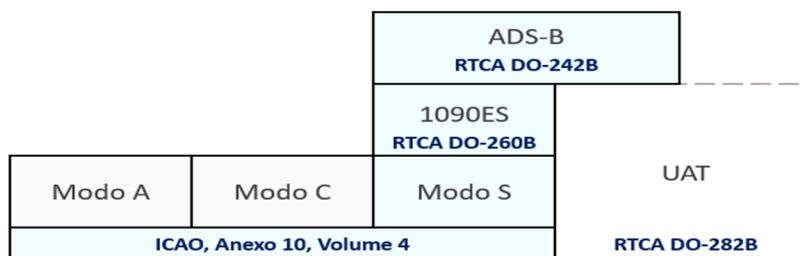
	Comprimento da mensagem	Frequências	Modo Operacional	Casos de Uso
Modo A	12 bit	1030 / 1090 MHz	Independente / Interrogação não-seletiva	Identificação
Modo C	12 bit	1030 / 1090 MHz	Independente / Interrogação não-seletiva	Altitude por pressão
Modo S	56 / 112 bit	1030 / 1090 MHz	Independente / Interrogação seletiva	Múltiplos
ADS-B / 1090ES	112 bit	1090 MHz	Dependente / Automático	Múltiplos

Fonte: Adaptado e traduzido de Strohmeier *et al.* (2014a, p.1068).

A Figura 2 apresenta a hierarquia ADS-B e os padrões de implementação<sup>16</sup> requeridos para cada modo (Strohmeier *et al.*, 2014a). Além disso, ela dá subsídios à diferenciação entre duas padronizações usadas no contexto do ADS-B: o *Universal Access Transceiver* (UAT) e o *Extended Squitter* (1090ES). O 1090ES é um formato de transmissão usado no ADS-B na faixa de 1090 MHz. É a referência das especificações técnicas do ADS-B OUT, além de ser compatível com os SSR, facilitando a integração com os sistemas de controle de tráfego aéreo. O UAT, em contrapartida, possui menor abrangência, restrito em níveis de altitudes inferiores a 18.000 pés no território estadunidense e ao espaço europeu, apenas. Opera na frequência de 978 MHz e requer a instalação de *hardware* independente (Vieira, 2018). Em que pesem suas desvantagens de incompatibilidade e abrangência, possui maior capacidade de acomodar informações adicionais sobre serviços de informações meteorológicas, por exemplo. No presente trabalho, o estudo é restrito ao padrão reconhecido em larga escala, o 1090ES.

<sup>16</sup> Os modos convencionais A, C e S possuem regras estabelecidas pela ICAO, ao passo que as *Radio Technical Commission for Aeronautics Standards Documents* (RTCA-DO), traduzido como Comissão Técnica de Rádio para Documentos de Padrões Aeronáuticos, estabelecem as padronizações requeridas dos modos mais modernos de SSR.

Figura 2: Hierarquia ADS-B



Fonte: Adaptado e traduzido de Strohmeier *et al.* (2014a, p. 1067).

### 2.3.3 Características gerais do sinal ADS-B transmitido

O ADS-B, em termos de mensagem, está encapsulado em um quadro de resposta do Modo S. No entanto, Vieira (2018) salienta a diferenciação fundamental em relação ao comportamento da transmissão, pois o ADS-B não prescinde de mecanismos de interrogação.

A transmissão ADS-B é composta por duas divisões, a saber, preâmbulo e bloco de dados. O preâmbulo é uma sequência de pulsos específicos inseridos no início de uma transmissão de dados, com o objetivo de fornecer informações para sincronização temporal, identificação de tipo de mensagem e integridade dos dados. Nesse caso, ele consiste em quatro pulsos de largura  $0,5 \mu\text{s}$ , em que o primeiro e o segundo pulsos são enviados com atraso de  $0,5 \mu\text{s}$  entre si, seguido de um espaçamento de  $2 \mu\text{s}$  até o envio do terceiro e quarto pulsos, dotados com o mesmo atraso de  $0,5 \mu\text{s}$  entre si (Vieira, 2018).

De acordo com Strohmeier *et al.* (2014a), a transmissão do bloco de dados é iniciada  $8 \mu\text{s}$  após o início do primeiro pulso do preâmbulo. A taxa de transmissão de *bits* é de 1 Mbps, utilizando modulação por posição de pulso<sup>17</sup> (PPM). O quadro de resposta ADS-B é composto por 112 *bits*, divididos em cinco campos: *downlink format* (DF), *capability* (CA), *aircraft address* (AA), *message* (ME) e *parity* (PI). O Quadro 2 propõe uma descrição de cada campo do bloco de dados ADS-B e, a partir dessas observações, é possível analisar o quadro de resposta do ADS-B baseado no Modo S, conforme mostra a Figura 3.

Outro aspecto relevante é a potência de transmissão do sinal, que varia conforme a categoria da aeronave. Segundo RTCA (2009, *apud* Francis *et al.*, 2011, p. 2), a especificação para aeronaves menores indica a potência mínima de 75W e, para aeronaves maiores, 125W ou 200W. A RTCA DO-260B também determina a potência máxima de 500W, aplicável a todas as aeronaves. Com relação às características físicas das antenas transmissoras, as aeronaves

<sup>17</sup> Do inglês, *Pulse Position Modulation*.

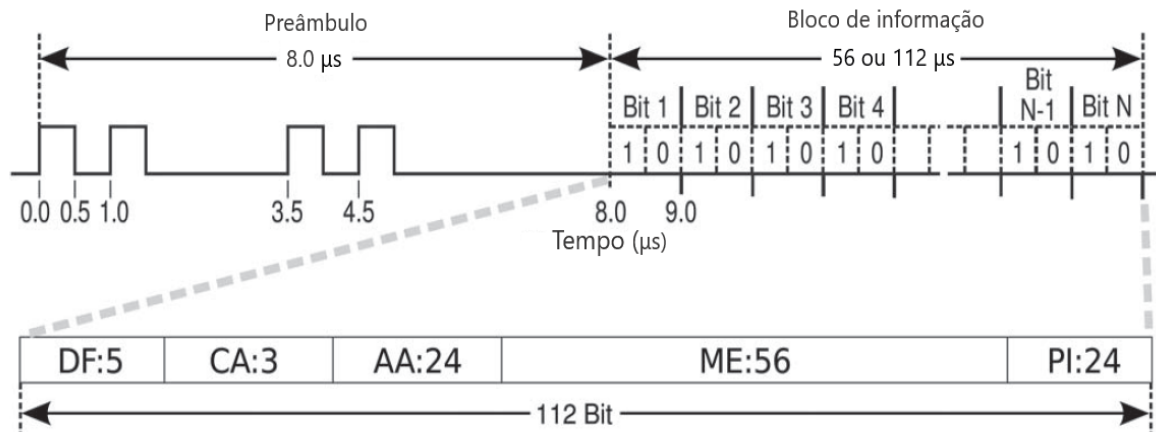
usam uma antena monopolo de quarto de onda com polarização vertical de sinais (RTCA, 2009, apud Francis et al, 2011, p. 2).

Quadro 2: Campos do bloco de dados de uma transmissão ADS-B

Campo	Número de bits	Descrição
<i>Downlink Format</i> (DF)	5	Definição do tipo de quadro. No caso do ADS-B, o downlink é igual a 17 (10001 em binário)
<i>Capability</i> (CA)	3	Envio das capacidades do transponder utilizado pela aeronave em relação à transmissão de informações
<i>Aircraft Address</i> (AA)	24	Acomodação do <i>ICAO aircraft address</i> , uma identificação única fornecida por autoridades homologadas pela ICAO
<i>Message</i> (ME)	56	Transmissão de mensagem com parâmetros definidos em DF
<i>Parity</i> (PI)	24	Verificação de integridade e detecção de possíveis erros de transmissão, pela técnica <i>Cyclic Redundancy Check</i> (CRC). Pode corrigir até 5 bits, mas qualquer mensagem com erros maiores é considerada uma mensagem corrompida e descartada

Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de informações extraídas de Strohmeier *et al.* (2014a, p. 1067-1068) e Vieira (2018, p. 32).

Figura 3: Quadro de resposta ADS-B



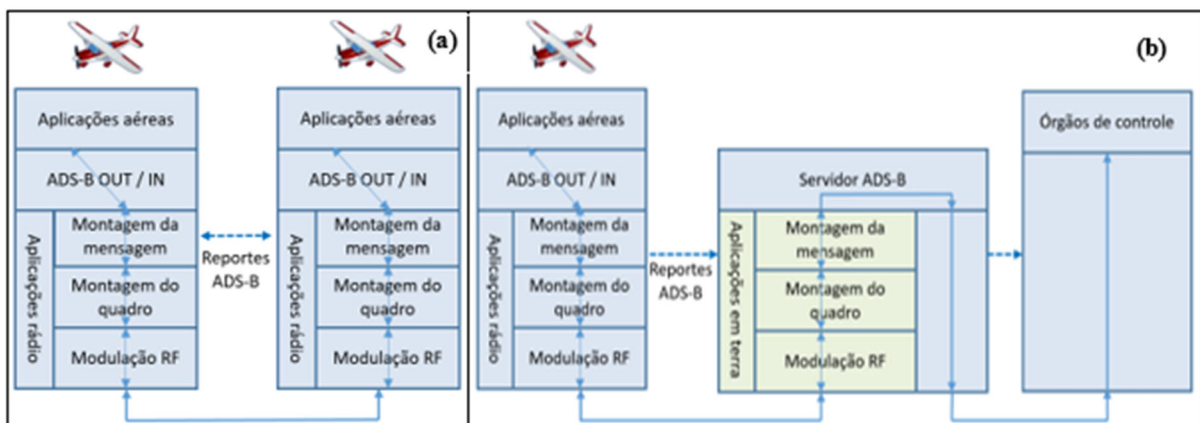
Fonte: Adaptado e traduzido de Strohmeier *et al.* (2014a, p.1068).

A modulação PPM, por sua vez, é vantajosa em ambientes com altas taxas de erros, já que o receptor precisa apenas identificar o instante de início do pulso para decodificar a informação. No entanto, ela é suscetível a ruídos e distorções temporais, que demandam atenção (Strohmeier *et al.*, 2014a).

Por fim, cabe ressaltar a divisão do ADS-B em camadas de protocolo<sup>18</sup>: há uma pequena diferenciação entre o fluxo de informações ar-ar e ar-terra, de acordo com a Figura 4. O segmento aertotransportado é composto por três camadas, a de aplicações aéreas, o ADS-B IN/OUT propriamente dito e a de aplicações rádio; ao passo que o terrestre possui três camadas análogas, a do Servidor ADS-B, aplicações em terra e a dos órgãos de controle (USA, 2018b).

As informações retiradas da camada de aplicações aéreas são preparadas para transmissão e entregues às outras camadas de aplicação. Essa tarefa é realizada na camada de aplicações rádio, que primeiro constrói as mensagens ADS-B (subcamada *message assembly*), e, em seguida, constrói o quadro que contém as mensagens ADS-B (subcamada *frame assembly*).

Figura 4: (a) Comunicações ADS-B ar-ar e (b) Comunicações ADS-B ar-terra



Fonte: Adaptado e traduzido de (USA, 2018, p. 55-56).

Os quadros construídos são modulados (subcamada *RF modulation*) e transmitidos pelo ar<sup>19</sup>. Finalmente, no receptor, os dados recebidos são demodulados e as mensagens ADS-B são extraídas e entregues à camada de aplicação. Analogamente, ocorre a mesma sequência de procedimentos na comunicação ar-terra. O servidor ADS-B em terra recebe e processa as informações ADS-B transmitidas pelas aeronaves, reunindo-as em pontos de concentração de informações, como ADS-B e Radar (USA, 2018b).

<sup>18</sup> Camadas de protocolo que se remetem a uma abordagem organizacional de projetos, cujo objetivo é representar um sistema em partes menores e gerenciáveis.

<sup>19</sup> *Message Assembly*, *Frame Assembly* e *RF Modulation* são associadas, em português, aos termos Montagem de Mensagem, Montagem de Quadro e Modulação em Radiofrequência (RF), respectivamente.

## 2.4 Regulação do ADS-B no espaço aéreo

O incremento da consciência situacional é apresentado por Strohmeier *et al.* (2014a) como um efeito crucial do emprego do ADS-B pelas aeronaves na transmissão automática de localização e intenção de movimento. Naturalmente, a harmonização e a implementação global dessa tecnologia contribuirão diretamente na sua efetividade em larga escala. Para tanto, há um visível aumento dos esforços dos Estados em prol da regulamentação do ADS-B, ainda que em diferentes estágios de concretização (Aireon, 2023).

Segundo Cerqueira (2021), os EUA se apresentam no estado da arte quanto às possibilidades do sistema. Desde 2020, encontra-se em vigor a obrigatoriedade de implantação do ADS-B por todos os usuários. Houve também uma massiva estruturação para estimular o uso dessa tecnologia, com a instalação de 650 estações terrestres, cobertura total do espaço aéreo e o fornecimento de serviços ADS-B adicionais, como *Automatic Dependent Surveillance-Rebroadcast* (ADS-R), *Traffic Information Service-Broadcast* (TIS-B) e *Flight Information Service-Broadcast* (FIS-B).

Essas funcionalidades atuam como auxílios à decisão, sobretudo, aos pilotos. O FIS-B fornece informações adicionais de voo às aeronaves equipadas com receptores ADS-B, que incluem dados meteorológicos<sup>20</sup>, a saber, *Meteorological Aerodrome Report* (METAR), *Terminal Aerodrome Forecast* (TAF), *Significant Meteorological Information* (SIGMET) e *Notices to Airmen* (NOTAM). O ADS-R, por sua vez, retransmite dados ADS-B entre aeronaves pelas estações de solo, ao passo que o TIS-B transmite informações de tráfego aéreo coletadas por essas unidades terrestres (usando radares convencionais e sistemas de vigilância ADS-B) para meios aéreos equipados com ADS-B IN, permitindo aos pilotos uma visualização completa de informações de tráfego, extensivos àqueles cuja transmissão ADS-B não foi observada (USA, 2023c; Vieira, 2018).

A União Europeia possui diretrizes muito semelhantes às estadunidenses a respeito da implementação do ADS-B em larga escala. A determinação do emprego do ADS-B por novas aeronaves se encontra em vigor desde 2020 e até junho de 2023 - todas as aeronaves deveriam estar adaptadas. Existem mais de 1.000 estações terrestres ADS-B implantadas por todo o continente europeu e, apesar dos progressivos aumentos anuais de cobertura, ainda não

---

<sup>20</sup> O METAR, TAF, SIGMET e NOTAM são tipos de informações meteorológicas, em que o METAR fornece informações meteorológicas atuais, a TAF oferece previsões futuras, a SIGMET alerta para condições meteorológicas adversas e os NOTAM informam sobre as mudanças nas condições operacionais.

abrangem a totalidade do espaço aéreo correspondente, diferentemente do que ocorre em países como EUA e Austrália, por exemplo (USA, 2023b).

O Brasil, por sua vez, encontra-se nos estágios iniciais de implementação. Segundo o Comando da Aeronáutica (2023a, p. 5),

Para que seja propiciada a visualização do tráfego aéreo no Órgão de controle de forma semelhante aos sistemas baseados em sensores Radar Secundários de Vigilância, estações de terra do sistema ADS-B (receptoras e processadores) devem ser implantadas estrategicamente para provisão do serviço de vigilância em determinado volume de espaço aéreo, assim como as aeronaves que evoluem nesse espaço aéreo devem estar equipadas com aviônicos ADS-B.

Nesse sentido, o DECEA estabeleceu um cronograma dividido em quatro fases, para cobertura acima de 24.500 pés, “segundo as prioridades estabelecidas a partir da identificação das áreas homogêneas e principais fluxos de tráfego aéreo” (COMAER, 2023a, p. 6-7). Até julho de 2024, o ADS-B deverá ser obrigatoriamente implantado em aeronaves na FIR-RE (Região de Informação de Voo Recife); até dezembro de 2025, na FIR-CW (Região de Informação de Voo Curitiba); até agosto de 2025 na FIR-BS (Região de Informação de Voo Brasília) e até maio de 2026, na FIR-AZ (Região de Informação de Voo Amazônica). A Figura 5 apresenta as áreas de abrangência de cada FIR.

Figura 5: Espaço Aéreo sob responsabilidade do Brasil



Fonte: Basseto (2023)

Outro aspecto relevante é o estabelecimento, a partir de junho de 2026, de uma infraestrutura terrestre em pleno funcionamento para atender à vigilância ADS-B e totalmente



integrada ao Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB). Assim, o sistema ADS-B de vigilância do espaço aéreo continental brasileiro será gradativamente implantado até o segundo semestre de 2026 (COMAER, 2023a).

## 2.5 Vulnerabilidades do ADS-B

A comunicação por radiodifusão é uma característica fundamental do ADS-B. Esse padrão evidencia a transmissão indiscriminada de mensagens pelos equipamentos transmissores ADS-B, ou seja, qualquer usuário dotado de um receptor ADS-B pode ter acesso a essas informações, desde que dentro do alcance (Mccallie *et al.*, 2011). Assim, observa-se um perigoso precedente: em que pese a vantagem da transmissão em tempo real, é possível que usuários quaisquer explorem as comunicações de maneira maliciosa em caso de insuficiência de mecanismos de segurança. Nesse sentido, Manesh e Kaabouch (2017) revisita os requisitos de segurança, quais sejam: *confidencialidade*, a disponibilização da mensagem ADS-B apenas a entidades autorizadas; *integridade*, a manutenibilidade do conteúdo da mensagem durante a transmissão; *disponibilidade*, o contínuo oferecimento da informação aos usuários de interesse, e *autenticação*, a capacidade do receptor de apontar a identidade da entidade transmissora a qualquer momento.

Kim, Jo e Lee (2017) enumeram diversas vantagens da tecnologia ADS-B, como maior acurácia e menor separação de altitudes aliados à maior alcance e menor ubiquidade à menor custo de implementação. No entanto, os autores expõem a falta de mecanismos adicionais que corroborem a localização da aeronave em caso de falhas, provocadas ou não, e trazem à tona preocupações sobre a confiança do atual sistema primário de vigilância radar dos EUA, cujas questões podem reduzir drasticamente a efetividade do controle de tráfego aéreo<sup>21</sup>, caso não sejam resolvidas.

Manesh e Kaabouch (2017) oferecem interpretação semelhante em relação às vulnerabilidades do ADS-B, abordando-as em função das camadas do protocolo ADS-B que elas comprometem:

As vulnerabilidades do ADS-B se originam fundamentalmente da natureza do protocolo sem fio do ADS-B e do fato que o ADS-B transmite as mensagens como textos simples não criptografados. Como resultado, como não são empregados procedimentos de segurança para proteger a transferência de dados do ADS-B, é fácil

---

<sup>21</sup> O termo *Controle de Tráfego Aéreo* se remete à sigla ATC (*Air Traffic Control*), amplamente utilizada pela comunidade científica.

para os invasores realizarem ataques cibernéticos<sup>22</sup> (Manesh; Kaabouch, 2017, p. 7, Tradução própria).

Costin e Francillon (2012), por sua vez, descrevem seis vulnerabilidades encontradas no ADS-B, relacionadas à ausência de recursos de segurança e que habilitam potenciais usuários maliciosos a obterem sucesso nos seus ataques:

- a) Ausência de autenticação, que poderia prevenir o envio e recebimento de mensagens por usuários não autorizados;
- b) Ausência de assinatura de mensagens, capazes de evitar adulteração de mensagens e prover meios de identificação do emissor;
- c) Ausência de mensagens criptografadas, que pudessem prevenir a interceptação do conteúdo das mensagens;
- d) Ausência de mecanismos *challenge-response*, a fim de resguardar-se de ataques automatizados;
- e) Ausência de identificadores *short-lived*, capazes de prover acesso ou identificação temporária a um usuário, contribuindo para a privacidade;
- f) Ausência de técnicas anti-*Denial of Service* (DoS), impedindo a eficácia de ataques direcionados aos sinais RF do ADS-B.

A exploração das lacunas de segurança do ADS-B está contida em ampla literatura. Diversos autores propõem estudos acerca das técnicas de ataque, que, geralmente, encontram-se divididas em seis categorias majoritárias, a saber:

- a) *Message Interception*: interceptação de informações de aeronaves (*eavesdropping*) pelas transmissões em *broadcast*, que não contêm mecanismos que ofereçam confidencialidade (McCallie *et al.*, 2011);
- b) *Message Jamming*: bloqueio dos canais de comunicação RF, degradando a capacidade de vigilância ou simplesmente causando completa DoS (Manesh; Kaabouch, 2017);
- c) *Message Deletion*: remoção de mensagens ADS-B legítimas, pela atenuação ou destruição da informação original ou pelo corrompimento da mensagem por envio de bits de erro ao receptor ou *spoofing* (Strohmeier *et al.*, 2014a);

---

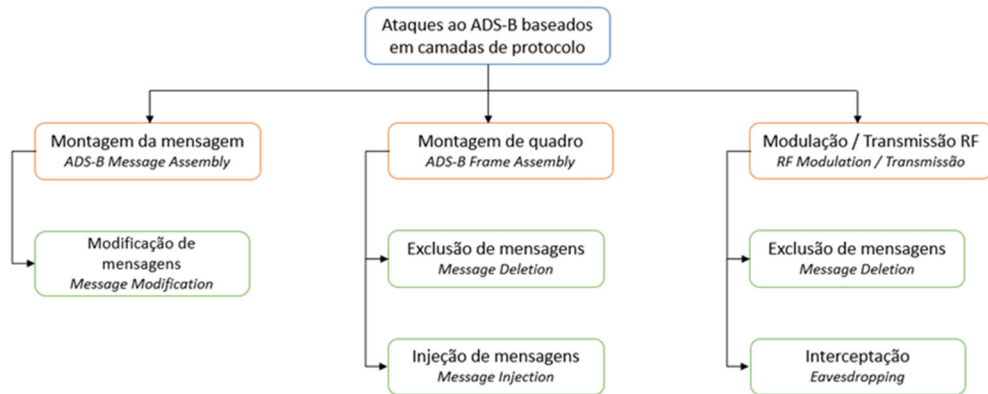
<sup>22</sup> Do original: “The vulnerabilities of ADS-B fundamentally originate from the nature of wireless protocol of ADS-B and the fact that ADS-B broadcasts the messages as unencrypted plaintexts. As a result, since no security procedures are employed to secure the ADS-B data transfer, it is easy for attackers to perform cyberattacks”.

d) *Message Modification*: modificação de mensagens ADS-B legítimas, pelo envio de sinal suficientemente forte para substituir partes da mensagem original, o *overshadowing*; ou pela inversão arbitrária de bits, o *bit-flipping* (Strohmeier *et al.*, 2014a);

e) *Message Injection*: inserção de mensagens ADS-B pseudo-legítimas, isto é, a geração de mensagens válidas de aeronaves ou estações terrestres inexistentes (Schäfer; Lenders; Martinovic, 2013)

A Figura 6, segundo Manesh e Kaabouch (2017), apresenta a classificação dos ataques de acordo com a camada do protocolo ADS-B que eles comprometem.

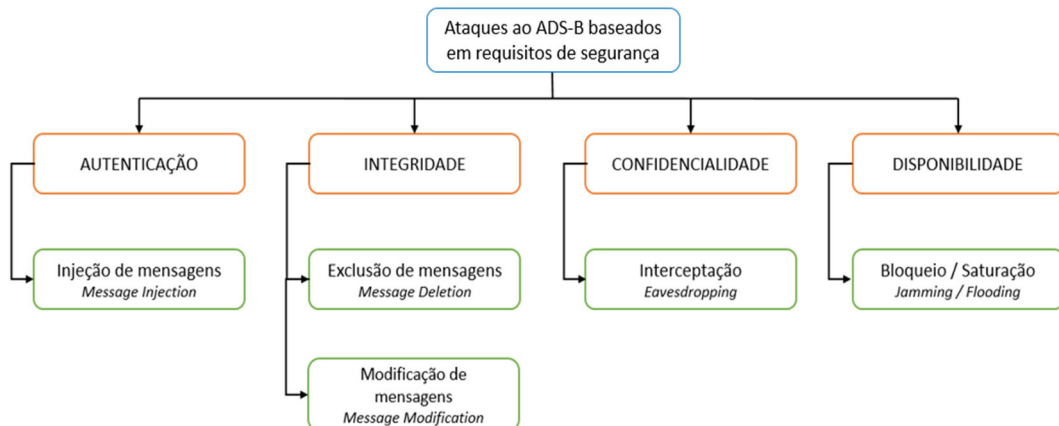
Figura 6: Técnicas de ataque ADS-B em relação às suas camadas de protocolo



Fonte: Adaptado e traduzido de Manesh e Kaabouch (2017, p. 8).

A Figura 7, por sua vez, associa os tipos de ataque aos requisitos de segurança correspondentemente degradados (Manesh; Kaabouch, 2017).

Figura 7: Técnicas de ataque ADS-B em relação a requisitos de segurança



Fonte: Adaptado e traduzido de Manesh e Kaabouch (2017, p. 9).

O Quadro 3 fornece um compêndio das principais informações analisadas neste tópico, relacionando as técnicas de ataque ao efeito desejado desses procedimentos, bem como aponta os requisitos de segurança e camadas de protocolo afetados.

Quadro 3: Compêndio de informações relevantes sobre ataques às vulnerabilidades do ADS-B

<b>Técnica de ataque</b>	<b>Efeito desejado</b>	<b>Camada</b>	<b>Requisito de segurança</b>
<i>Message Interception</i>	<i>Eavesdropping</i>	<i>RF Transmission</i>	Confidencialidade
<i>Message Jamming</i>	Negação do uso do Espectro Eletromagnético (EEM) por saturação	<i>RF Modulation</i>	Disponibilidade
<i>Message Deletion</i>	<i>Spoofing</i> Desaparecimento de contatos	<i>Frame Assembly</i>	Integridade
<i>Message Modification</i>	Modificação de trajetórias Falso alarme de ataque	<i>Message Assembly</i>	Integridade
<i>Message Injection</i>	Inserção de plataformas falsas	<i>Frame Assembly</i>	Autenticação

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de informações extraídas de McCallie, Butts e Mills (2011), Strohmeier *et al.* (2014a), Schäfer, Lenders e Martinovic (2013) e Manesh e Kaabouch (2017).

## 2.6 Medidas de Proteção Eletrônica

É possível sugerir que os desafios de prover segurança e eficiência ao espaço aéreo não seriam tão complexos caso a variável militar não se fizesse presente. Aeronaves militares, tripuladas ou não, fazem parte de um ecossistema o qual não é possível dissociá-lo da aviação civil. Aspectos como a consciência situacional, a separação de altitudes e o tráfego aéreo dependem de uma estrutura de controle integrada. No entanto, certas vulnerabilidades não poderiam sequer ser admitidas por um meio militar, como posição e intenções de movimento.

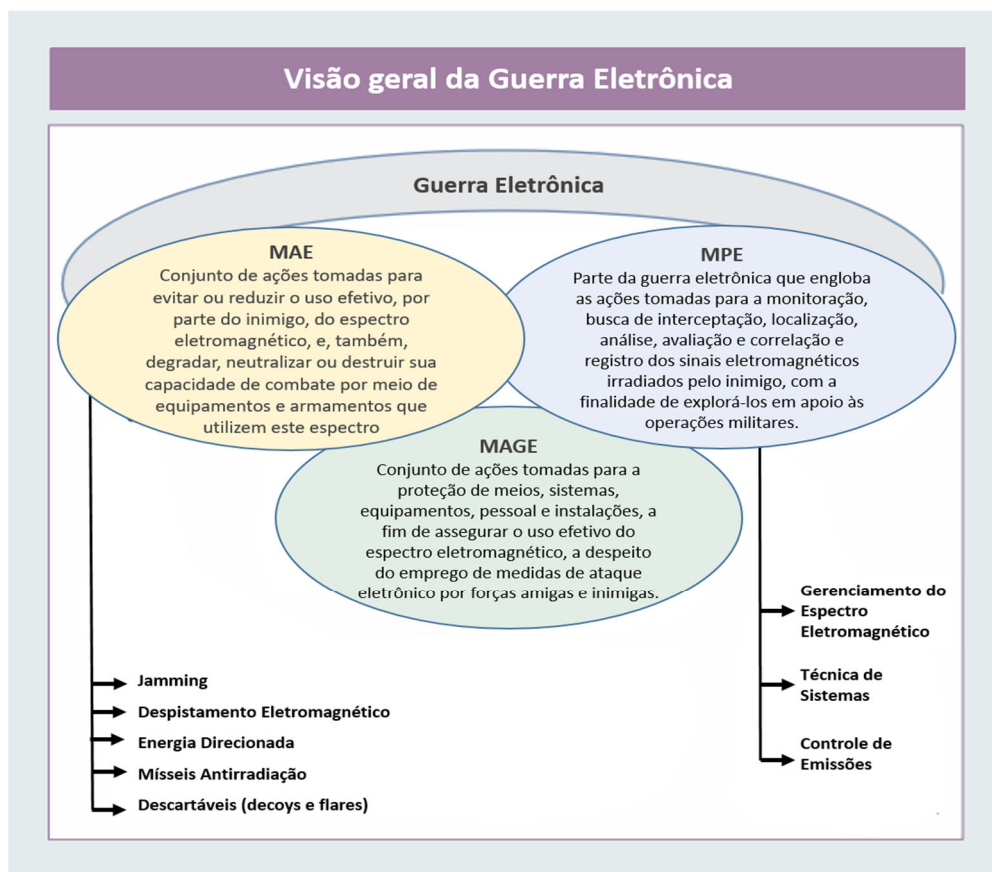
Leite Junior (2021) aponta que essa premissa militar crítica decorre da crescente importância conferida à utilização das ondas eletromagnéticas e do papel crucial assumido nas esferas estratégica, operacional e tática das ações militares, ou seja, na Guerra Eletrônica (GE) em si.

De acordo com o Glossário das Forças Armadas (BRASIL, 2015), a GE possui três subdivisões, semelhantes à terminologia empregada pela Marinha do Brasil: *Medidas de Ataque Eletrônico* (MAE), *Medidas de Proteção Eletrônica* (MPE) e *Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica* (MAGE). É possível observar, na Figura 8, um esquema detalhado acerca de cada

definição. Destaca-se a necessidade de assegurar o uso efetivo do espectro eletromagnético pela própria Força. Daí decorre a importância do controle das emissões e do gerenciamento do espectro eletromagnético, que são atividades contidas no ramo da Proteção Eletrônica.

Vale ressaltar uma diferença importante entre o conceito de Medidas de Proteção Eletrônica e as demais ramificações da GE: enquanto as MAGE e as MAE empregam sistemas dedicados em prol dos seus propósitos específicos, as MPE são, usualmente, incorporadas aos sistemas como um método de contraposição ao desenvolvimento das tecnologias utilizadas nos Ataques Eletrônicos. Dessa forma, é complexo avaliá-las de maneira isolada em relação ao conceito de Medidas de Ataque Eletrônico. Essa estreita relação entre os dois conceitos denotam o grau de importância equivalente de planejar, conduzir e avaliar medidas de proteção eletrônica em relação aos conceitos supracitados. A seção seguinte deste trabalho se apresenta como o ponto de partida dessas discussões.

Figura 8: Definições das subdivisões da Guerra Eletrônica



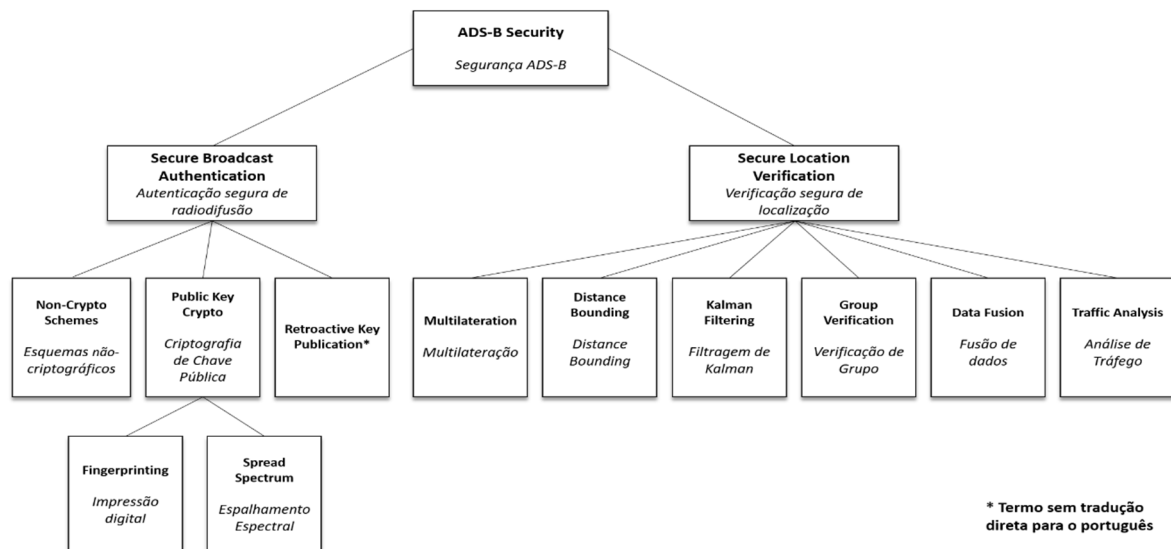
Fonte: Adaptado de BRASIL (2015, p.166).

## 2.7 Mitigação de vulnerabilidades e as técnicas anti-jamming

As etapas de conscientização do emprego global do ADS-B como método de vigilância primária a ser consolidado e de intensa difusão de estudos de apontamento das suas vulnerabilidades, formularam bases para o amadurecimento da confiabilidade dessa tecnologia. Para tanto, há uma ampla literatura sobre técnicas de sistemas que sirvam de solução aos desafios da proteção eletrônica no ADS-B.

Strohmeier *et al.* (2014a) estabelecem uma visão geral acerca dessas soluções de segurança, classificando-as, majoritariamente, em duas categorias: *Secure broadcast authentication solutions* (Soluções seguras de autenticação de transmissão) e *Secure Location Verification Systems* (Sistemas seguros de verificação da localização). A primeira aborda técnicas que visam a proteção do protocolo de transmissão e fornecem confirmação ao receptor se as mensagens recebidas são oriundas de fontes autenticadas e não foram interceptadas ou alteradas durante a transmissão; e a segunda, por sua vez, tem por objetivo a legitimação de uma suposta posição, pelo uso dos dados dos remetentes e de outros participantes do ADS-B. A Figura 9 apresenta um diagrama com as duas categorias supracitadas e as técnicas subsequentes.

Figura 9: Categorias de soluções de segurança ADS-B e técnicas subsequentes



Fonte: Adaptado e traduzido de Strohmeier *et al.* (2014a, p. 1071).

Vale ressaltar que a visão taxonômica sugerida por Strohmeier *et al.* (2014a) não esgota todas as possibilidades de mitigação dessas vulnerabilidades. Há uma tendência de aprofundamento das pesquisas desde a última década. Costin e Francillon (2012) e McCallie *et al.* (2011) são dois exemplos de estudos que, por uma visão holística de contramedidas e de

análises de custo e implementação, serviram de alerta à comunidade internacional. O resultado prático é a focalização dos estudos em soluções específicas ou um conjunto limitado delas.

Nuseibeh, Haley e Foster (2009), por sua vez, propuseram a *multilateração* para lidar com possíveis cenários de ataque; Winston e Kamal (2011) recorreram às soluções avançadas da criptografia, autenticação e *Spread Spectrum* como parte de uma possível camada de segurança ADS-B; Leonardi, Piracci e Galati (2017) desenvolveram um receptor multicanais, a fim de fornecer capacidades anti-*jamming* e de alarme de atividades maliciosas; e Naganawa *et al.* (2019), por meio da combinação dos conceitos de *beamforming* e medição de ângulos de chegada (AoA) como alternativas anti-*jamming* e anti-*spoofing*, são apenas uma pequena fração do espaço amostral de diligências realizadas em proveito do incremento de segurança no ADS-B. Por fim, Strohmeier (2016) foi capaz de oferecer uma miscelânea do estado da arte dos estudos das vulnerabilidades e das suas respectivas contramedidas.

Dentre todas as formas de suavizar a susceptibilidade do ADS-B a ataques, é compreensível, no âmbito da Proteção Eletrônica, dar enfoque ao estudo de técnicas anti-*jamming*. Em decorrência da camada de protocolo ADS-B a ser afetada, o *jamming* é uma modalidade de ataque de menor complexidade de implementação, sem a necessidade de uso de técnicas mais sofisticadas e, ainda assim, causa danos significativos à disponibilidade do sinal (Manesh; Kaabouch, 2017). A diversidade de estratégias e tipos de bloqueio também deve ser considerada, podendo ser muito eficaz como fator de ocultação de um ataque primário, por exemplo (McCallie *et al.*, 2011).

Em relação às categorias de soluções de vulnerabilidades ADS-B, a técnica *Spread Spectrum*<sup>23</sup> é uma importante técnica anti-*jamming* no âmbito da autenticação de transmissão (Manesh; Kaabouch, 2017). O seu objetivo é espalhar o sinal do transmissor em diferentes frequências ou sequências de código, a fim de dificultar a detecção e os efeitos adversos provenientes de possíveis interferências. Em contrapartida, necessita de elevado grau de sincronização entre os usuários e de severas soluções de compatibilidade com as especificações técnicas atuais do equipamento (Manesh; Kaabouch, 2017).

A comunicação militar no âmbito da OTAN recorre ao chamado Modo 5, que é uma extensão do sistema IFF (Identification Friend or Foe) e alia comunicação em radiodifusão à segurança pelo *Spread Spectrum* (Strohmeier *et al.*, 2014a). As Forças Armadas brasileiras também são agentes potencialmente interessados no incremento da capacidade de compilação

---

<sup>23</sup> *Spread Spectrum* - Espalhamento Espectral.

do tráfego aéreo, aliado à eficácia na contraposição a possíveis ataques eletrônicos. No entanto, convém buscar soluções de maior abrangência e menor complexidade de implementação.

Nesse contexto, Balasem, Tiong e Koh (2012) destacam o *beamforming*, princípio consagrado da área de processamento de sinais utilizado na otimização da diretividade de um arranjo de antenas. O *beamforming* possui ampla gama de aplicações, dentre as quais Van Trees (2002) aponta sete áreas fundamentais: radar, sonar, radioastronomia, comunicações, sismologia, medicina e radiogoniometria<sup>24</sup> (DF). Convém ressaltar que essa técnica altera somente a recepção do sinal, o que permite preservar a vantagem basilar do ADS-B de comunicação em radiodifusão, pois não modifica as características da transmissão do sinal.

Ao invés de transmitir ou receber o sinal em todas as direções, o *beamforming* permite ajustar as fases e amplitudes dos sinais transmitidos ou recebidos por várias antenas<sup>25</sup> para formar um feixe direcionado. O efeito desejado é a concentração da energia do sinal na direção de interesse enquanto minimiza a energia capturada em outras direções.

---

<sup>24</sup> Do inglês, *Direction Finding*, é um termo que se refere ao uso de instrumentos especializados, antenas e metodologias para determinar a localização física de uma fonte de energia em radiofrequência.

<sup>25</sup> Arranjos de antenas caracterizados pela habilidade de separar sinais oriundos de múltiplas fontes recebem o nome de *Smart Antenna Systems* ou sistemas de antenas inteligentes. Esse aspecto é dado pela presença de uma unidade de processamento de sinais que conferem sensibilidade espacial a essas antenas (Sallomi; Ahmed, 2015, p. 38).



### 3 DELINEAMENTO ANTI-JAMMING BASEADO EM *BEAMFORMING*

Diante da compreensão dos aspectos abordados no capítulo anterior, torna-se relevante aprofundar as discussões acerca do conceito de *beamforming* e da sua operacionalização por um sistema capaz de incorporar as valências necessárias à supressão de interferências.

Para tanto, este capítulo encontra-se dividido em duas seções. Na primeira, são discutidos os principais aspectos teóricos do *beamforming*, na segunda são descritas as características de um sistema para contrapor-se ao *jamming*.

O aprofundamento das discussões acerca do conceito de *beamforming* e da sua operacionalização constitui um estágio intermediário para a resolução da questão central desta pesquisa, a saber, em que medida o emprego de técnicas de *beamforming* em receptores ADS-B sujeitos à Medidas de Ataque Eletrônico do tipo *jamming* seriam eficientes?

Na sequência, são estudados os princípios básicos de concepção da formação de feixes, de forma que seja possível, posteriormente, empreender características adequadas à implementação de um dispositivo, que possa ser útil na supressão do *jamming*.

#### 3.1 *Beamforming*

O conceito de *beamforming*, conforme introduzido anteriormente, é digno de aprofundamento à medida que sugere incrementos significativos na capacidade de detecção seletiva por receptores. Van Trees (2002) enumera uma série de componentes que torna o sistema de formação de feixes apto a alcançar o seu efeito desejado, quais sejam: arranjo de antenas, matriz de covariância e os tipos de *beamforming*, em função do ajuste de pesos.

O arranjo de antenas compõe a base física do *beamforming*, desempenhando papel fundamental na coleta de sinais. O seu ajuste possui estreita relação com a capacidade de suprimir sinais indesejados. A matriz de covariância, por sua vez, encarrega-se de fornecer informações estatísticas entre os sinais recebidos de cada antena aos algoritmos de ajuste de pesos, descritos a seguir, e aos algoritmos de estimação da Direção de Chegada (DOA)<sup>26</sup>, apresentado na seção 3.1.2. Por fim, ao tipo de *beamforming* é atribuída a tarefa de otimizar a configuração das antenas e definir a forma como a energia do sinal é direcionada. Assim, é

---

<sup>26</sup> Do inglês, *Direction of Arrival*. Vale ressaltar que o referido termo, por vezes, é chamado de *Angle of Arrival* (AoA) ou ângulo de chegada.

compreensível pressupor uma relação estreita entre esses componentes, que precisa ser ratificada.

Por esses motivos, percebe-se a necessidade de explorar os principais aspectos e princípios de funcionamento que constam do escopo da formação de feixes.

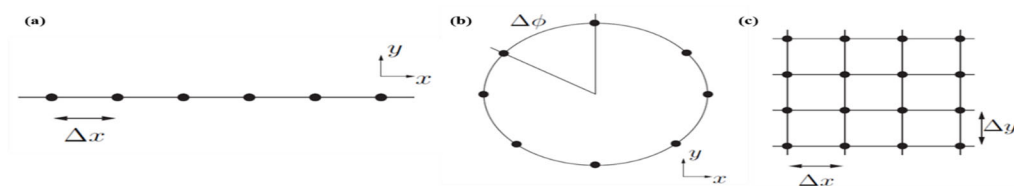
### 3.1.1 Arranjo de antenas

O conceito de *beamforming* está intrinsecamente relacionado aos projetos de antenas. Van Trees (2002) se refere aos arranjos de antenas como as estruturas responsáveis por explorar os atributos espaciais dos sinais e, assim, filtrá-los de maneira eficiente. A filtragem aproveita as características angulares coletadas para aprimorá-las pelas combinações construtivas, no caso do sinal desejado, ou destrutivas, caso contrário.

Van Trees (2002) identifica dois aspectos que determinam o desempenho dos arranjos como filtros espaciais: as ponderações complexas em cada antena e a geometria, que estabelece restrições básicas de operação.

Quanto aos pesos, a sua escolha se relaciona diretamente nas características de filtragem espacial de um arranjo. Quanto à geometria, é possível incluir grande parte dos arranjos em dois grupos: os arranjos lineares, caracterizados pela simplicidade, possuem resolução angular em apenas um componente e ocasionam a formação de cones de incerteza e de ambiguidades laterais (Van Trees, 2002), e arranjos planares, cuja distribuição bidimensional pode assumir diferentes formas, dentre as quais se destacam as circulares e as retangulares. Balanis e Ioannides (2007) apontam que, apesar de abranger todas as direções, a estrutura circular não é adequada para a realização de *beamforming* em elevação, em virtude da simetria do arranjo. As disposições retangulares, por sua vez, possuem plena capacidade de operação em azimute e em elevação e, por isso, são geometrias desejáveis em ambientes densos e dinâmicos. A Figura 10 permite visualizar diferentes configurações espaciais de antenas.

Figura 10: (a) arranjos lineares, (b) arranjos circulares e (c) arranjos retangulares de antenas



Fonte: Adaptado de Balanis e Ioannides (2007, p. 50).

### 3.1.1.1 Simplificações úteis ao estudo de arranjos de antenas

Em que pesem as suas limitações em termos de geometria, os arranjos lineares se apresentam como ferramentas didáticas acerca do comportamento das antenas e da formação dos feixes. Esse aspecto é dado em virtude de sua simplicidade e por possuir princípios físicos semelhantes aos arranjos mais complexos. Em suma, apesar de serem preteridos, na prática, por outras estruturas mais robustas, são constantemente empregados na literatura como problemas-amostra<sup>27</sup>.

Uma consideração fundamental ao projeto de um arranjo de antenas consiste no espaçamento uniforme entre os elementos, com o intuito de mitigar a possibilidade de surgimento de lóbulos laterais e assegurar a posterior recuperação dos sinais incidentes. Para tanto, é conveniente estabelecer uma separação entre as antenas de, no mínimo, metade do comprimento de onda (Li; Stoica, 2008).

Outras simplificações, segundo Balanis (2016), incluem a pressuposição de que as fontes de sinais se encontram na região de campo distante<sup>28</sup>, de modo que as ondas incidentes sejam aproximadamente planas; de que o espaçamento entre os elementos seja suficientemente pequeno, a fim de que se possa assumir que todos os sensores recebam sinais de mesma amplitude e fases diferentes; e de que os sensores sejam isotrópicos e com o mesmo padrão de irradiação, isto é, de ganho. Almeida (2015) estabelece as suposições supracitadas na tentativa de estudo do diagrama de radiação em função, exclusivamente, da geometria e da ponderação dos pesos aplicados aos arranjos, em concordância com a teoria apresentada por Van Trees (2002).

### 3.1.1.2 Apresentação matemática

A subseção anterior fornece informações úteis ao desenvolvimento matemático a seguir, que corresponde aos aspectos introdutórios ao *beamforming*, a partir da compreensão da dinâmica dos arranjos de antenas. Para tanto, a Figura 11 compreende um *Uniform Linear*

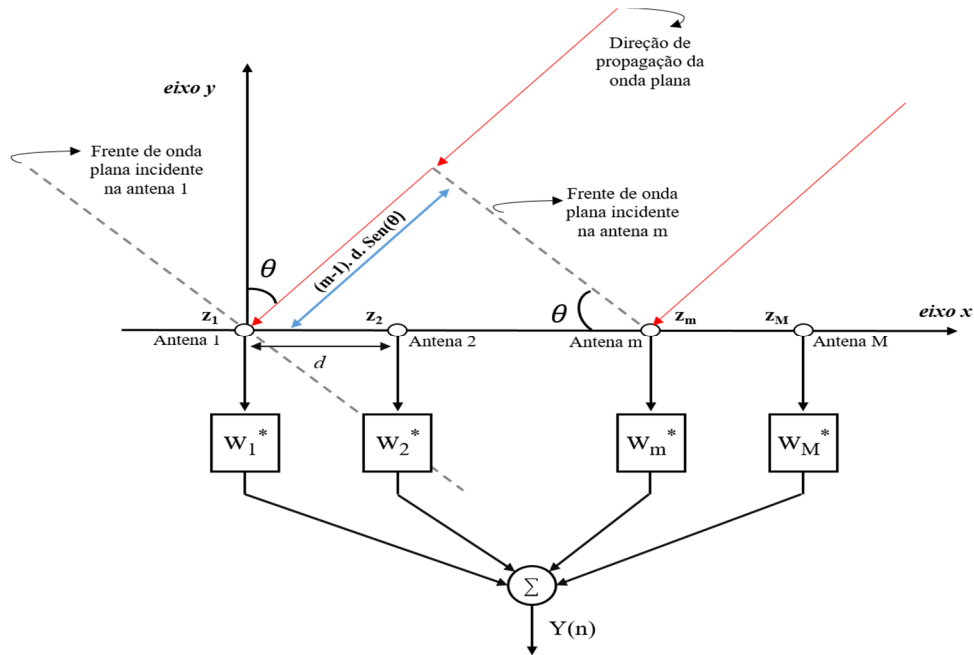
---

<sup>27</sup> Do inglês, *toy problem*, é um termo que se refere a um problema simplificado com restrições e parâmetros claros, geralmente usado como uma ferramenta para entender um problema relacionado do mundo real.

<sup>28</sup> O espaço ao redor da antena é subdividido em três regiões, a saber, de campo próximo, de *Fresnel* e de campo distante (de *Fraunhofer*). Na região de campo próximo, as características do campo eletromagnético são complexas e variam significativamente com a distância da fonte. À medida que ela aumenta, a região de campo próximo se transforma na região de campo distante, em que as propriedades do campo eletromagnético se tornam mais uniformes e obedecem a comportamentos mais previsíveis, semelhantes às ondas planas (Balanis, 2016, p. 31-33).

*Array*<sup>29</sup> (ULA), com  $M$  elementos equidistantes de uma distância  $d$ , sob a incidência de duas frentes de onda plana, com uma DOA  $\theta$ .

Figura 11: ULA com distância de DOA igual a  $\theta$



Fonte: Autoria própria (2023)

Pela Figura 11, é possível depreender que a distância entre duas frentes de ondas que chegam em dois elementos consecutivos do arranjo equivale a  $d \cdot \text{sen}(\theta)$  e que, a partir da velocidade de propagação da frente de onda no espaço livre ( $c$ ), obtém-se os atrasos temporal e de fase entre dois elementos subsequentes, respectivamente representados por (Puttini, 2006)

$$t = \frac{d \cdot \text{sen} \theta}{c} \quad (1)$$

$$\varphi = 2\pi \frac{d \cdot \text{sen} \theta}{\lambda}, \quad (2)$$

em que  $\lambda$  é o comprimento de onda recebida. Outro aspecto são os índices dos sensores do arranjo: a fim de facilitar o entendimento, a antena 1 é tomada como referência e permite a caracterização dos sinais que chegam nos sensores, em função do que incide na antena 1.

<sup>29</sup> ULA - Arranjo Linear Uniforme.

Considerando  $\varphi$  a defasagem atribuída a dois elementos subsequentes quaisquer e  $x(n)$  o sinal que incide na antena 1, então o sinal recebido pelo sensor 2 terá um fator defasado de  $x(n)$ , cuja envoltória complexa possui valor  $e^{j\varphi} x(n)$  (Puttini, 2006).

Adicionalmente, é introduzido ao sistema o *Additive White Gaussian Noise*<sup>30</sup> (AWGN), intrínseco ao meio e inserido em todos os elementos do arranjo. Assim,  $n_M(n)$  é designado como o valor do ruído referente ao  $M$ -ésimo elemento. Essas premissas, somadas à simplificação inicial de considerar um arranjo uniforme, permitem a modelagem da expressão 3, uma equação matricial expandida para o caso geral de  $K$  sinais incidentes no arranjo, oriundos de fontes distintas (Puttini, 2006):

$$\begin{bmatrix} s_1(n) \\ s_2(n) \\ \vdots \\ s_M(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ e^{j\varphi_1} & e^{j\varphi_2} & e^{j\varphi_K} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{(M-1)j\varphi_1} & e^{(M-1)j\varphi_2} & e^{(M-1)j\varphi_K} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ \vdots \\ x_K(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(n) \\ n_2(n) \\ \vdots \\ n_M(n) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

em que  $x_i(n)$  é o sinal recebido pela antena 1, proveniente da  $i$ -ésima fonte.

A fim de facilitar a representação, a equação 3 pode ser disposta na forma matricial:

$$S_M(n) = V_{MK}(\theta) \cdot X_K(n) + N_M(n), \quad (4)$$

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_K]^T, \quad (5)$$

em que letras maiúsculas representam matrizes com tamanhos delimitados pelo seu sub-índice e  $\theta$  denota a DOA da onda plana incidente. Adicionalmente, cabe ressaltar que a matriz  $V_{MK}(\theta)$  é representada em função de  $\theta$ , pois o atraso de fase  $\phi$  varia em função da DOA.

Puttini (2006) destaca que cada coluna da matriz de defasagens  $V_{MK}(\theta)$  reproduz a resposta do arranjo à determinada direção e o relacionamento da fase entre os canais. Em virtude disso, essas colunas são denominadas como vetores diretores<sup>31</sup>, que são estabelecidos em função do espaçamento entre os elementos, da DOA e da frequência. Ao atribuir  $V_M(\theta_i)$  ao vetor diretor alusivo ao sinal oriundo da  $i$ -ésima fonte, pode-se descrever a matriz de defasagens conforme

<sup>30</sup> AWGN - Ruído Aditivo Gaussiano Branco. O termo “aditivo” indica que esse tipo de ruído é adicionado ao sinal original; “gaussiano”, pois segue a distribuição de probabilidade normal, e “branco”, em virtude do ruído possuir uma distribuição de energia uniformemente distribuída em todo o espectro de frequência. O AWGN é frequentemente usado como um modelo para representar o ruído térmico e outras fontes de ruído aleatório em sistemas de comunicação e processamento de sinais.

<sup>31</sup> Do inglês, *steering vectors*.

$$V_{MK}(\theta) = [V_M(\theta_1) \quad V_M(\theta_2) \quad \dots \quad V_M(\theta_K)] \quad (6)$$

$$V_M(\theta_i) = [1 \quad e^{j\varphi_i} \quad \dots \quad e^{(M-1)j\varphi_i}]^T, \quad (7)$$

em que  $[\ ]^T$  representa o transposto de um vetor.

Por fim, o conteúdo desenvolvido nessa subseção permite modelar a equação de saída  $Y_N$  do arranjo pela combinação linear dos sinais induzidos nos elementos, em função da defasagem  $\varphi$  existente entre dois elementos subsequentes e do vetor de pesos  $W_M = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_M]^T$ , em que  $W_m$  é o peso atribuído ao  $m$ -ésimo sensor. Assim,:

$$Y(n) = W_M^H \cdot S_M(n) \quad (8)$$

$$Y_N = \sum_{i=1}^M W_i^* \cdot S_i(n) = S_1(n) \cdot \sum_{i=1}^M W_i^* \cdot e^{j(i-1)\varphi}, \quad (9)$$

em que “\*” é o operador complexo conjugado e  $H$ , o operador Hermitiano (Puttini, 2006).

Conforme Almeida (2015), o resultado prático desse compêndio de cálculos matemáticos é a possibilidade de controle do diagrama de irradiação da antena pela manipulação do vetor de pesos. Assim, o arranjo é estimulado a comportar-se como um filtro espacial, apontando a antena de maneira virtual para direções desejáveis e minimizando a influência de sinais de interferência.

### 3.1.2 Matriz de *snapshots* e matriz de covariância

Um item basilar à formação de feixes recebe o nome de matriz de *snapshots*<sup>32</sup>, que é descrita como o vetor de dados, em um determinado instante de tempo, que é resultado do processo ocorrido de amostragem em cada elemento do arranjo (Puttini, 2006). Dessa forma, a equação 4 pode ser escrita sob a forma discreta em uma equação matricial com  $N$  *snapshots* consecutivos, para um arranjo de  $M$  antenas, em que cada um desses sensores responde a um sinal de máxima amplitude oriunda de uma determinada direção  $\theta$ . Assim, tem-se

---

<sup>32</sup> O termo *snapshot*, em tradução livre, significa captura rápida. O termo é frequentemente usado em sistemas de beamforming e processamento de sinais para descrever uma única observação dos sinais que estão sendo recebidos por uma antena em um ponto no tempo.

$$\begin{bmatrix} s_1(1) & \cdots & s_1(N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_M(1) & \cdots & s_M(N) \end{bmatrix} = V_{MK}(\theta) \cdot \begin{bmatrix} x_1(1) & \cdots & x_1(N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_K(1) & \cdots & x_K(N) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(1) & \cdots & n_1(N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ n_M(1) & \cdots & n_M(N) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$S_{MN}(n) = V_{MK}(\theta) \cdot X_{KN}(n) + N_{MN}(n) \quad (11)$$

A matriz de *snapshots* fornece subsídios ao cálculo da matriz de covariância<sup>33</sup>, um conceito primordial que representa as relações estatísticas entre as amostras de sinais recebidas pelas diferentes antenas. Como é possível observar na equação 10, essa é uma matriz quadrada, cujos elementos da diagonal principal representam as autocovariâncias de cada elemento espacial, equivalente à soma das potências do sinal e do ruído.

A matriz de covariância  $R_s$  tem a forma

$$R_s = \begin{bmatrix} |X|^2 + \sigma_n^2 & |X|^2 e^{j2\pi f_0 \frac{d \text{sen}(\theta)}{c}} & \cdots & |X|^2 e^{j2\pi f_0 (M-1) \frac{d \text{sen}(\theta)}{c}} \\ |X|^2 e^{-j2\pi f_0 \frac{d \text{sen}(\theta)}{c}} & |X|^2 + \sigma_n^2 & \cdots & |X|^2 e^{j2\pi f_0 (M-2) \frac{d \text{sen}(\theta)}{c}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |X|^2 e^{-j2\pi f_0 (M-1) \frac{d \text{sen}(\theta)}{c}} & |X|^2 e^{-j2\pi f_0 (M-2) \frac{d \text{sen}(\theta)}{c}} & \cdots & |X|^2 + \sigma_n^2 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

em que  $\sigma_n^2$  é a potência do ruído. Melvin e Scheer (2013) acrescentam que os elementos fora da diagonal principal, por sua vez, contêm as informações sobre a DOA e, portanto, são esses termos da matriz que serão explorados pelo *beamforming* na formação de feixes e pelos algoritmos estimadores da DOA que, apesar de não comporem o *beamforming* em si, são essenciais na localização de sensores:

### 3.1.3 Tipos de *Beamforming* em função do ajuste de pesos

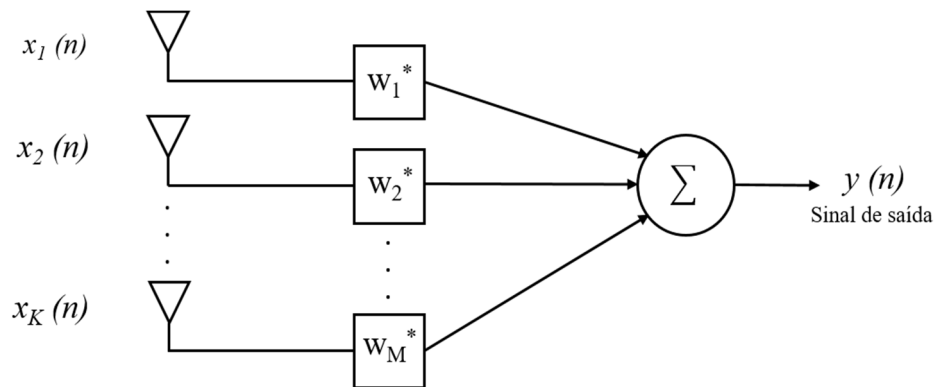
O padrão do feixe é formado pelo ajuste de pesos complexos dos elementos da antena. Esse dado, que será explorado a seguir, permite a classificação do *beamforming* em convencional ou adaptativo: o primeiro lança mão de pesos predefinidos no estudo do sinal de interesse, ao passo que o segundo possui a capacidade de variar esses coeficientes de maneira dinâmica (Mahafza, 2008). Dessa maneira, convém fornecer maior detalhamento acerca das diferentes abordagens do *beamforming*.

<sup>33</sup> A relação entre a correlação e covariância do sinal e do ruído é dada por  $k_{xn} = r_{xn} - m_x m_n$ , sendo a correlação,  $k_{xn}$ , e a covariância,  $r_{xn}$ , do sinal  $x$  e do ruído  $n$ . Quando as médias  $m_x$  e  $m_n$  são iguais a zero, é comum encontrar o conceito de matriz de covariância na literatura como matriz de correlação.

### 3.1.3.1 Beamforming convencional

O *beamforming* convencional possui uma abordagem estática e, portanto, não adaptativa. Em virtude disso, sugere-se que esse método seja aplicado em situações em que a DOA do sinal de interesse não varie com o tempo, pressupondo que haja conhecimento ou algum grau de estimativa quanto à DOA do sinal desejado. A Figura 12 exemplifica o esquema simplificado de um *beamforming* convencional, em que é possível notar que não há mecanismos de *feedback* que monitorem ou adaptem continuamente os pesos  $w$  das antenas (Sallomi; Ahmed, 2015, p. xx).

Figura 12: Beamforming convencional: esquema simplificado



Fonte: Autoria própria (2023)

Dentre as diversas formas de ajustar os pesos das antenas, Sallomi e Ahmed (2015) destacam aquelas que recorrem à matriz de covariância e levam em consideração a estatística dos sinais, como os algoritmos *Minimum Mean Square Error*<sup>34</sup> (MMSE) e *Minimum Variance*<sup>35</sup> (MV): o MMSE visa reduzir o erro médio quadrático entre o sinal recebido e o sinal desejado, referenciado pela emissão de interesse na direção estimada; o MV, por sua vez, propõe minimizar a variância do sinal combinado. Litva e Lo (1996) ressaltam, no entanto, que os algoritmos supracitados também podem ser aplicados em sistemas adaptativos, ou seja, pela característica fundamental do *beamforming* convencional, tornam-se não-adaptativos.

O presente trabalho, por ocasião das simulações, analisa a técnica conhecida por *Phase Shift Beamformer*<sup>36</sup>, dentre as essencialmente convencionais. Trata-se de uma

<sup>34</sup> MMSE - Mínimo Erro Médio Quadrático.

<sup>35</sup> MV - Mínima Variância.

<sup>36</sup> O termo *Phase Shift Beamformer*, em tradução livre, significa formador de feixes por mudança de fase.

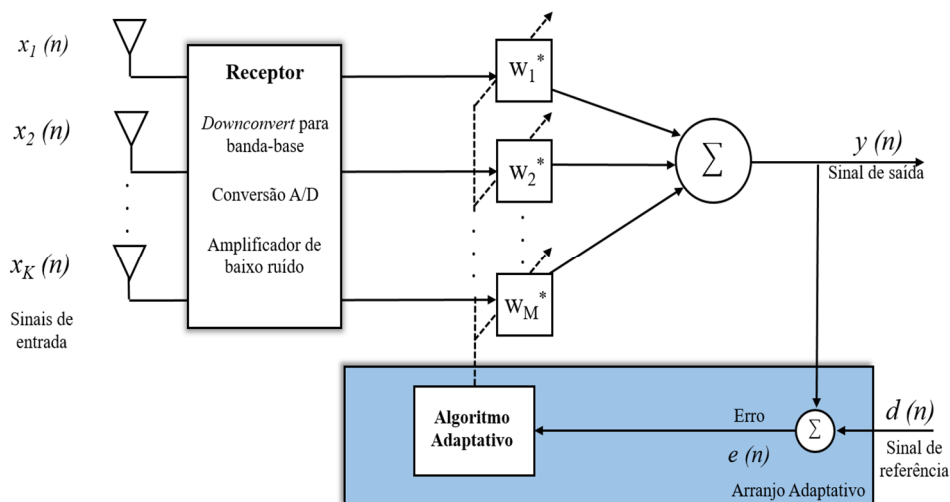


abordagem simples em que os sinais recebidos pelas antenas são ajustados em fase pelo espaçamento uniforme de antenas. Quando os sinais de todas as antenas estão sincronizados em fase na direção do sinal desejado, ocorre uma interferência construtiva na direção desejada e destrutiva em outras direções (Mucci, 1984).

### 3.1.3.2 Beamforming adaptativo

O *beamforming* adaptativo, em contraposição ao método tradicional, ajusta dinamicamente os pesos das antenas. Essa capacidade habilita esse método como sendo o mais confiável e eficaz em ambientes complexos, com interferências e DOA do sinal de interesse variáveis (Sallomi; Ahmed, 2015). A Figura 13 mostra o diagrama de um *beamforming* adaptativo, em que os algoritmos são empregados para calcular e otimizar os pesos das antenas em tempo real, de forma a maximizar o sinal desejado e minimizar interferências. Pelo esquema simplificado, nota-se que ocorre uma filtragem adaptativa, na qual a diferença entre o sinal de saída  $y(n)$  e o sinal de referência  $d(n)$  resulta no erro  $e(n)$ , que é objeto de minimização por parte dos algoritmos adaptativos (Melvin; Scheer, 2013).

Figura 13: Beamforming adaptativo: esquema simplificado



Fonte: Autoria própria (2023)

Melvin e Scheer (2013, p. 420) argumentam que o problema fundamental desses sistemas consiste na determinação de um vetor de pesos  $W_M$ , que minimize o termo interferente

sem degradar o sinal de interesse. Então, assumindo que as interferências estejam posicionadas nos ângulos  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K)$ , o cancelamento total do *jammer* será idealmente providenciado, caso  $W_M$  seja escolhido de acordo com a condição estabelecida pela equação 13:

$$W_M^H V_{MK}(\alpha_i) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (13)$$

No entanto, cabe ressaltar que a condição acima não é suficiente para garantir a preservação do sinal desejado: estimativas imprecisas da DOA do sinal desejado implicam insucesso na tarefa de supressão, induzindo o cancelamento do sinal de interesse. Dessa forma, diversos critérios estatísticos podem ser empregados pelos algoritmos adaptativos na otimização do vetor de pesos, a fim de garantir a abordagem mais adequada ao propósito do sistema (Melvin; Scheer, 2013).

A maioria dos algoritmos adaptativos se baseia na otimização do vetor de pesos pela minimização do erro quadrático médio<sup>37</sup> ou pela maximização da potência do sinal de interesse em relação à potência do ruído somado à interferência. Melvin e Scheer (2013, p. 421), ao apontarem a aplicação recorrente dos conceitos de potência e variância, reiteram a importância dos momentos de segunda ordem, explorando a utilidade dessa estatística pela imposição de uma condição inicial fundamental no estudo do *beamforming* adaptativo: atribuir média<sup>38</sup> zero aos sinais desejados e aos ruídos e interferências significa considerar que o valor esperado da potência é equivalente à variância<sup>39</sup> do sinal, bem como concerne a obter a matriz de covariância de um vetor aleatório<sup>40</sup>  $R_N = [r_1 \dots r_n]^T$  pelo valor esperado  $\mathbb{E}\{R R^T\}$ , em que  $\mathbb{E}\{\cdot\}$  representa o operador que calcula o valor esperado. Essas duas consequências decorrentes da simplificação da média servirão de grande utilidade na compreensão dos cálculos matemáticos a seguir.

Este trabalho se restringiu ao estudo dos algoritmos que foram efetivamente aplicados nas simulações, a saber, *Minimum Power Distortionless Response*<sup>41</sup> (MVDR) e *Linearly Constrained Minimum Variance*<sup>42</sup> (LCMV).

---

<sup>37</sup> Do inglês, *Minimum Square Error (MSE)*.

<sup>38</sup> O conceito de média pode ser chamado de valor esperado, esperança ou momento de primeira ordem.

<sup>39</sup> Definida por  $\sigma_r^2 = \mathbb{E}[(r - m_r)^2]$ , sendo  $m_r$  a média do vetor aleatório  $r$  (Albuquerque; Fortes; Finamore, 2008).

<sup>40</sup> Definida por  $R_s = \mathbb{E}[(r - m_r)(r - m_r)^T]$ , sendo  $m_r$  a média do vetor aleatório  $r$  (Albuquerque; Fortes; Finamore, 2008).

<sup>41</sup> MVDR - Resposta de Mínima Variância sem Distorção.

<sup>42</sup> LCMV - Mínima Variância com Restrições Lineares.

### 3.1.3.2.1 MVDR

O MVDR é um algoritmo proposto para melhorar a detecção do sinal de interesse e eliminar ruídos e interferências. Da equação 8, convém adicionar um sinal de *jamming* ao termo  $S_N$ , que representa os sinais induzidos em cada antena (Xiao *et al.*, 2023). Portanto

$$S_{M(n)} = S_{M,d(n)} + S_{M,n(n)} + S_{M,i(n)} = S_{M,d(n)} + S_{M,in(n)}, \quad (14)$$

em que  $S_{M,d(n)}$  é o sinal desejado;  $S_{M,n(n)}$  o ruído;  $S_{M,i(n)}$  a interferência; e  $S_{M,in(n)}$  é a combinação de ruído e interferência.

Analogamente às equações 10 e 12, a saída  $y$  do beamforming é escrita como:

$$y(n) = y_{d(n)} + y_{n(n)} + y_{i(n)} = y_{d(n)} + y_{i,n(n)} \quad (15)$$

Segundo Xiao *et al.* (2023), o MVDR se destina a minimizar a potência de saída da interferência e do ruído, sem causar distorções à resposta do sinal desejado. A princípio, igualar  $W_M^H$  a zero na equação 8 poderia ser considerada uma alternativa viável. No entanto, essa solução implicaria o cancelamento de todo o sinal induzido em cada antena. Assim, no intuito de minimizar exclusivamente as interferências, é necessário decompor a equação 8, em função do sinal de interesse e dos ruídos indesejáveis:

$$Y_n = W_M^H \cdot S_{M(n)} = W_M^H (S_{M,d(n)} + S_{M,in(n)}) = X_{n(n)} W_M^H a_0 + W_M^H S_{M,in(n)}, \quad (16)$$

em que  $a_0$  é o vetor diretor com um valor de norma unitária.

Da equação acima, é compreensível estabelecer que a variância da segunda parcela seja minimizada, isso é, o valor esperado da potência de saída dos sinais indesejados seria:

$$\mathbb{E} \left\{ |y_{i,n(n)}|^2 \right\} = \mathbb{E} \left\{ |W_M^H S_{M,in(n)}|^2 \right\} = \mathbb{E} \left\{ (W_M^H S_{M,in(n)}) (S_{M,in(n)}^H W_M) \right\} \quad (17)$$

Somente os termos referentes ao sinal são considerados variáveis aleatórias. Por esse motivo, retiram-se os termos referentes aos pesos do cálculo do valor esperado:

$$\mathbb{E} \left\{ |y_{i,n(n)}|^2 \right\} = \mathbb{E} \left\{ (W_M^H S_{M,in(n)}) (S_{M,in(n)}^H W_M) \right\} = W_M^H \mathbb{E} \left\{ S_{M,in(n)} S_{M,in(n)}^H \right\} W_M = W_M^H R_{i,n} W_M, \quad (18)$$

em que  $R_{i,n}$  representa a matriz de covariância de ruído e interferência.

Ainda sobre a equação 16, a primeira parcela deverá possuir ganho unitário, de modo a preservar o sinal desejado. Assim, é possível formular o problema da seguinte maneira:

$$\min_{W_{\text{MVDR}}} W_M^H R_{i,n} W_M, \text{ tal que } W_M^H a_0 = 1 \quad (19)$$

A solução desse problema pode ser resolvida pela técnica dos Multiplicadores de *Lagrange*<sup>43</sup>, de acordo com

$$J(w, \lambda) = W_M^H R_{i,n} W_M + \lambda(W_M^H a_0 - 1) + \lambda^H(W_M^H a_0 - 1) \quad (20)$$

$$\frac{\partial J(w, \lambda)}{\partial W_M^H} = R_{i,n} W_M + \lambda a_0 = 0, \quad (21)$$

em que  $\lambda$  é multiplicador de Lagrange.

A forma da solução da equação 21 é dada por

$$W_M = -\lambda R_{i,n}^{-1} a_0 \quad (22)$$

Em seguida,  $W_M$  é aplicado à restrição  $W_M^H a_0 = 1$ . Van Trees (2002) obtém o multiplicador de *Lagrange* por meio de manipulações algébricas, as quais o presente trabalho impõe algum grau de abstração, expresso por

$$\lambda = -\frac{1}{a_0^H R_{i,n}^{-1} a_0} \quad (23)$$

Por fim, é possível encontrar o vetor de pesos no MVDR (Xiao *et al.*, 2023) dado por

$$w_{\text{MVDR}} = R_{i,n}^{-1} \left( \frac{a_0}{a_0^H R_{i,n}^{-1} a_0} \right), \quad (24)$$

---

<sup>43</sup> Método matemático utilizado para maximizar ou minimizar uma função multivariável sujeita à restrição de que outra função do mesmo tipo seja igual a uma constante. É composto por várias etapas, como a criação de uma função chamada *Lagrangeana* e o cálculo dos pontos críticos.

No entanto, em determinadas situações, em virtude da característica ótima apresentada pelo MVDR, há indícios de que possa ser inviável separar a interferência do sinal desejado e, conseqüentemente, o MVDR calcula os pesos utilizando dados que englobam tanto o sinal alvo quanto a interferência. Nesse caso, se as estimativas das DOA dos sinais incidentes usadas pelos algoritmos não correspondem às direções reais dos sinais<sup>44</sup>, o MVDR tende a suprimi-lo. Isso acontece porque o MVDR considera todos os sinais, com exceção daquele na direção desejada, como interferências. Esse fenômeno é ocasionalmente referido como autoanulação do sinal<sup>45</sup>. Nesse contexto, o algoritmo LCMV pode ser mais adequado (Salem *et al.*, 2013).

### 3.1.3.2.2 LCMV

Conforme mencionado no final da subseção anterior, algumas aplicações podem ser afetadas pela rígida restrição imposta pelo MVDR, que é considerado por Manolakis, Ingle e Kogon (2005) um *beamformer* ótimo. Van Trees (2002) acrescenta que o principal problema de um caso ideal é a sensibilidade entre o ambiente de propagação e as condições impostas na concepção da formação ótima de feixes.

No entanto, é possível aplicar condicionantes adequadamente projetadas que, embora correspondam a um padrão inferior ao ótimo, não afetam a *Signal-to-interference-plus-noise ratio*<sup>46</sup> (SINR) de forma relevante e atendem aos propósitos de minimizar os sinais indesejáveis e torná-los diferenciáveis dos sinais de interesse. Esse algoritmo que possui flexibilidade na quantidade e no grau das restrições é o LCMV, que, por essas razões, é considerado uma versão generalizada do MVDR. Assim, a representação matemática ocorre de maneira análoga, com pequenas particularidades.

A determinação dos pesos segue o roteiro adotado para o caso do MVDR. Das equações 17 e 18, a única diferença diz respeito à matriz de covariância adotada: no MVDR, a matriz utilizada se refere ao binômio ruído-interferência; no LCMV essa restrição não existe, sendo possível referir-se ao sinal total induzido das equações 15 e 16.

Da equação 19 deriva a maior diferença entre os cálculos do MVDR e do LCMV: no MVDR, a fim de preservar o sinal de interesse, utiliza-se o vetor diretor na formulação das

---

<sup>44</sup> Do inglês, esse conceito é denominado por *mismatch*.

<sup>45</sup> Do inglês, *Signal Self Nulling*.

<sup>46</sup> SINR - Relação Sinal - Ruído mais Interferência.

restrições; no LCMV, por sua vez, esse vetor é substituído pela matriz de restrições (Manolakis; Ingle; Kogon, 2005), dada por

$$\min_{W_{\text{LCMV}}} W_M^H R_s W_M, \text{ tal que } C^H W_M = \delta, \quad (25)$$

em que  $C$  é a matriz de restrições e  $\delta$  corresponde ao vetor de resposta às restrições.

Assim, são enumeradas diferentes condicionantes que podem ser aplicadas pelo LCMV. O Quadro 4 aborda as restrições mais comuns, que podem ser associadas ao LCMV.

Quadro 4: Restrições típicas utilizadas no LCMV

Restrições	Observação
<i>Distortionless</i> (Sem distorções)	Equivale ao MVDR. A restrição tem por objetivo preservar o sinal de interesse
<i>Directional</i> (Direção de Chegada)	Usado para direcionar o feixe de antenas em uma direção específica, em que o sinal de interesse é esperado
<i>Null</i> (Restrições de anulação)	Elimina ou reduz drasticamente a influência de sinais indesejados que estejam vindo de direções conhecidas ou identificadas

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de informações extraídas de Van Trees (2002, p. 514-526)

As colunas da matriz de restrições são, geralmente, vetores diretores nas direções do padrão de restrições desejado. Os valores correspondentes no vetor de respostas equivalem ao padrão desejado para o feixe naquela direção. A fim de elucidar o conceito de restrições, convém fornecer um exemplo, abordado por Manolakis, Ingle e Kogon (2005): considerando a DOA  $\phi_s$  do sinal desejado, caso se deseje preservar a amplitude do sinal em um intervalo  $\phi_s \pm \Delta\phi$ , a matriz de restrições e o vetor de resposta às restrições são, respectivamente, representados por:

$$C = [V(\phi_s) \quad V(\phi_s - \Delta\phi) \quad V(\phi_s + \Delta\phi)] \quad \delta = [1 \quad 1 \quad 1]^T \quad (26)$$

Por fim, o problema de otimização das restrições poderá ser resolvido da mesma maneira que no MVDR. Dessa forma, a técnica dos multiplicadores de *Lagrange* resulta no vetor de pesos do LCMV (Melvin; Scheer, 2013) expresso por

$$w_{\text{LCMV}} = R_x^{-1} C (C^H R_x^{-1} C)^{-1} \delta \quad (27)$$

Dessa forma, nota-se o incremento de flexibilidade proporcionado pelo LCMV à medida que permite o estabelecimento de diversas condicionantes, reduzindo a possibilidade

de supressão do sinal desejado quando esse se encontra a uma DOA diferente da estimada. Tendo isso em mente, a próxima seção aborda as características de um sistema para contrapor-se ao *jamming*.

## 3.2 Considerações sobre a implementação

A partir dos conceitos apresentados anteriormente, faz-se mister aplicá-los sob um sistema que seja capaz de traduzir os algoritmos referentes ao *beamforming* em soluções viáveis na mitigação do *jamming*. Dessa forma, preliminarmente, deve haver o estabelecimento de especificações dos componentes requeridos, a fim de operacionalizá-los.

Em consequência disso, Balanis (2016) identifica a necessidade da escolha adequada de arranjos de antena em função da finalidade do sistema. Laufer (2014), por sua vez, especifica características essenciais das antenas, em função do comprimento de onda e do espaçamento entre os elementos do arranjo.

Sallomi e Ahmed (2015) descrevem a dinâmica de uma estrutura fundamental à formação de feixes, denominado de arranjo de antenas inteligentes. Laufer (2014) enfatiza a importância dos algoritmos de DOA, outro componente fulcral à eficiência do *beamforming* que, no entanto, não compõe a formação de feixes propriamente dita. Ambos convergem quanto à relevância dos dispositivos de processamento digital de sinais. Quanto à interação com o usuário<sup>47</sup> e decodificação ADS-B, em que pese a complementaridade de tais considerações apontadas por Laufer (2014), trata-se de um aspecto que não pode ser negligenciado por representar o último estágio do processamento que culmina na apresentação das informações recebidas.

Em sequência, em virtude do que foi mencionado, realiza-se uma breve descrição das características de um sistema que possa servir como contraposição eficiente ao *jamming*.

### 3.2.1 Escolha do arranjo e do tipo de antenas

A seção 3.1.1 fornece subsídios suficientes à escolha de arranjos planares de antenas em detrimento das disposições lineares para detecção de meios aéreos. Estruturas planares possuem a capacidade de distinguir objetos em azimute e em elevação, o que os credencia para

---

<sup>47</sup> Do inglês, *front-end*, é um termo usado em várias áreas da tecnologia para se referir à parte inicial ou à interface de um sistema, aplicativo ou dispositivo.

operação em ambientes dinâmicos (Balanis; Ioannides, 2007). Dentre essas estruturas, opta-se pela geometria retangular em relação à circular pelo melhor desempenho em elevação oferecido pelos *Uniform Rectangular Arrays*<sup>48</sup> (URA).

Balanis e Ioannides (2007) também sugerem que os arranjos devem conter uma quantidade estritamente necessária de componentes pois, caso contrário, o único efeito seria o aumento da complexidade nas unidades de processamento, sem qualquer incremento adicional ao desempenho da tarefa de formação de feixes.

Outro aspecto importante diz respeito ao espaçamento das antenas: Li e Stoica (2008) sugerem o espaçamento uniforme entre elas, cuja distância não seja inferior à metade do comprimento de onda. Para o caso de um sinal de 1090 MHz, deve ser superior a 13,75 centímetros. Por fim, em virtude das características das antenas transmissoras, Laufer (2014) recomenda o uso de antenas de polarização vertical como *Quarter Wave Monopole Ground Plane*, *J-Pole*, *Vertical Dipole* ou *Collinear*<sup>49</sup>.

### 3.2.2 Processamento de sinais

Convém revisitar e ampliar o conceito de arranjo de antenas inteligentes: pela Figura 13, obteve-se uma visão simplificada acerca do braço adaptativo do *beamforming*; a Figura 14, no entanto, concede uma percepção mais detalhada, apropriada ao correto dimensionamento do processamento de sinais relativo à formação adaptativa de feixes. Dessa forma, é possível notar o incremento de dois conceitos fundamentais à operacionalização do *beamforming*, até então isolados da discussão: Processadores Digitais de Sinais (DSP)<sup>50</sup> e os algoritmos de estimação da DOA.

Segundo Balanis (2016), o termo “inteligente” conferido a algumas antenas se deve ao fato de que elas são capazes de coletar informações e processá-las de forma a obter sensibilidade espacial. A vantagem evolutiva dessas antenas é dada pela aplicação de algoritmos processados pelo dispositivo DSP, cujos objetivos, conforme acrescentado por Balanis (2016), são o cálculo da matriz de covariância, a estimação da direção de chegada e o ajuste de pesos das antenas. Essas importantes características reproduzem a exigência por esse

---

<sup>48</sup> URA - Arranjo Retangular Uniforme.

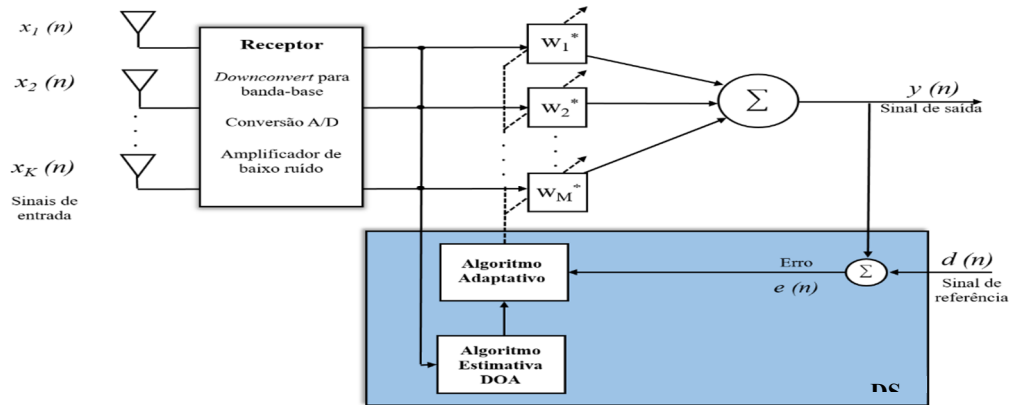
<sup>49</sup> Do inglês, monopolo de um quarto de onda com plano de terra, dipolo em J, dipolo vertical e antenas colineares, respectivamente.

<sup>50</sup> Do inglês, *Digital Signal Processor*.



dispositivo especializado no processamento avançado de sinais na implementação de um sistema anti-jamming.

Figura 14: Beamforming adaptativo: esquema detalhado



Fonte: Autoria própria (2023)

Conforme ilustrado na Figura 14, é possível atestar que os sinais de entrada passam pelo arranjo de antenas e, no receptor, passam pela conversão<sup>51</sup> à banda-base<sup>52</sup>, pela amplificação do sinal às custas de um incremento de ruído térmico e pela conversão analógico/digital<sup>53</sup>. Com a digitalização do sinal, expandem-se as possibilidades de processamento do sinal, em que no DSP, é possível lançar mão das amostras digitais e empregá-las estatisticamente, pela matriz de covariância, na estimativa da DOA e no posterior ajuste dos pesos das antenas utilizando algoritmos adequados.

Nesse contexto, compreende-se que o entendimento geral do sistema é de suma importância em uma eventual aplicação anti-jamming, a despeito da presença de conceitos fundamentais ao desempenho satisfatório da formação de feixes que não fazem parte da técnica propriamente dita. A fim de arrematar a teoria considerada indispensável apresentada nesta seção, é necessário tecer breves considerações sobre como a DOA é estimada.

<sup>51</sup> Do inglês, *downconvert*, é o processo de converter um sinal de frequência mais alta em uma frequência mais baixa. O downconvert é útil em sistemas de comunicação, porque permite que os sinais sejam processados em frequências mais baixas, o que facilita a filtragem, a demodulação e o processamento dos dados. Também ajuda a reduzir interferências e aumentar a eficiência do sistema.

<sup>52</sup> Do inglês, *baseband*, é a faixa de frequências que contém o sinal original.

<sup>53</sup> Também conhecido como *Conversor A/D*.

### 3.2.3 Algoritmos de estimação da DOA

Os algoritmos de estimação da DOA podem ser categorizados em quatro métodos baseados na análise e implementação dos dados, quais sejam: convencional, que são os algoritmos mais simples e diretos para estimar a DOA, porém inadequados para operações com várias fontes ou ambientes complexos; de Máxima Verossimilhança, que visam encontrar a direção de chegada que maximiza a probabilidade de observar os sinais medidos, mas demandam grande esforço computacional; baseados em subespaço<sup>54</sup>, que exploram as propriedades dos espaços vetoriais independentes dentro de um espaço vetorial maior; e os métodos integrados, que combinam várias técnicas e abordagens para obter estimativas mais precisas (Balanis, 2016).

Com relação às categorias supracitadas, destacam-se os algoritmos baseados em subespaço, dentre os quais é possível citar o *Multiple Signal Classification* (MUSIC), o *Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques* (ESPRIT) - que demanda menos recursos computacionais e de armazenamento de dados, não envolve busca exaustiva de todos os vetores diretores possíveis para calcular a DOA e não requer calibragem da antena, ao contrário do MUSIC. No geral, no que concerne à adequabilidade em ambientes dinâmicos, Balanis (2016) considera essa classe de algoritmos uma boa alternativa aos robustos algoritmos de Máxima Verossimilhança, sobretudo o ESPRIT e a evolução do MUSIC, denominado *Root-MUSIC*, que se difere da sua versão antecessora pela forma como o subespaço dos sinais de interesse é explorado.

A descrição detalhada sobre cada um dos algoritmos mencionados, incluindo princípios de funcionamento e adequação pode ser estudada pelas obras de Balanis (2016) e Van Trees (2002).

### 3.2.4 Interface gráfica e decodificação ADS-B

*Softwares* básicos de recepção e decodificação ADS-B são requeridos para a tarefa de rastreamento e monitoramento de aeronaves. Ainda que não possuam influência no

---

<sup>54</sup> Conceito importante na matemática, que descreve conjuntos de vetores ou funções que têm propriedades específicas e que podem ser tratados como espaços vetoriais independentes dentro de um espaço vetorial maior. Eles desempenham um papel fundamental na representação e análise de dados, sistemas e estruturas em várias disciplinas.

*beamforming* em si, são esses programas que decodificam os sinais recebidos, convertendo-os em informações compreensíveis, conforme apresentado na seção 2.3.3. Tratam-se de *softwares* de fácil instalação e manuseio, dentre os quais Laufer (2014) menciona o *dump1090* como o que apresenta melhor desempenho; o *ADSB#*, que é caracterizado pela facilidade de uso; e o *RTL1090*, por ser uma alternativa intermediária em termos de performance e simplicidade.

Adicionalmente, também são requeridos aplicativos de apresentação gráfica dos dados recebidos e decodificados, tais como o *Virtual Radar Server*, o *ADSBScope* e o *PlanePlotter*.

Em face do exposto, considera-se que a investigação realizada até esta etapa forneceu subsídios suficientes à condução de simulações que visam responder à questão central desta pesquisa. Para tanto, a descrição e a análise dos resultados são descritas no próximo capítulo.

## 4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No capítulo anterior, foram realizadas discussões acerca do conceito de *beamforming* e da sua operacionalização por um sistema capaz de incorporar as valências necessárias à supressão de interferências. No atual, são analisados os resultados das simulações, a fim de que seja determinado em que medida o emprego de técnicas de *beamforming* em receptores ADS-B sujeitos à Medidas de Ataque Eletrônico do tipo *jamming* seriam eficientes.

A primeira seção apresenta os parâmetros gerais a serem utilizados no decorrer do capítulo, bem como é descrito o “caso zero”<sup>55</sup> das simulações. A segunda seção, por sua vez, analisa o desempenho da técnica *Phase Shift Beamformer* e dos algoritmos adaptativos MVDR e LCMV em ambientes progressivamente complexos.

Na sequência, são realizadas considerações preliminares referentes à modelagem do sistema, para que seja possível, posteriormente, padronizar os critérios de análise e simulação.

### 4.1 Descrição da modelagem

Esta seção antecipa dois questionamentos importantes. O primeiro se remete às simulações: quais são os parâmetros fixos utilizados em todos os cenários? O segundo, por sua vez, diz respeito ao sinal recebido sem a aplicação das técnicas de *beamforming*: como se dá essa recepção em função da presença ou não de *jamming*? As respostas são descritas a seguir.

Os três ambientes operacionais que serão explorados são modelados em função de uma base de parâmetros comuns, acrescentados das particularidades impostas em cada caso de uso, que são descritas nas subseções correspondentes. Para tanto, a Tabela 1 apresenta os parâmetros estabelecidos para toda a bateria de simulações.

Outro aspecto importante diz respeito ao escopo das simulações: em que pesem os papéis fundamentais dos algoritmos de DOA e da matriz de covariância no desempenho do *beamforming*, a modelagem do sistema se limita a subsidiar o estudo do comportamento dos algoritmos de formação de feixes propriamente ditos. Por esse motivo, a DOA é estipulada de forma arbitrária nos três cenários, sem prejuízos ao cumprimento dos objetivos deste trabalho.

Adicionalmente, esta simulação não abrangeu a conversão A/D no receptor. Dessa forma, os gráficos apresentam uma comparação entre o sinal que se deseja demodular, simulado

---

<sup>55</sup> Situação em que o sistema ou o algoritmo é testado ou avaliado em seu estado mais simples, geralmente com valores mínimos ou nulos.

na entrada do receptor, e o sinal demodulado obtido após a atuação dos algoritmos de *beamforming*.

Diante do exposto, destaca-se a grande utilidade dos *softwares*<sup>56</sup> MATLAB e *Simulink*, amplamente utilizados em diversos campos, incluindo engenharia, ciência, pesquisa acadêmica e indústrias para tarefas de modelagem, simulação, análise e desenvolvimento de sistemas. Enquanto o MATLAB é um ambiente de computação numérica de alto desempenho, o *Simulink* é uma extensão do MATLAB que se concentra na modelagem e simulação de sistemas dinâmicos e controle.

Tabela 1 - Parâmetros empregados nas simulações

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
Frequência da portadora	1090 MHz
Frequência do pulso	18 kHz
Taxa de amostragem	2 MHz
Arranjo de antenas	URA [5x5]
Espaçamento entre elementos consecutivos	0,5 comprimento de onda
Potência de transmissão do sinal desejado	500 W
Potência do ruído térmico	0,5 W
Meio de propagação	Espaço livre

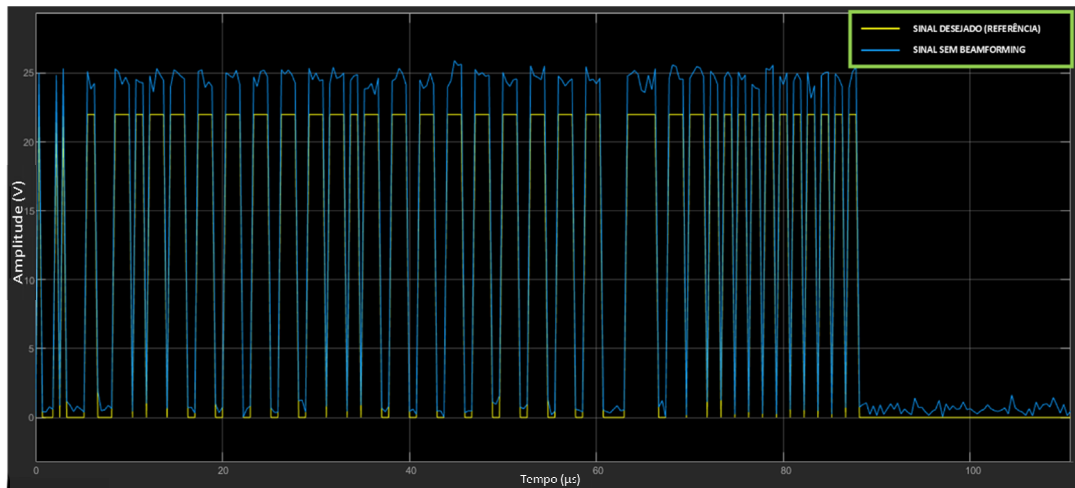
Fonte: Autoria própria (2023)

O ambiente de simulação no *software Simulink*, diante de quaisquer particularidades, encontra-se apto a fornecer informações acerca do sinal desejado, em amarelo; do sinal obtido após o emprego das técnicas de *beamforming*, em azul; da capacidade de reconstrução do sinal pelo estabelecimento de um threshold de amplitude, também em azul, porém em formato digital; e da porcentagem de bits errados, pelos comandos do *software* MATLAB. Outra representação é o gráfico do ganho em função do azimute, o que possibilita entender o comportamento do *beamforming* nas direções de interesse, quais sejam: DOA do *jamming* e do sinal desejado.

<sup>56</sup> Produtos desenvolvidos pela empresa de software de engenharia e matemática *MathWorks*.

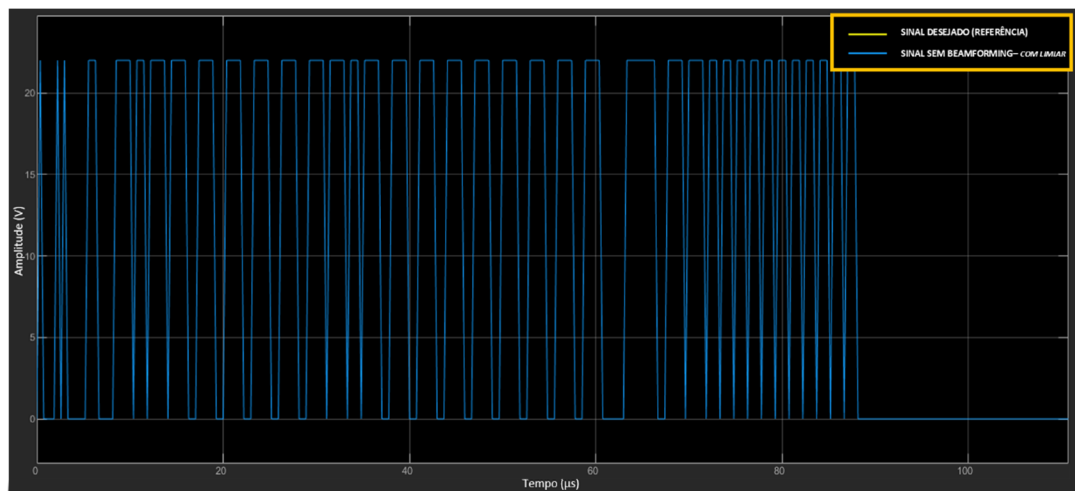
Nesse sentido, cabe mencionar o “caso zero”, a fim de contextualizar o emprego das técnicas de *beamforming* como métodos anti-*jamming* pela visualização das Figuras 15 a 18.

Figura 15: Caso zero: recepção ADS-B sem *jamming* e sem técnicas de *beamforming*



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 16: Caso zero: recepção ADS-B sem *jamming* e sem técnicas de *beamforming*, com limiar

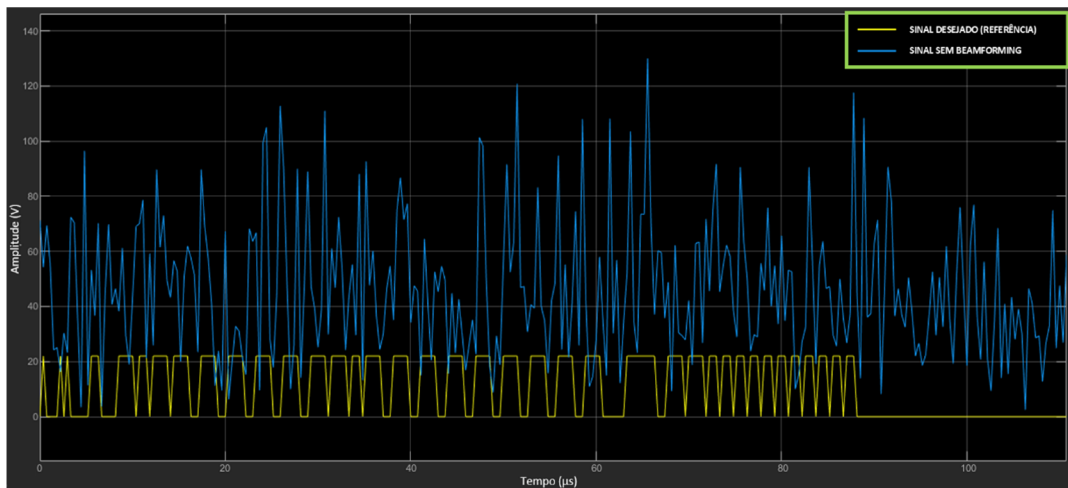


Fonte: Autoria própria (2023)

As Figuras 15 e 16 representam os gráficos anteriores e posteriores à quantização do sinal para o caso de recepção ADS-B sem o uso de técnicas de *beamforming* e sem a presença de interferências. Percebe-se que o sinal reconstruído demonstra ser fiel ao original, com uma taxa calculada de 0% de bits errados. No entanto, é possível inferir que se trata de um caso

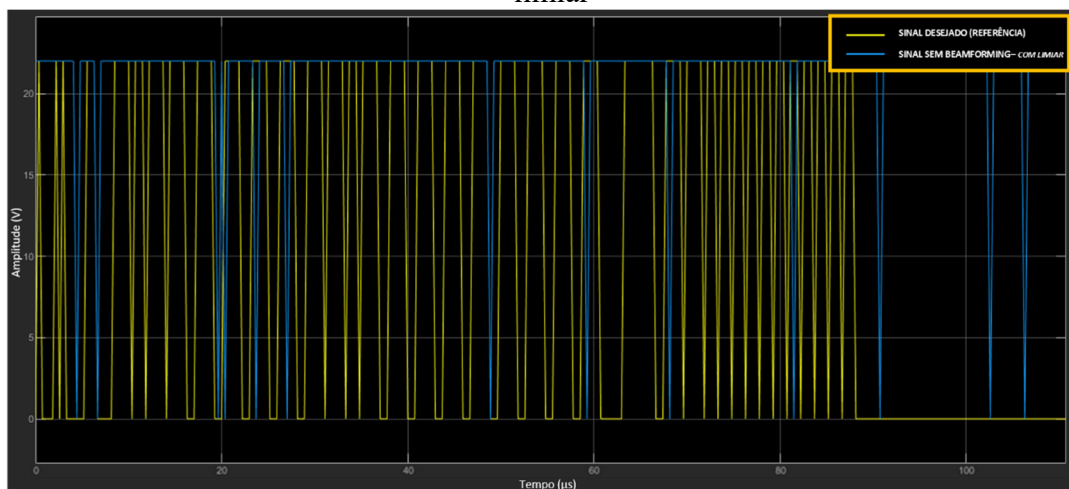
difícilmente aplicado na realidade, tendo em vista que a simulação está sendo realizada no espaço livre e com a ausência de efeitos ambientais que reduzam a relação sinal-ruído.

Figura 17: Caso zero: recepção ADS-B com *jamming* e sem técnicas de *beamforming*



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 18: Caso zero: recepção ADS-B com *jamming* e sem técnicas de *beamforming*, com limiar



Fonte: Autoria própria (2023)

As Figuras 17 e 18, por sua vez, reproduzem uma situação nas quais interferências de 1 kW foram adicionadas, ocorrendo um incremento da taxa de bits errados para 48,32%. Esse dado indica saturação do sinal recebido, o que torna o valor calculado incompatível em termos da informação propriamente dita.

Conclui-se que a ausência de técnicas de *beamforming* confere incertezas quanto à eficácia da recepção de sinais ADS-B, pois o incremento de interferências ao ambiente compromete a recuperação do sinal desejado. Reitera-se, dessa forma, que os aspectos apresentados reforçam a importância de responder à questão central a partir da próxima seção.

## 4.2 Comparação dos resultados obtidos

Nesta seção, ocorre a análise do desempenho dos algoritmos de beamforming na supressão de interferências em ambientes progressivamente complexos. O primeiro cenário emprega a técnica Phase Shift beamformer; o segundo, mais elaborado, utiliza o algoritmo MVDR; e o último analisa o desempenho do algoritmo LCMV em situações nas quais não é possível realizar a determinação precisa da DOA do sinal desejado.

### 4.2.1 Primeiro caso: *Phase Shift* (PS)

Conforme visto anteriormente, sugere-se que um sistema de recepção ADS-B necessite de mecanismos capazes de incrementar a qualidade da reconstrução do sinal. Para tanto, recorre-se à técnica *Phase Shift* de *beamforming* convencional para emprego em um meio composto apenas pelo sinal desejado e pelo ruído térmico do receptor. A Tabela 2 fornece os dados adicionais para esse cenário.

Tabela 2 - Parâmetros adicionais para o cenário “sinal desejado + ruído”

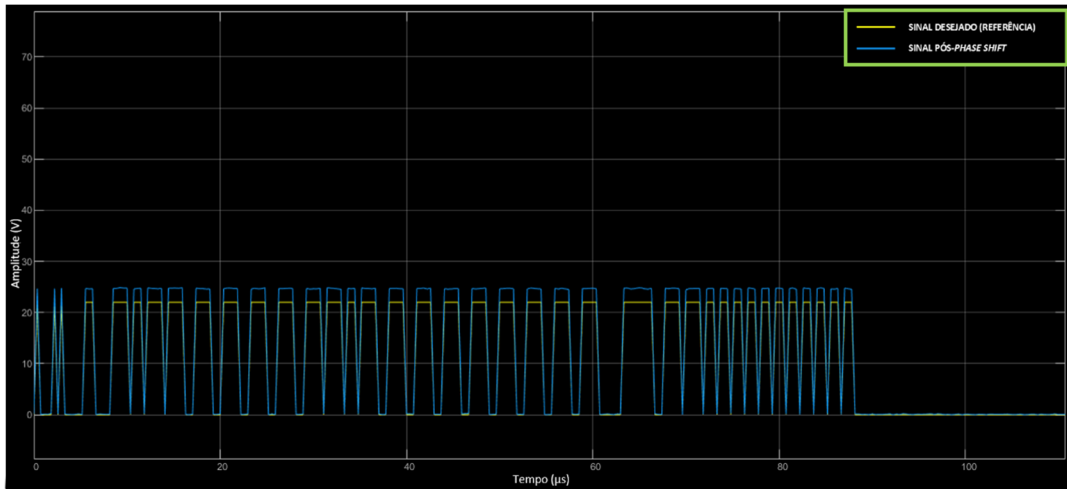
Parâmetro	Descrição
Sinal desejado	45° em azimute e 10° em elevação
<i>Jamming</i>	Não há
Potência do <i>jamming</i>	0 W

Fonte: Autoria própria (2023)

As Figuras 19, 20 e 21 apresentam os resultados provenientes da aplicação da PS. A Figura 19 indica uma provável recuperação, que é ratificada pela Figura 20. Ao estabelecer um limiar com valor igual à metade da amplitude, obtém-se uma taxa de 0% de bits errados.

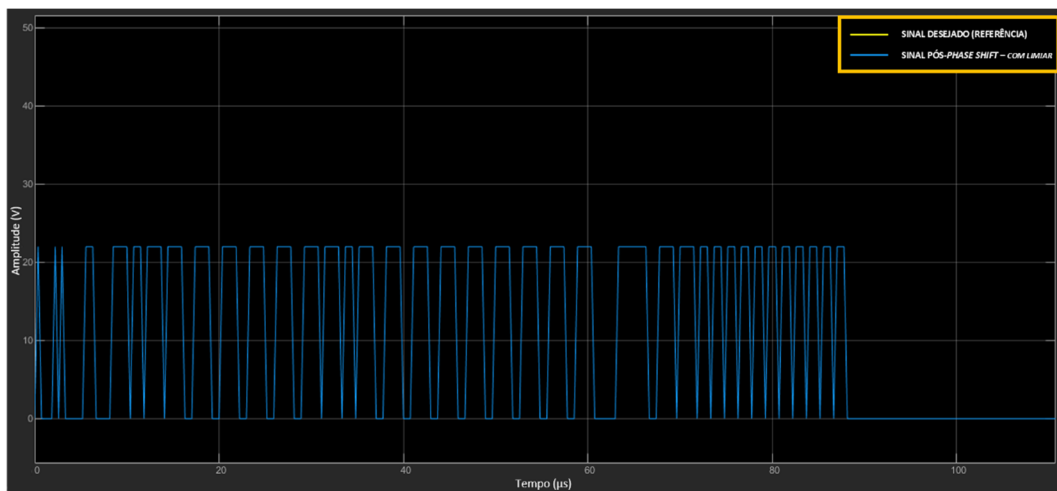


Figura 19: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “PS” (cenário “sinal desejado + ruído”)



Fonte: Autoria própria (2023)

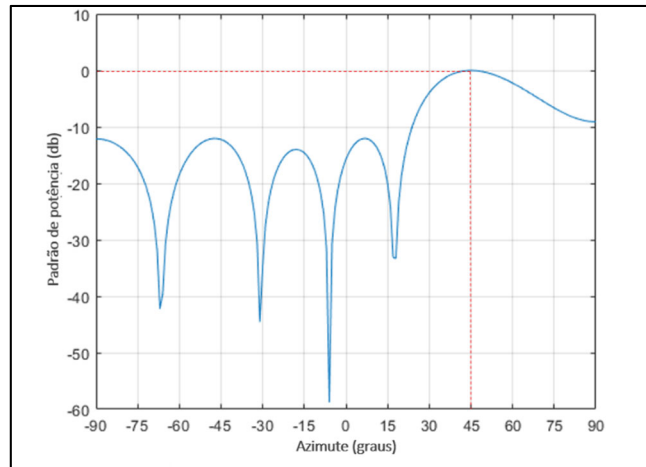
Figura 20: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “PS” (cenário “sinal desejado + ruído”) com limiar



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 21, por sua vez, exibe a capacidade da técnica supracitada de manter o ganho preservado na direção do sinal desejado.

Figura 21: Gráfico Azimute x Ganho após “PS” (cenário “sinal desejado + ruído”)



Fonte: Autoria própria (2023)

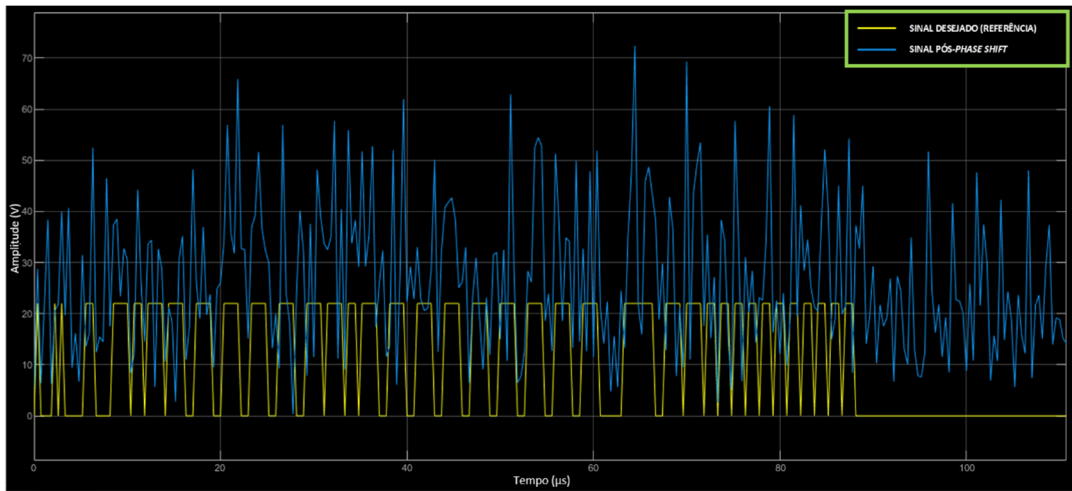
A técnica *Phase Shift*, a despeito dos resultados apreciáveis em cenários simples, quando aplicados em casos de maior complexidade, apresentam queda considerável na capacidade de recuperar a mensagem original. A introdução de dois *jammings*, cujas especificações se encontram na Tabela 3, degradam o sinal em grandes proporções, como se observa pelas Figuras 22 e 23.

Tabela 3: Parâmetros adicionais para o cenário “sinal desejado + ruído + *jamming*”

Parâmetro	Descrição
Sinal desejado	45° em azimute e 10° em elevação
Estimativa da DOA do sinal	45° em azimute e 10° em elevação
<i>Jamming</i>	<u><i>Jammer 1</i></u> : 30° em azimute e 10° em elevação <u><i>Jammer 2</i></u> : 50° em azimute e 20° em elevação
Potência do <i>jamming</i>	<u><i>Jammer 1</i></u> : 1 kW <u><i>Jammer 2</i></u> : 1 kW

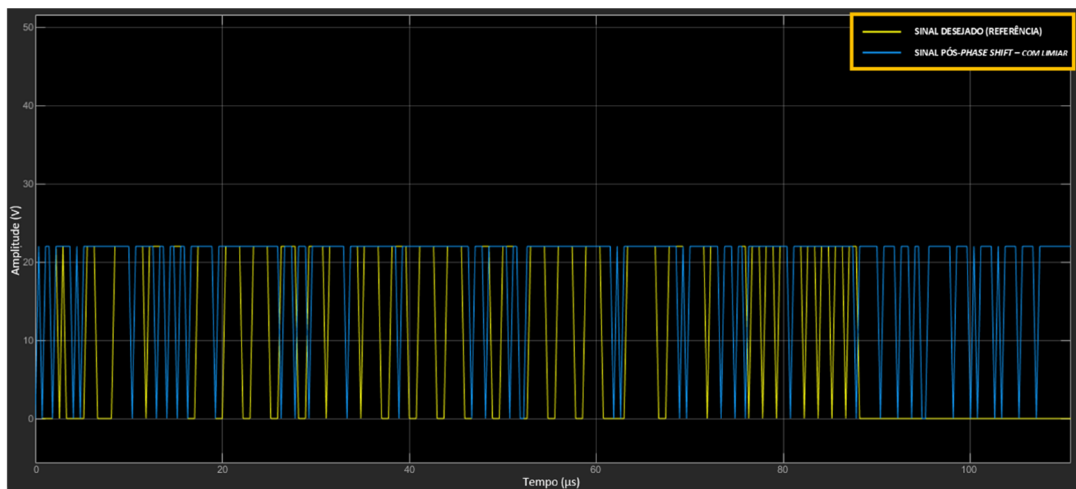
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 22: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “PS” (cenário “sinal desejado + ruído + *jamming*”)



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 23: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “PS” (cenário “sinal desejado + ruído + *jamming*”) com limiar



Fonte: Autoria própria (2023)

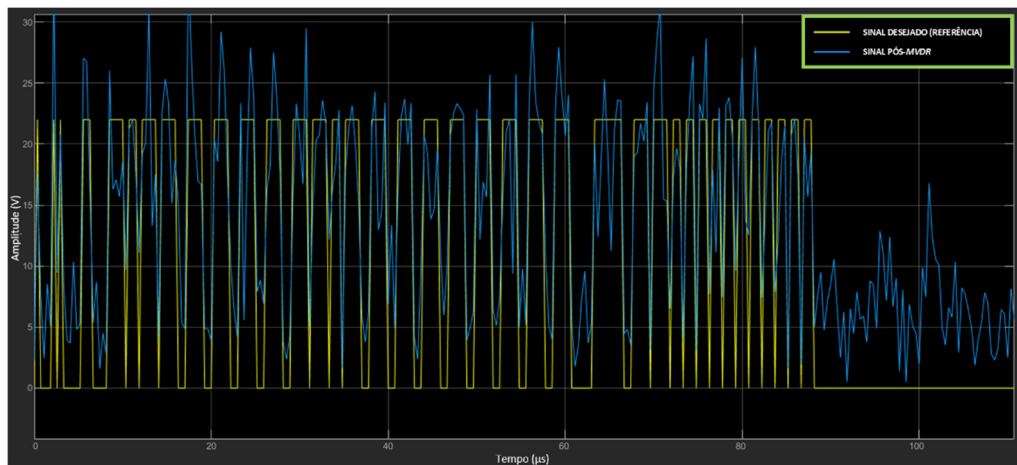
Nessa situação, a taxa de bits errados aumenta para 43,04%, apontando para um caso de saturação. Dessa forma, conclui-se que a técnica *Phase Shift* de *beamforming* convencional não foi eficiente para se contrapor ao *jamming*.

De modo a incrementar a complexidade dos ambientes operacionais de maneira apropriada, faz-se necessário atribuir a outros algoritmos a responsabilidade na contraposição às interferências.

#### 4.2.2 Segundo caso: MVDR

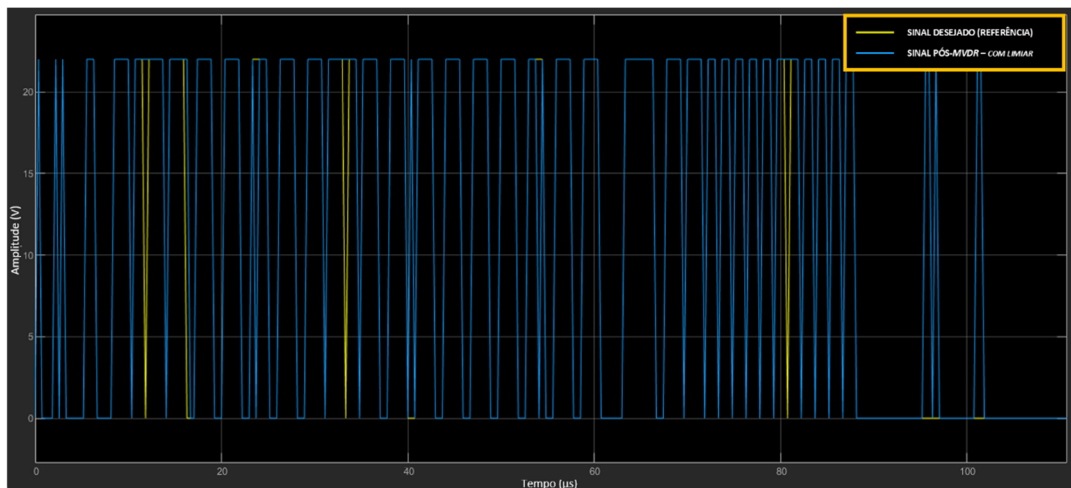
Nesse sentido, com o intuito de sobrepujar interferências pela tentativa de supressão desses sinais e da preservação do sinal de interesse, recorre-se ao algoritmo adaptativo MVDR. Utilizando-o em detrimento da *Phase Shift beamformer* e mantendo as condições impostas pela Tabela 3, são obtidos resultados significativamente melhores com relação à reconstrução do sinal, conforme se observa pelas Figuras 24 e 25.

Figura 24: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + *jamming*”)



Fonte: Autoria própria (2023)

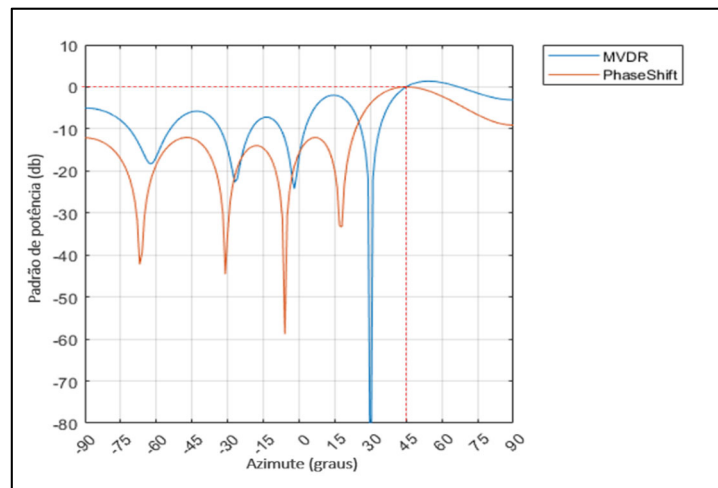
Figura 25: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “MVDR” (cenário “sinal de interesse + ruído + *jamming*”) com limiar



Fonte: Autoria própria (2023)

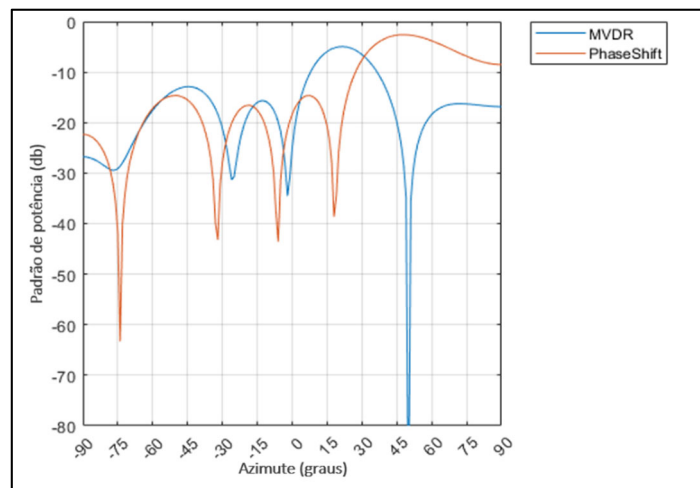
Na Figura 25, é perceptível a capacidade do algoritmo possibilitar uma reconstrução do sinal incidente condizente com o desejado, com uma taxa calculada de bits errados a 3,56%. As Figuras 26 e 27, por sua vez, mostram um comportamento típico do MVDR: a supressão parcial ou completa dos sinais na direção das interferências (interferências nos azimutes  $30^\circ$  e  $50^\circ$  e elevação aos  $10^\circ$  e  $20^\circ$ , respectivamente). Vale destacar a preservação do ganho apenas na elevação a que se encontra o sinal de interesse, que tem  $45^\circ$  de azimute e  $10^\circ$  de elevação.

Figura 26: Gráfico Azimute x Ganho após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + *jamming*”) com elevação de  $10^\circ$



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 27: Gráfico Azimute x Ganho após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + *jamming*”) com elevação de  $20^\circ$



Fonte: Autoria própria (2023)

Em contrapartida, em que pesem os expressivos resultados da qualidade de reconstrução do sinal desejado em meio às interferências, é preciso revisitar uma característica indesejada, inerente ao MVDR: conforme visto no capítulo anterior, por ser considerado um algoritmo ótimo de supressão de interferências, o MVDR necessita de uma estimativa precisa da DOA que, em termos práticos, pode ser afetada pela robustez do algoritmo de estimativa da DOA, pelo dispositivo DSP utilizado, pelas condições de propagação e, sobretudo, pela característica dinâmica conferida ao tráfego aéreo, com variações abruptas em altitude e em velocidade. Assim, diante dos conceitos apresentados, sugere-se que esse algoritmo não seja ideal para implementação em ambientes complexos, de forma que um eventual impacto decorrente de eventuais imprecisões é a supressão do próprio sinal desejado.

Diante do exposto, convém buscar a constatação dessas considerações em termos quantitativos. Para tanto, a Tabela 4 estipula os atributos utilizados nesse caso. Trata-se de uma simulação de ambientes complexos, em que há uma defasagem entre a DOA estimada e a DOA real do sinal desejado.

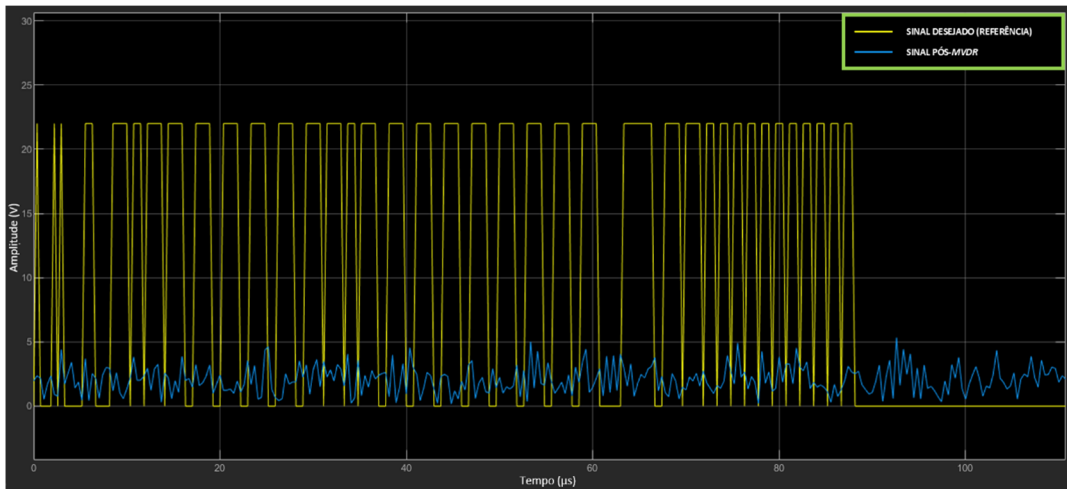
Tabela 4: Parâmetros adicionais para o cenário “sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA”

Parâmetro	Descrição
DOA do sinal desejado	45° em azimute e 10° em elevação
Estimativa da DOA do sinal	43° em azimute e 10° em elevação
DOA do <i>jamming</i>	<u>Jammer 1</u> : 30° em azimute e 10° em elevação <u>Jammer 2</u> : 50° em azimute e 20° em elevação
Potência do <i>jamming</i>	<u>Jammer 1</u> : 1 KW <u>Jammer 2</u> : 1 KW

Fonte: Autoria própria (2023)

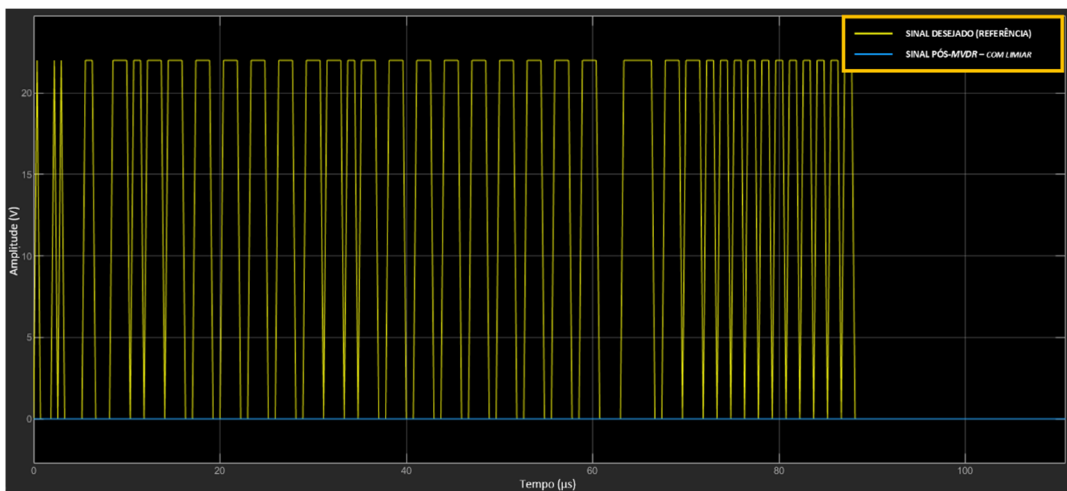
As Figuras 28, 29 e 30 corroboram os efeitos adversos previstos pela literatura. Percebe-se, pela Figura 28, que o sinal sofre uma forte atenuação em decorrência do emprego do algoritmo ótimo. Da Figura 29, por sua vez, depreende-se que o efeito prático da submissão do sinal atenuado ao limiar estabelecido é o completo cancelamento do sinal.

Figura 28: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA”)



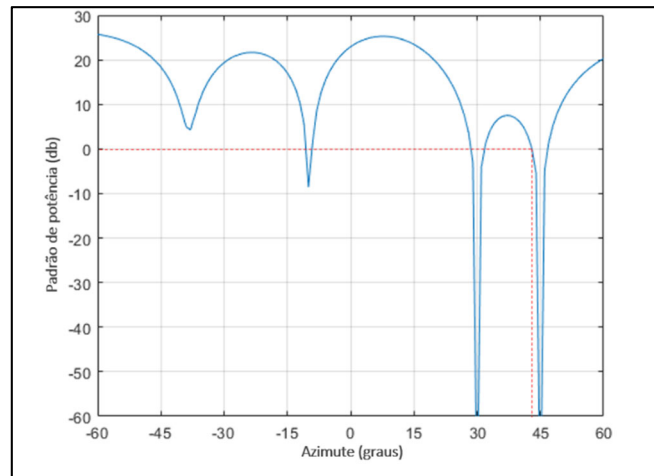
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 29: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA”) com limiar



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 30: Gráfico Azimute x Ganho após “MVDR” (cenário “sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA”) com elevação de 10°



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 30, por sua vez, demonstra que o algoritmo MVDR desempenha o mesmo papel do caso anterior. No entanto, como há uma imprecisão na medida da DOA, ele suprime os sinais interferentes e o de interesse, preservando o ganho na direção estipulada incorretamente, atingindo uma taxa de 51,34% de bits errados. Diante do exposto, constata-se mais uma vez que a taxa de bits errados não é abordagem conceitualmente correta para este caso. Neste cenário, ao contrário dos exemplos anteriores, a taxa elevada de bits errados corresponde ao fenômeno de autoanulação do sinal. Assim, o sinal observado nas figuras supracitadas não faz parte do sinal original. Em face do exposto, conclui-se que o algoritmo MVDR de *beamforming* adaptativo não apresenta desempenho apropriado à contraposição eficiente ao *jamming* em cenários mais complexos, com imprecisões na estimativa da DOA.

Dando prosseguimento ao raciocínio, na sequência é apresentado o algoritmo mais apropriado para lidar com ambientes operacionais complexos com a presença de *jamming* e estimativas imprecisas de DOA.

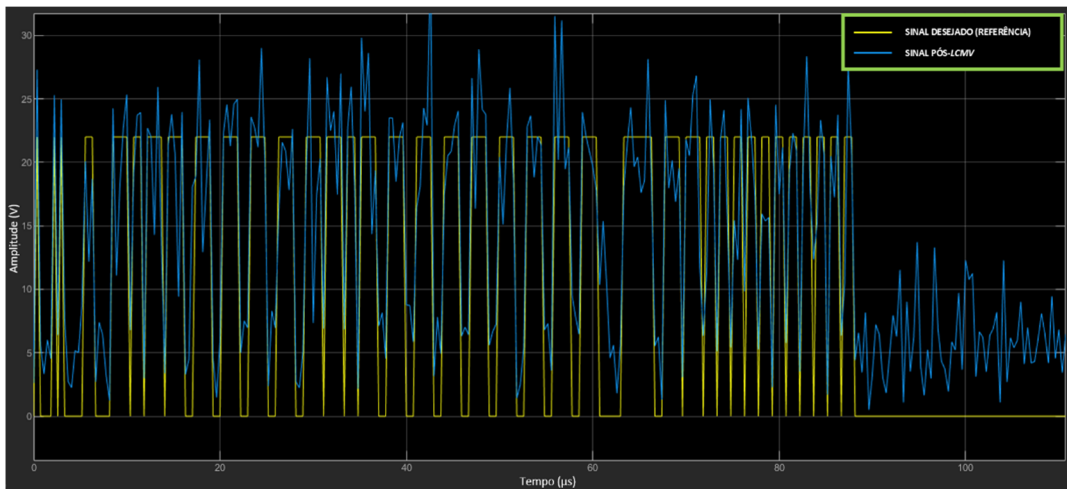
#### 4.2.3 Terceiro caso: LCMV

Identifica-se o algoritmo adaptativo LCMV como alternativa ao MVDR que, em virtude da flexibilidade proporcionada, à medida que permite o estabelecimento de diversas condicionantes, reduz a possibilidade de supressão do sinal desejado. Em suma, funciona como uma generalização do *beamforming* adaptativo ótimo MVDR. Assim, é esperada a preservação



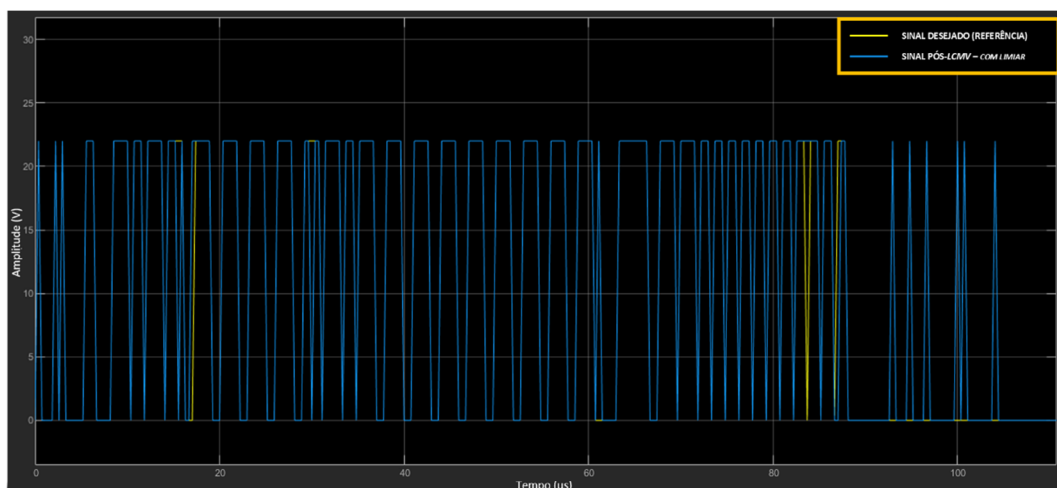
do sinal em um intervalo maior de direções mediante o ajuste da matriz de restrições. As Figuras 31 e 32 exibem um padrão elevado de reconstrução do sinal, a uma taxa de bits errados de 3,6%. A Tabela 4 é utilizada como referência das condições adotadas nas simulações, ao passo que a matriz de restrições adotada nas simulações estipula o desvio da estimativa da DOA em  $\pm 2^\circ$ .

Figura 31: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “LCMV” (cenário “sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA”)



Fonte: Autoria própria (2023)

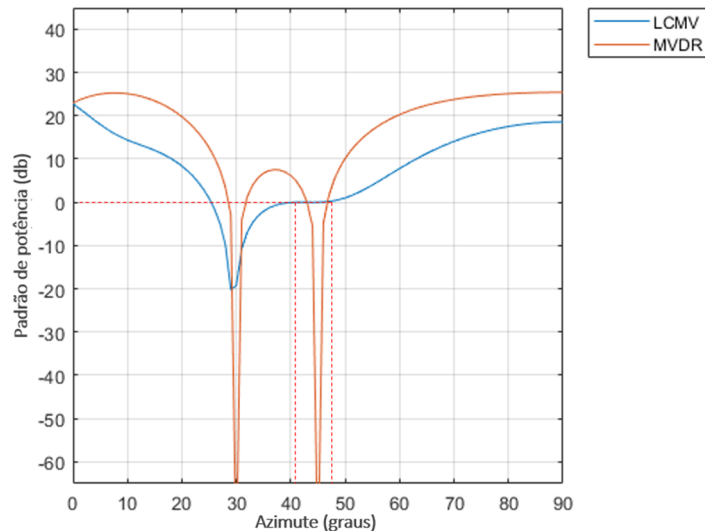
Figura 32: Gráfico Sinal desejado x Sinal após “LCMV” (cenário “sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA”) com limiar



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 33, por sua vez, apresenta a preservação do ganho em um intervalo de direções definido pela matriz de restrições. Adicionalmente, há uma atenuação, em menor escala, da direção da interferência.

Figura 33: Gráfico Azimute x Ganho após “LCMV” (cenário “sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA”) com elevação de 10°



Fonte: Autoria própria (2023)

Em face do observado, conclui-se que o algoritmo adaptativo LCMV apresentou, por ocasião das simulações, um desempenho compatível com a tarefa de contrapor-se à sinais indesejados em ambientes complexos, com imprecisões na estimativa da DOA do sinal de interesse.

Atingindo-se a parte final do trabalho, é possível compilar, pela Tabela 5, as taxas de bits errados calculadas no decorrer das simulações:

Tabela 5: Compêndio de taxas de bits errados calculadas durante a pesquisa

Cenário	Técnica / Algoritmo empregado			
	Sem beamforming	<i>Phase Shift</i>	MVDR	LCMV
Sem interferências	0 %	0 %	3,58 %	3,23 %
Com Interferências	Saturação	<b>Saturação</b>	<b>3,56 %</b>	3,6 %
Com Interferências e DOA imprecisas	Saturação	Saturação	<b>Anulação</b>	<b>3,6 %</b>

Fonte: Autoria própria (2023)

Os valores em negrito correspondem àqueles descritos no decorrer da seção. Em relação ao desempenho da técnica *Phase Shift* e da ausência de *beamforming*, é importante destacar que, apesar de apresentarem a mesma taxa de bits errados por ocasião da simulação do “caso zero”, esses dados não confirmam desempenhos idênticos por dois motivos: as simulações atuam sob o recorte de DOA estáticas e da propagação em espaço livre, cujas simplificações pressupõe-se que superestimam o desempenho de um sistema sem a presença de *beamforming*.

Outro aspecto relevante da tabela são os termos *saturação* e *anulação*. Conforme mencionado no decorrer da seção, a taxa de bits errados é um parâmetro importante, que merece cautela, cuja interpretação não deve limitar-se ao aspecto numérico. Apesar dos valores, esse parâmetro pode indicar, em certas ocasiões, nenhuma informação que não seja a completa saturação ou anulação do sinal.

Um resultado importante reside na representatividade das taxas de bits errados: conforme apresentado no capítulo 2, Strohmeier *et al.* (2014a) descrevem que uma mensagem ADS-B é considerada corrompida quando ela apresenta mais do que 5 bits errados, traduzidos para o percentual de 4,16 % ao considerarmos uma mensagem completa, composta de 120 bits. Assim, os resultados indicam que seja possível empregar algoritmos adaptativos capazes de mitigar o efeito de interferências no receptor. Nesse contexto, faz-se mister a compreensão da finalidade do sistema, do ambiente de propagação e dos algoritmos que podem ser aplicados.

Por fim, é possível responder à questão central da pesquisa, qual seja: em que medida o emprego de técnicas de *beamforming* em receptores ADS-B sujeitos à Medidas de Ataque Eletrônico do tipo *jamming* seriam eficientes? Constatou-se que o algoritmo adaptativo LCMV mantém significativa regularidade frente à progressão de complexidade dos ambientes, o que não é verificada na simulação da técnica *Phase Shift* e do algoritmo MVDR. Adicionalmente, o tráfego aéreo se dá em ambientes complexos, com a participação de meios notadamente dinâmicos. Por essas razões, o LCMV é o algoritmo melhor credenciado a proteger receptores ADS-B de MAE do tipo *jamming*.

Diante do exposto, no próximo capítulo, são apresentadas a síntese e as conclusões da pesquisa.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os receptores ADS-B podem ser impactados negativamente por Medidas de Ataque Eletrônico que afetem a disponibilidade dos sinais. Nesse contexto, a presente pesquisa examinou conceitos e conduziu experimentos que pudessem fundamentar a resposta da questão central que orientou os trabalhos: em que medida o emprego de técnicas de *beamforming* em receptores ADS-B sujeitos à Medidas de Ataque Eletrônico do tipo *jamming* seriam eficientes?

Com ponto de partida da pesquisa, efetuou-se a contextualização da evolução do controle do tráfego aéreo, tendo sido verificado que o fomento à utilização do ADS-B é fruto das iniciativas de modernização do sistema de gerenciamento de tráfego aéreo em nível global. Essa constatação refletiu a relevância do sistema para o ambiente operacional aéreo a ser plenamente implementado, corroborada pelas regulações estabelecidas em proveito de sua utilização mandatória em larga escala.

A partir da exposição dos princípios básicos de funcionamento do ADS-B, identificou-se que a vantagem da transmissão de dados em radiodifusão poderia tornar-se um importante objeto de exploração maliciosa por agentes mal-intencionados. Em um conflito, ser surpreendido por ataques em decorrência de uma consciência situacional deficiente pode gerar resultados catastróficos, com perdas de material e pessoal, podendo influenciar decisivamente no resultado de uma operação militar. Dessa forma, foram discutidas soluções que pudessem mitigar os possíveis efeitos de ataques eletrônicos do tipo *jamming*.

A partir da compreensão do conceito de *beamforming*, deduziu-se que essa poderia ser uma opção factível, do ponto de vista da capacidade de operação em ambientes complexos e da simplicidade de implementação. Para tanto, optou-se por realizar um delineamento das especificações anti-*jamming*.

Na sequência, o encadeamento dos conceitos apresentados forneceu subsídios suficientes à execução de simulações em softwares apropriados que, sustentadas pelas asserções matemáticas e estatísticas das técnicas de *beamforming*, produziram resultados satisfatórios. Observou-se a possibilidade de empregar algoritmos de *beamforming* adaptativos capazes de mitigar o efeito de interferências em receptores, mediante à compreensão da finalidade do sistema, do ambiente de propagação e dos algoritmos ou técnicas que estão sendo aplicados.

Os resultados fornecem indícios claros de que a técnica *Phase Shift*, do *beamforming* convencional, e o algoritmo de *beamforming* adaptativo MVDR não possuem abordagens apropriadas à operação em ambientes complexos, como o aéreo, para fins de mitigação de interferências em receptores ADS-B. A técnica convencional obteve indicações

de saturação completa do sinal, ao passo que o MVDR realizou o cancelamento do *jamming* e do sinal desejado, apontando para uma forte atenuação ou anulação do sinal.

Por essas razões, a pesquisa obteve a seguinte resposta à questão central: há indícios de que o algoritmo de *beamforming* adaptativo LCMV seria eficiente contra medidas de ataque eletrônico do tipo *jamming* em receptores ADS-B, uma vez que seu emprego demonstrou ser a única estratégia robusta face à progressão de complexidade dos ambientes operacionais, e à manutenção do parâmetro de taxa de bits errados estatisticamente abaixo do nível de referência.

Por ocasião da conclusão do presente trabalho, a expectativa é de que a análise realizada acerca do emprego de técnicas de *beamforming* possa contribuir para a mitigação de possíveis vulnerabilidades que afetem a disponibilidade do sinal ADS-B.

Como sugestão para trabalhos futuros, estimula-se a implementação de um sistema anti-*jamming* em receptores ADS-B com a efetiva aplicação da matriz de covariância e de algoritmos de direção de chegada, de forma que se obtenha uma visão holística acerca da operacionalização do *beamforming* na contraposição às interferências. Adicionalmente, é conveniente obter dados concretos a partir de investigações empíricas e, sobretudo, mediante aplicação de testes em pesquisas de campo. Dessa forma, sugere-se que esse tema permaneça sendo objeto de pesquisas vindouras, em virtude da sua contemporaneidade e relevância.

## REFERÊNCIAS

- ABDULAZIZ, Abdulrazaq; YARO, Abdulmalik S.; ADAM, Ashraf A.; KABIR, Mahmoud T.; SALAU, Habeeb B. Optimum receiver for decoding Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) signals. **American Journal of Signal Processing**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 23-31, 2015.
- AIREON. **The Executive Reference Guide to Space-Based ADS-B**. McLean, Virgínia, 2023. 24 p. Disponível em: <https://aireon.com/resources/brochures-guides/executive-reference-guide-space-based-ads-b/>. Acesso em: 1 set. 2023.
- ALBUQUERQUE, J. P. A.; FORTES, J. M. P.; FINAMORE, W. A. **Probabilidade, Variáveis Aleatórias e Processos Estocásticos**. Rio de Janeiro: Interciência: PUC-Rio, 2008. 334 p.
- ALMEIDA, Náthalee Cavalcanti de. **Técnicas de conformação de feixe em arranjo de antenas utilizando aprendizagem por reforço**. Orientador: Adrião Duarte Dória Neto. 2016. 82 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2015.
- BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 4. ed. Hoboken, Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 1104 p.
- BALANIS, Constantine A.; IOANNIDES, Panayiotis I. **Introduction to Smart Antennas**. [San Rafael, California]: Morgan & Claypool Publishers, 2007. 175 p.
- BALASEM, S. S.; TIONG, S. K.; KOH, S. P. Beamforming Algorithms Technique by Using MVDR and LCMV. **World Applied Programming**, [s. l.], v. 2, 5. ed. p. 315-324, maio 2012.
- BASSETO, Murilo. **Melhoria dos Serviços de Tráfego Aéreo na FIR Atlântico deve ser implantada pelo DECEA até 2025**. 2023. Disponível em: <https://aeroin.net/melhoria-dos-servicos-de-trafego-aereo-na-fir-atlantico-deve-ser-implantada-pelo-decea-ate-2025/>. Acesso em: 17 set. 2023.
- BRASIL. Ministério da Defesa - MD. **Glossário das Forças Armadas (MD35-G-01)**. 5. ed. Brasília, 2015: [s. n.], 288. Disponível em: [www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/estado-maior-conjunto-das-forcas-armadas/doutrina-militar/publicacoes](http://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/estado-maior-conjunto-das-forcas-armadas/doutrina-militar/publicacoes). Acesso em: 1 set. 2023.
- BRASIL. Ministério da Infraestrutura - MINFRA. Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC. **Institucional**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/aceso-a-informacao/institucional>. Acesso em: 7 jul. 2023.
- CERQUEIRA, Raul Sandoval. Regulação para o ADS-B no espaço aéreo brasileiro. **Revista da UNIFA**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 2, p. 21-35, 28 dez. 2021.
- COMANDO DA AERONÁUTICA - COMAER. Departamento de Controle do Espaço Aéreo - DECEA. **Circular de Informação Aeronáutica nº16, de 22 de maio de 2023**. Apresenta o planejamento para a operacionalização do ADS-B OUT no Espaço Aéreo Continental Brasileiro. Operacionalização do Sistema de Vigilância Dependente Automática por

Radiodifusão (ADS-B) no Espaço Aéreo Continental Brasileiro. Brasília, 2023a. p. 1-8. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/>. Acesso em: 10 jul. 2023.

COMANDO DA AERONÁUTICA - COMAER. Departamento de Controle do Espaço Aéreo - DECEA. **O DECEA**, 2023b. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/?i=quem-somos&p=o-decea>. Acesso em: 7 jul. 2023.

COSTIN, Andrei; FRANCILLON, Aurélien. Ghost in the Air (Traffic): On insecurity of ADS-B protocol and practical attacks on ADS-B devices. *In: Blackhat 2012*. Las Vegas, Nevada: EURECOM, 2012. Disponível em: <https://www.eurecom.fr/publication/3788>. Acesso em: 30 jul. 2023.

EUROPEAN ORGANIZATION FOR THE SAFETY OF AIR NAVIGATION - EUROCONTROL. **About us**. 2023. Disponível em: <https://www.eurocontrol.int/about-us>. Acesso em: 1 jul. 2023.

FORÇA AÉREA BRASILEIRA - FAB. **Saiba como será a vigilância aérea no conceito CNS/ATM**. 2011. Disponível em: <https://www.fab.mil.br/noticias/imprime/8503/>. Acesso em: 24 set. 2023.

FRANCIS, Raymond *et al.* The Flying Laboratory for the Observation of ADS-B Signals. **International Journal of Navigation and Observation**, Londres, UK, v. 2011, ed. 1, p. 1-5, nov. 2011. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ijno/2011/973656/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

GALATI, Gaspare *et al.* Study of an integrated communication, navigation and surveillance satellite system for air traffic management. **Proceedings of International Radar Conference**, Beijing, China, p. 238-241, out. 2002.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, jul. 2017. 192 p.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO. **About ICAO**. 2023a. Disponível em: <https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>. Acesso em: 1 jul. 2023.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO. **Vision and Mission**. 2023b. Disponível em: <https://www.icao.int/about-icao/Council/Pages/vision-and-mission.aspx>. Acesso em: 1 jul. 2023.

KIM, Yoohwan; JO, Ju-Yeon; LEE, Sungchul. ADS-B vulnerabilities and a security solution with a timestamp. **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine**, [s. l.], v. 32, ed. 11, p. 52 - 61, nov. 2017.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Mariana de Andrade. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021. 368 p.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Mariana de Andrade. **Metodologia do Trabalho Científico**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021. 256 p.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Mariana de Andrade. **Técnicas de Pesquisa**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021. 304 p.

LAUFER, Carl. **The Hobbyist's Guide to the RTL-SDR: Really Cheap Software Defined Radio**. 7. ed. [s. l.]: RTL-SDR.com, 2014. 742 p.

LEONARDI, Mauro; PIRACCI, Emilio; GALATI, Gaspare. ADS-B jamming mitigation: a solution based on a multichannel receiver. **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine**, [s. l.], v. 32, ed. 11, p. 44-51, nov. 2017.

LEITE JUNIOR, Walmor Cristino. A Guerra Eletrônica na História Naval. **Revista Marítima Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 141, n. 1/3, p. 198-206, jan./mar. 2021. Disponível em: <http://www.revistamaritima.com.br/revistas/revista-maritima-brasileira-170-anos>. Acesso em: 22 ago. 2023.

LI, Jian; STOICA, Petre. **Robust Adaptive Beamforming**. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2008. 440 p.

LITVA, John; LO, Titus Kwork-Yeung. **Digital Beamforming in Wireless Communications**. Norwood, Massachusetts: Artech House, 1996. 320 p.

MAHAFZA, Bassem R. **Radar Signal Analysis and Processing Using MATLAB**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2008. 498 p.

MANESH, Mohsen Riahi; KAABOUCH, Naima. Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) system. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, [s. l.], v. 19, p. 1-37, oct. 2017.

MANOLAKIS, Dimitris G.; INGLE, Vinay K.; KOGON, Stephen M. **Statistical and Adaptive Signal Processing: Spectral Estimation, Signal Modeling, Adaptive Filtering and Array Processing**. 2. ed. Norwood, Massachusetts: Artech House, 2000. 796 p.

MCCALLIE, Donald; BUTTS, Jonathan; MILLS, Robert. Security analysis of the ADS-B implementation in the next generation air transportation system. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, [s. l.], v. 4, ed. 2, p. 78-87, ago. 2011.

MELVIN, William L.; SCHEER, James A. **Principles of Modern Radar: Advanced techniques (Radar, Sonar and Navigation)**. Edison, New Jersey: Scitech Publishing, 2013. v. 2. 872 p.

MUCCI, Ronald A. A comparison of efficient beamforming algorithms. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, [s. l.], v. 32, ed. 3, p. 548 - 558, jun. 1984.

NAGANAWA, Junichi *et al.* Jamming and Spoofing Protection for ADS-B Mode S Receiver through Array Signal Processing. **Lecture Notes in Electrical Engineering**, Singapura, v. 555, n. 1, p. 184-204, jun. 2019.

NUSEIBEH, Bashar; HALEY, Charles B.; FOSTER, Craig. Securing the Skies: In Requirements We Trust. **Computer**, [s. l.], v. 42, ed. 9, p. 64-72, set. 2009.



PUTTINI, Saulo Benigno. **Emprego de Antenas Adaptativas para estimação de dados em ambientes CDMA**. Orientador: Ricardo Zelenovsky. 2010. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS – RTCA. **Minimum operational performance standards for 1090 MHz Extended Squitter automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information services-broadcast (TIS-B) (DO-260B)**. Washington, DC: RTCA, 2009.

SALEM, Behnam *et al.* Avoiding Self Nulling by Using Linear Constraint Minimum Variance Beamforming in Smart Antenna. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, Nova York, v. 12, ed. 5, p. 3435-3443, abr. 2013. Disponível em: <https://maxwellsci.com/jp/mspabstract.php?doi=rjaset.5.4590>. Acesso em: 6 set. 2023.

SALLOMI, Adheed H.; AHMED, Sulaiman. Elman Recurrent Neural Network Application in Adaptive Beamforming of Smart Antenna System. **International Journal of Computer Applications**, [s. l.], v. 129, n. 11, p. 38-43, 2015.

SCHÄFER, Matthias; LENDERS, Vincent; MARTINOVIC, Ivan. Experimental Analysis of Attacks on Next Generation Air Traffic Communication. **Lecture Notes in Computer Science**, Berlin, Heidelberg, v. 7954, n. 1, p. 253-271, 2013. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-38980-1\\_16](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-38980-1_16). Acesso em: 19 set. 2023.

STROHMEIER, Martin *et al.* On the Security of the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Protocol. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 1066 - 1087, out. 2014a.

STROHMEIER, Martin *et al.* Realities and challenges of nextgen air traffic management: the case of ADS-B. **IEEE Communications Magazine**, [s. l.], v. 52, ed. 5, p. 111-118, maio 2014b.

STROHMEIER, Martin. **Security in Next Generation Air Traffic Communication Networks**. Orientador: Ivan Martinovic. 2017. 186 f. Tese (Doutorado em Filosofia) - University of Oxford, Oxford, UK, 2016.

UNITED STATES OF AMERICA - USA. Department of Transportation. Federal Aviation Administration - FAA. ADS-B 101: What It Is, and What It Means to You. **FAA Safety Briefing**, Washington, DC, v. 56, n. 2, p. 10-12, mar./abr. 2017. Disponível em: <https://www.faa.gov/general/faa-safety-briefing-marchapril-2017>. Acesso em: 16 ago. 2023.

UNITED STATES OF AMERICA - USA. Department of Transportation. Federal Aviation Administration - FAA. **NextGen - SESAR: State of Harmonisation**. 3. ed. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2018a. 42 p. Disponível em: [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/NextGen-SESAR\\_State\\_of\\_Harmonisation.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/NextGen-SESAR_State_of_Harmonisation.pdf). Acesso em: 2 ago. 2023.

UNITED STATES OF AMERICA - USA. Department of Transportation. Federal Aviation Administration - FAA. **Surveillance and Broadcast Services Description Document (SRT-047)**. 4. ed. Washington, DC: Federal Aviation Administration - FAA, 2018b. 160 p.

Disponível em: <https://govtribe.com/file/government-file/attachment-1-surveillance-and-broadcast-services-description-document-rev-4-dot-pdf>. Acesso em: 18 ago. 2023.

UNITED STATES OF AMERICA - USA. Department of Transportation. Federal Aviation Administration - FAA. **NEXTGEN Annual Report: A Report on the History, Current Status, and Future of National Airspace System Modernization**. Washington, DC: Federal Aviation Administration - FAA, 2020. 155 p. Disponível em: <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/NextGenAnnualReport-FiscalYear2020.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2023.

UNITED STATES OF AMERICA - USA. Department of Transportation. Federal Aviation Administration - FAA. **About FAA: mission**. 2023a. Disponível em: <https://www.faa.gov/about/mission>. Acesso em: 1 jul. 2023.

UNITED STATES OF AMERICA - USA. Department of Transportation. Federal Aviation Administration - FAA. **Equip ADS-B: Frequently Asked Questions**. 2023b. Disponível em: [https://www.faa.gov/air\\_traffic/technology/equipadsb/resources/faq](https://www.faa.gov/air_traffic/technology/equipadsb/resources/faq). Acesso em: 6 jul. 2023.

UNITED STATES OF AMERICA - USA. Department of Transportation. Federal Aviation Administration - FAA. **Equip ADS-B: Ins and Outs**. 2023c. Disponível em: [https://www.faa.gov/air\\_traffic/technology/equipadsb/capabilities/ins\\_outs](https://www.faa.gov/air_traffic/technology/equipadsb/capabilities/ins_outs). Acesso em: 6 jul. 2023.

UNITED STATES OF AMERICA - USA. Department of Transportation. Federal Aviation Administration - FAA. **Next Generation Air Transportation System (NextGen)**. 2023d. Disponível em: <https://www.faa.gov/nextgen>. Acesso em: 1 jul. 2023.

VAN TREES, Harry L. **Optimum Array Processing: part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory**. Nova York: John Wiley & Sons, 2002. 1472 p.

VIEIRA, Lucas Lucindo. **Implementação de um Sistema ADS-B através de Técnicas de Rádio Definido por Software**. Orientador: Roberto Wanderley da Nóbrega. 2018. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações) - Instituto Federal de Santa Catarina, São José, 2018.

XIAO, Zhenyu *et al.* **Array Beamforming Enabled Wireless Communications**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2023. 438 p.

WINSTON, Li; KAMAL, Pan. Integrated Aviation Security for Defense-in-Depth of Next Generation Air Transportation System. *In: IEEE International Conference On Technologies For Homeland Security (HST)*, 1., 2011, Waltham. **Proceedings...** Waltham, Massachusetts: IEEE, 2011, p. 136-142. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6107860/authors#authors>. Acesso em: 14 ago. 2023.