

# Aplicação de *beamforming* como técnica anti-jamming em receptores ADS-B

Primeiro-Tenente (MB) Michel Salviano Rivera

## 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. 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 pergunta nevrálgica do estudo: em que medida o emprego de técnicas de *beamforming* em receptores ADS-B sujeitos a 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 robustez apresentada face à progressão de complexidade dos ambientes operacionais e 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 na anti-jamming technique*

### 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. 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 pivotal 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 robustness presented in the progression of the complexity of operational environments and 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.

Artigo recebido em 31/08/2023 e aceito para publicação em 30/12/2023.

## 1 INTRODUÇÃO

A evolução do controle do tráfego aéreo é um reflexo notável do desenvolvimento da aviação ao longo do tempo. 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.

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 e representante da evolução do controle do tráfego aéreo recebe o nome de *Automatic Dependent Surveillance-Broadcast* (ADS-B)<sup>1</sup>, utilizada 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, facilitando 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. Dessa forma, o presente trabalho analisa o resultado da aplicação da técnica *beamforming*<sup>2</sup> na otimização da diretividade de um arranjo de antenas.

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.

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

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

Para tanto, são constantes as buscas pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas capazes de assegurar o uso eficiente do espectro eletromagnético pela própria Força.

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

A relevância desta pesquisa reside na apreciação de métodos de contraposição a 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.

O objeto de pesquisa é 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, 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*. Por fim, os resultados obtidos foram apresentados graficamente no domínio do tempo e ratificados sob uma abordagem estatística. Como metodologia, empregou-se o método dedutivo, com finalidades exploratórias, valendo-se das técnicas de pesquisa bibliográfica e experimental.

## 2 ADS-B: EVOLUÇÃO, CARACTERÍSTICAS E VULNERABILIDADES

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 a essa tecnologia, proporcionando uma visão geral da mitigação dessas lacunas de segurança, com foco no conceito de *beamforming*.

## 2.1 EVOLUÇÃO DO 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). Esse aspecto motiva a atuação de órgãos especializados, cujos papéis se mostram progressivamente importantes. Nesse contexto, observa-se os papéis preponderantes da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), a nível global, e da Administração Federal de Aviação (FAA) e da Organização Europeia para a Segurança da Navegação Aérea (EUROCONTROL), a nível nacional e regional.

Assim surge a *NextGen*, uma revisão global do sistema de aviação dos EUA e uma evolução da gestão do tráfego aéreo. A quantidade de colaborações mútuas entre órgãos e países são indícios da importância dada pela comunidade aeronáutica à padronização e consolidação dessas novas tendências, ou seja, da busca por maior interoperabilidade de aviônicos, protocolos de comunicações 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 e a automatização do apoio à decisão. O estandarte desses estímulos 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 aeronaves e estações terrestres, melhorando a eficiência, segurança e capacidade do controle de tráfego aéreo (Aireon, 2023).

Vieira (2018) contextualiza que o tráfego aéreo foi tradicionalmente marcado pela simbiose entre Radares de Vigilância Primários (PSR) e Secundários (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.

Strohmeier et al. (2014) lembram que, antes do ADS-B, todos os SSR eram baseados na interrogação. O ADS-B, como tecnologia, é uma atualização dos SSR e, em termos de mensagens, é uma evolução do Modo S de interrogação. A diferença fundamental entre o ADS-B e o Modo S é a capacidade de transmissão em radiodifusão, sem fazer uso dos reconhecidos mecanismos 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.

O incremento da consciência situacional é apresentado por Strohmeier *et al.* (2014) 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.

Os EUA se apresentam no estado da arte quanto à implementação do sistema em larga escala. Desde 2020, encontra-se em vigor a obrigatoriedade de implantação do ADS-B por todos os usuários (CERQUEIRA, 2021). A União Europeia, por sua vez, possui diretrizes muito semelhantes às estadunidenses, cuja 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. O Brasil, por sua vez, encontra-se nos estágios iniciais de implementação. No entanto, observam-se os esforços das principais entidades no contexto da aviação e do controle de tráfego aéreo, a saber, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) e a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), de forma que o sistema ADS-B de vigilância do espaço aéreo continental brasileiro seja gradativamente implantado até o segundo semestre de 2026 (COMAER, 2023a).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

O ADS-B, que é considerado como uma tecnologia de vigilância dependente cooperativa, possibilita o incremento na capacidade de

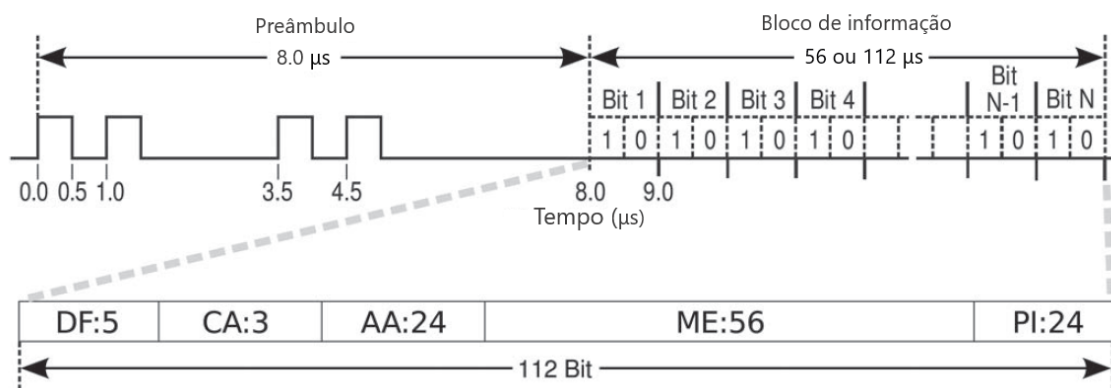
vigilância dependente cooperativa, possibilita o incremento na capacidade de vigilância, ao passo que reduz custos de manutenção e instalação observados nos sistemas de vigilância antecedentes (Abdulaziz *et al.*, 2015). Outro diferencial proposto pelo ADS-B é a habilitação de estações terrestres para operação em áreas outrora inimagináveis, como o espaço aéreo oceânico e áreas montanhosas (Galati *et al.*, 2002).

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 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* (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.*, 2014). Instalado nas aeronaves, o ADS-B OUT realiza a transmissão em radiodifusão das informações. 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). O ADS-B, em termos de mensagem, está encapsulado em um quadro de resposta do Modo S. A transmissão ADS-B é composta por duas divisões, a saber, preâmbulo e bloco de dados, conforme mostrado na Figura 1.

De acordo com Strohmeier *et al.* (2014), a transmissão do bloco de dados é iniciada 8  $\mu$ 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 (PPM). O quadro de resposta ADS-B é composto por 112 bits, divididos em cinco campos, descritos no Quadro 1.

Figura 1: Quadro de resposta ADS-B



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

Quadro 1 : Campos do bloco de dados de uma transmissão ADS-B

<b>Campo</b>	<b>Nº de bits</b>	<b>Descrição</b>
<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	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 de <i>Verificação Cíclica de Redundância</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.* (2014, p. 1067-1068) e Vieira (2018, p. 32).

## 2.3 VULNERABILIDADES

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 que garantam sua segurança. Kim, Jo e Lee (2017) 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, caso não sejam resolvidas.

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 que não pode ser dissociado 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.

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*. 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).

Faz-se necessário buscar soluções de maior abrangência e menor complexidade de implementação. As Forças Armadas brasileiras,

por exemplo, são agentes potencialmente interessados no incremento da capacidade de compilação do tráfego aéreo, aliado à eficácia na contraposição a possíveis ataques eletrônicos.

Nesse contexto, Balasem, Tiong e Koh (2012) destacam o *beamforming*, princípio consagrado da área de processamento de sinais utilizado na otimização da diretividade do sinal proveniente de um arranjo de antenas. 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 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.

## 2.4 BEAMFORMING

O conceito de *beamforming*, conforme introduzido anteriormente, é digno de aprofundamento à medida que sugere, a priori, 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 - *Direction Of Arrival*).

O ponto nevrálgico do presente artigo reside no tipo de técnica de *beamforming* empregado: a ele é atribuída a tarefa de otimizar a configuração das antenas e definir a forma como a energia do sinal é direcionada. O *beamforming* pode ser classificado em *convencional* ou *adaptativo*.

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. O presente trabalho, por ocasião das simulações, analisa a técnica conhecida por *Phase Shift Beamformer*, dentre

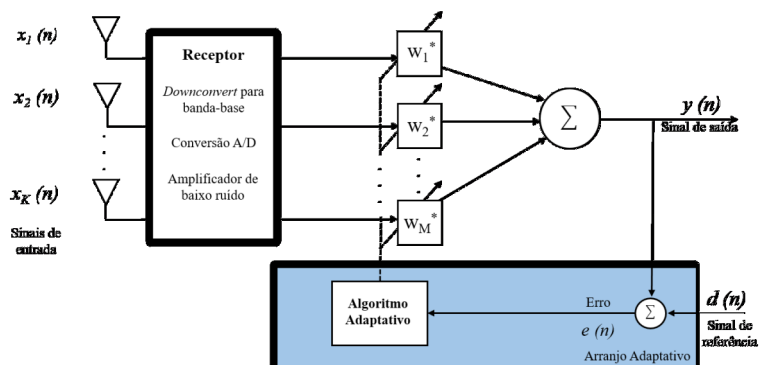
as essencialmente convencionais. Trata-se de uma abordagem simples em que os sinais recebidos pelas antenas são ajustados em fase pelo espaçamento uniforme de antenas. Quando os sinais de todas as antenas estão sincronizados em fase na direção do sinal desejado, ocorre uma interferência construtiva na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

O *beamforming* adaptativo, em contraposição ao método tradicional, ajusta dinamicamente os pesos das antenas com os subsídios fornecidos pela matriz de covariância. 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 2 mostra o diagrama simplificado 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).

Este trabalho restringiu-se ao estudo dos algoritmos que foram efetivamente aplicados nas simulações, a saber, *Minimum Power Distortionless Response* (MVDR) e *Linearly Constrained Minimum Variance* (LCMV). 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. Essa preocupação decorre da possibilidade de supressão do próprio sinal desejado em caso de imprecisões nas estimativas da DOA, o que sugere uma inadequação à tarefa de operar em ambientes complexos como o aéreo.

Figura 2: *Beamforming* adaptativo: esquema simplificado



Fonte: Autoria própria (2023)

No entanto, é possível aplicar condicionantes apropriadamente projetadas que, embora correspondam a um padrão inferior ao ótimo, não afetam a Signal-to-interference-plus-noise ratio (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 e que, por essas razões, é considerado uma versão generalizada do MVDR.

Diante dos fatores mencionados, é compreensível pressupor uma relação estreita entre arranjo de antenas, matriz de covariância e o tipo de *beamforming* adotado. Portanto, percebe-se a necessidade de explorar os principais aspectos e princípios de funcionamento que constam do escopo da formação de feixes. O Quadro 2 fornece os principais fatores a serem considerados na implementação de um sistema anti-*jamming* em receptores ADS-B utilizando a técnica de *beamforming*.



Quadro 2 : Considerações gerais sobre a implementação de um sistema anti-*jamming*

<b>Campo</b>	<b>Descrição</b>
Arranjo de Antenas	Estruturas planares possuem a capacidade de distinguir objetos em azimute e em elevação, o que os credencia para operação em ambientes dinâmicos (Balanis, 2016). Opta-se pelo arranjo retangular em relação ao circular pelo melhor desempenho em elevação oferecido pelos Arranjos Retangulares Uniformes (URA).
Algoritmos de Estimção da DOA	No que concerne à adequabilidade em ambientes dinâmicos, Balanis (2016) considera os algoritmos ESPRIT (Estimação de Parâmetros de Sinal por Técnicas de Invariância Rotacional) e a evolução do MUSIC (Classificação de Múltiplos Sinais), denominado Root-MUSIC boas opções para emprego em ambientes complexos.
Algoritmos de Ajuste de Pesos das Antenas	Os algoritmos fazem parte do escopo do trabalho, com detalhes adicionais na seção seguinte. Eles são usados no <i>beamforming</i> adaptativo e devem ser eficazes em ambientes aéreos complexos como o aéreo.
Processamento de sinais	Há uma demanda para o uso de Processadores Digitais de Sinais (DSP) em sistemas anti- <i>jamming</i> . O DSP permite aproveitar amostras digitais, usando a matriz de covariância para estimar a Direção de Chegada (DOA) e ajustar os pesos das antenas com algoritmos específicos.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Anteriormente, 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. Nesta seção, 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.

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 serão descritas nas subseções correspondentes. Para tanto, a Tabela 1 apresenta as variáveis que permanecem fixas durante 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.

Para tanto, a Tabela 1 apresenta as variáveis que permanecem fixas durante 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.

Tabela 1 - Parâmetros fixos referentes às fases de simulações

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

Fonte: Autoria própria (2023)

Adicionalmente, esta simulação não abrangeu a conversão Analógico-Digital (A/D) no receptor. Optou-se por não realizar a etapa de quantização no receptor modelado, de forma que haja a visualização dos resultados posteriores à aplicação das técnicas de *beamforming* no formato analógico. Assim, a conversão A/D é feita após a atuação dos algoritmos de *beamforming*. Se por um lado essa extrapolação não ocorre na prática, por outro fornece uma comparação entre o sinal analógico incidente no arranjo de antenas e o sinal digital, ambos em momentos subsequentes à atuação das técnicas de *beamforming*.

O presente trabalho realizou 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 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.

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 limiar de amplitude, também em azul, porém em formato digital; e da porcentagem de bits errados, pelos comandos do *software* MATLAB.

### 3.1 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, pelo ruído térmico do receptor e por dois *jammings*. A Tabela 2 fornece os dados adicionais para esse cenário.

Tabela 2 - Parâmetros adicionais para o cenário "sinal desejado + ruído+jamming"

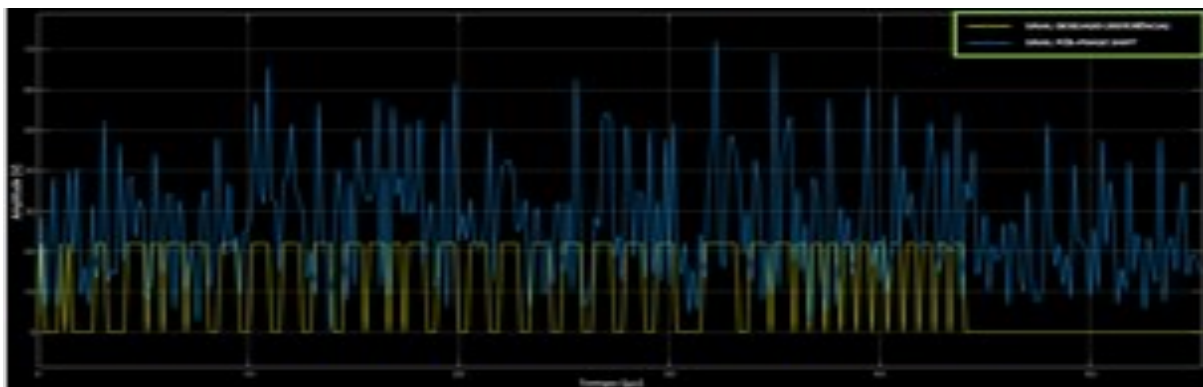
Parâmetro	DOA
Sinal desejado	45° em azimute e 10° em elevação
Estimativa do sinal	45° em azimute e 10° em elevação
<i>Jamming</i>	<i>Jammer 1</i> : 30° em azimute e 10° em elevação
	<i>Jammer 2</i> : 50° em azimute e 20° em elevação
Potência do <i>jamming</i>	<i>Jammer 1</i> : 1 KW
	<i>Jammer 2</i> :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

Fonte: Autoria própria (2023)

A técnica *Phase Shift*, em casos de maior complexidade, apresentam queda considerável na capacidade de recuperar a mensagem original. A introdução de dois *jammings* degradam

o sinal em grandes proporções, como se observa pelas Figuras 3 e 4. A taxa de bits errados aumenta para 43,04%, apontando para um caso de saturação.

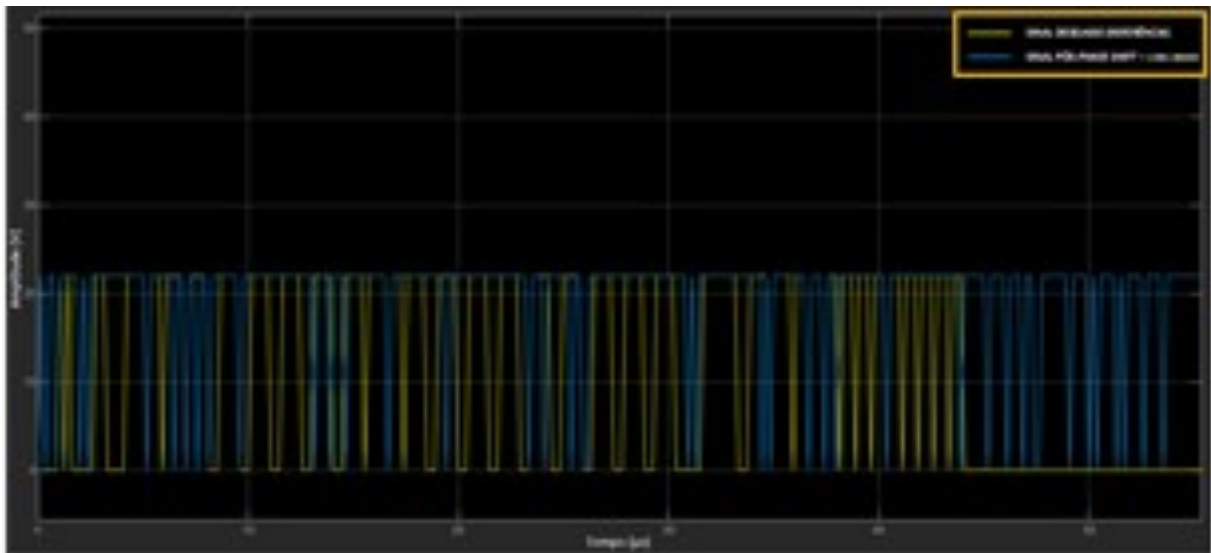
Figura 3: Sinal desejado x Sinal após "PS" ("sinal desejado + ruído + *jamming*")



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)



Figura 4: Sinal desejado x Sinal após "PS" ("sinal desejado + ruído + *jamming*") com limiar



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

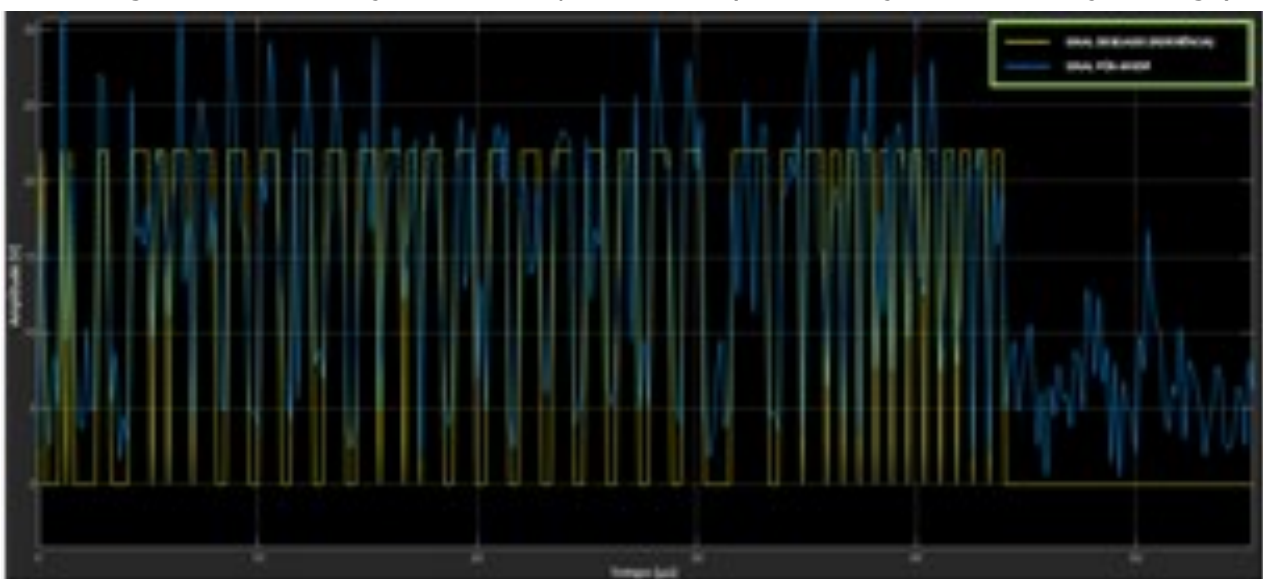
De modo a incrementar a complexidade dos ambientes operacionais de maneira apropriada, faz-se necessário atribuir a outros algoritmos a responsabilidade na contraposição às interferências.

### 3.2 Segundo caso: MVDR

Nesse sentido, com o intuito de sobrepujar interferências pela tentativa de supressão desses

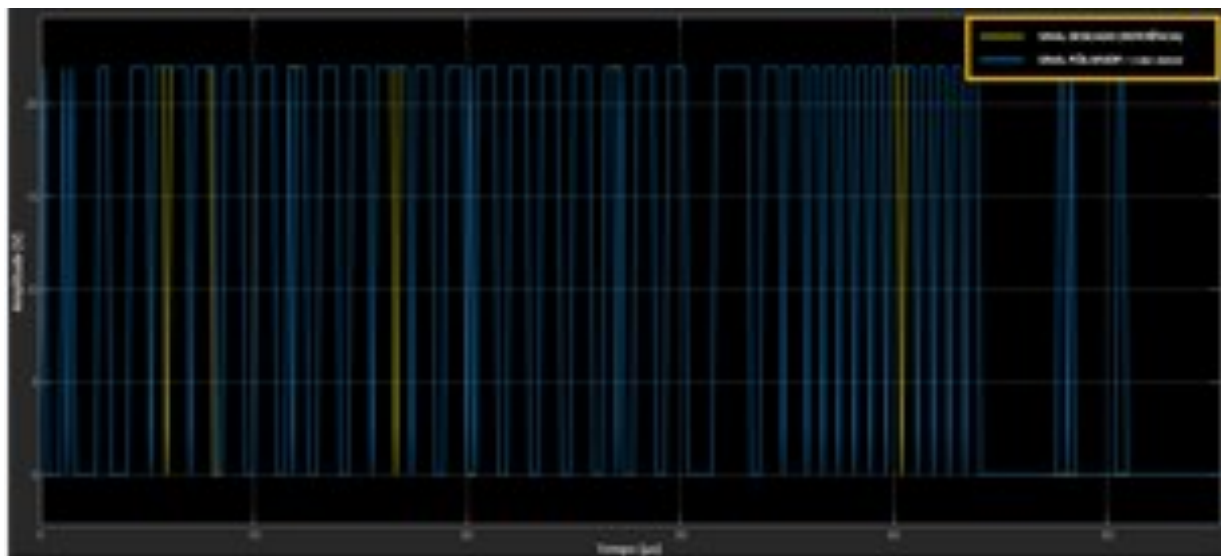
sinais e da preservação do sinal de interesse, recorre-se ao algoritmo adaptativo MVDR. Utilizando-o em detrimento da *Phase Shift* beamformer e mantendo as condições impostas pela Tabela 2, são obtidos resultados significativamente melhores com relação à reconstrução do sinal, conforme se observa pelas Figuras 5 e 6.

Figura 5: Sinal desejado x Sinal após "MVDR" ("sinal desejado + ruído + *jamming*")



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 6: Sinal desejado x Sinal após "MVDR" ("sinal desejado + ruído + *jamming*")



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Na Figura 6, 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%.

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.

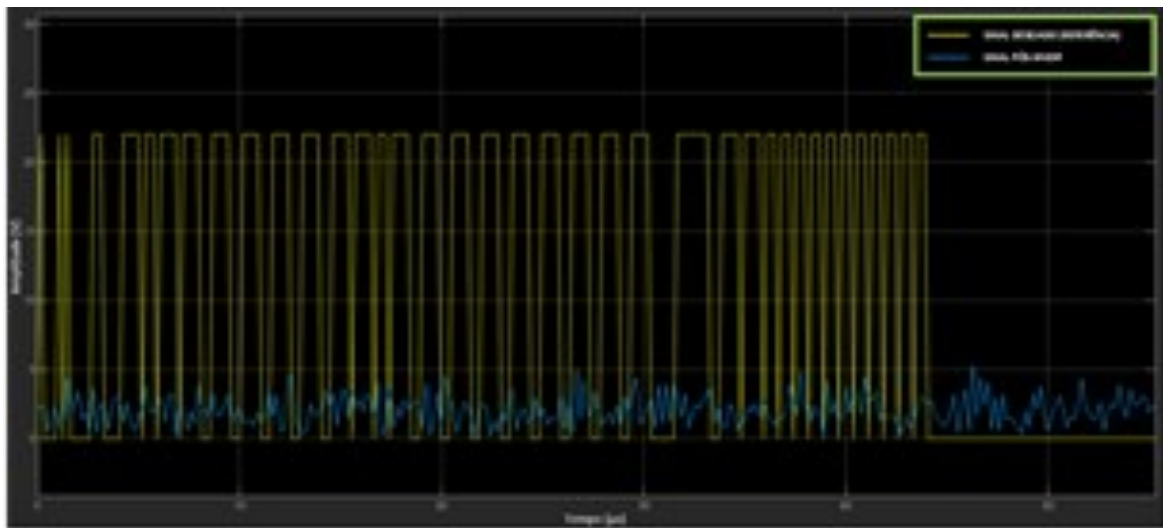
Diante do exposto, convém buscar a constatação dessas considerações em termos quantitativos. Para tanto, a Tabela 3 estipula os atributos utilizados nesse caso. Trata-se de uma simulação de ambientes complexos, em que há uma defasagem entre a DOA estimada e a DOA real do sinal desejado.

Tabela 3 - Parâmetros adicionais para o cenário "sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA"

Parâmetro	DOA
Sinal desejado	45° em azimute e 10° em elevação
Estimativa do sinal	43° em azimute e 10° em elevação
<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

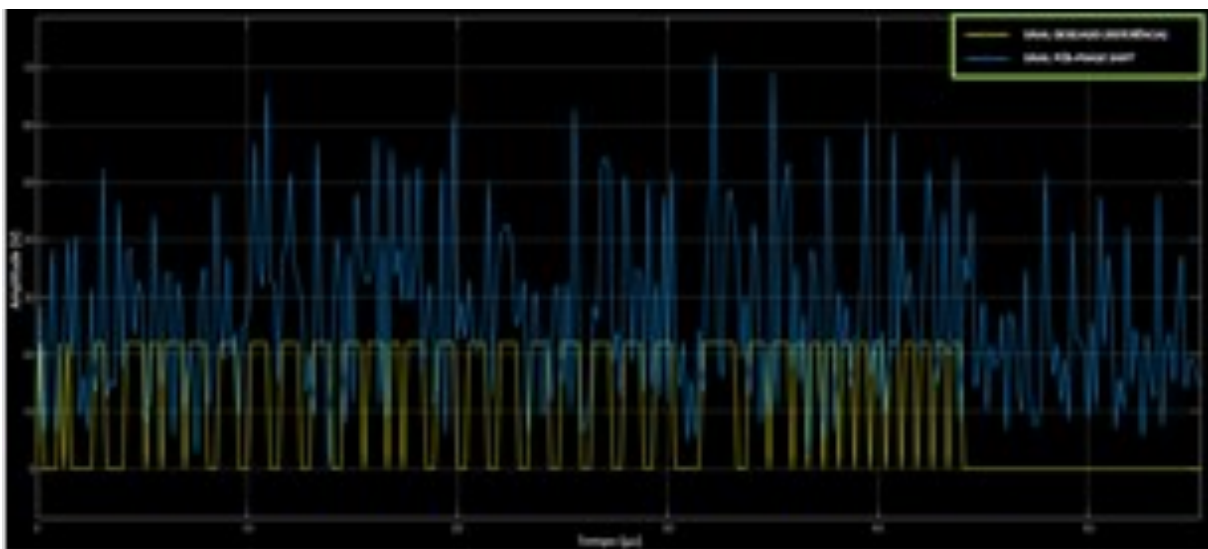
Fonte: Aatoria própria (2023)

Figura 7: Sinal desejado x Sinal após "MVDR" ("sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA")



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 8: Sinal desejado x Sinal após "MVDR" ("sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA") com limiar



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

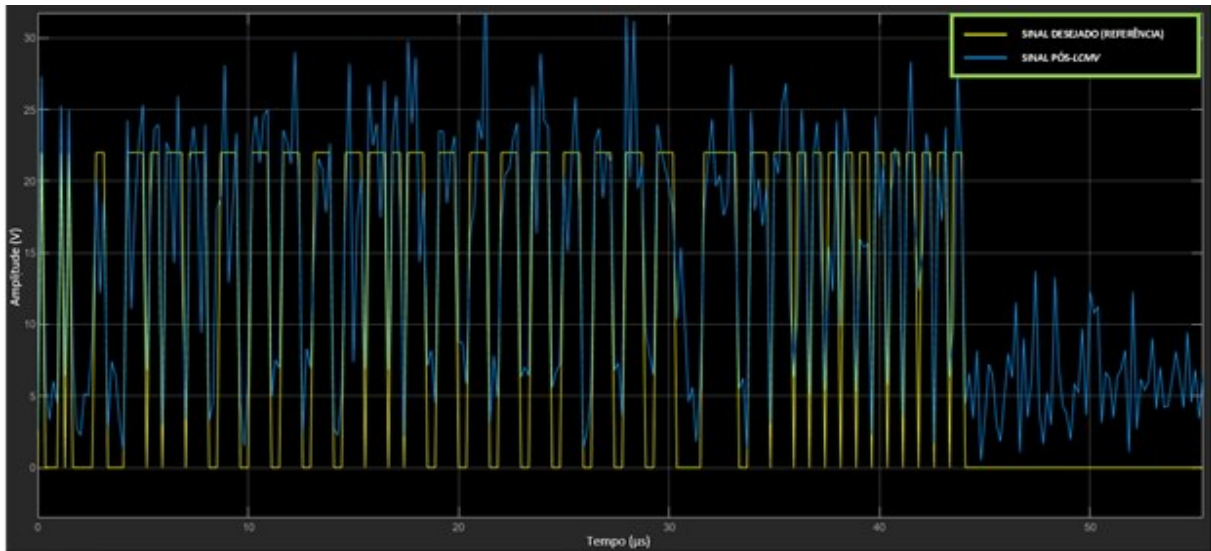
Dando prosseguimento ao raciocínio, na sequência é apresentado o algoritmo mais apropriado para lidar com ambientes operacionais complexos com a presença de *jamming* e estimativas imprecisas de DOA.

### 3.3 Terceiro caso: LCMV

Identifica-se o algoritmo adaptativo LCMV como alternativa ao MVDR. Assim, é esperada a

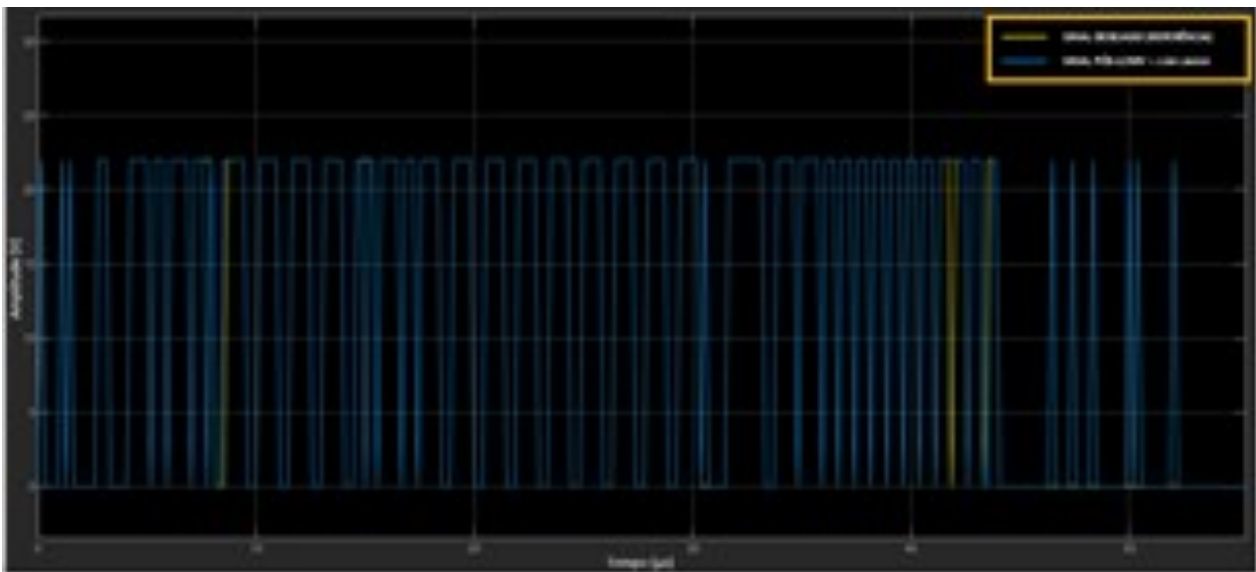
preservação do sinal em um intervalo maior de direções mediante o ajuste da matriz de restrições. As Figuras 9 e 10 exibem um padrão elevado de reconstrução do sinal, a uma taxa de bits errados de 3,6%. A Tabela 3 é utilizada como referência das condições adotadas nas simulações, ao passo que a matriz de restrições adotada nas simulações estipula o desvio da estimativa da DOA em  $\pm 2^\circ$ .

Figura 9: Sinal desejado x Sinal após "LCMV" ("sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA")



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 10: Sinal desejado x Sinal após "LCMV" ("sinal desejado + ruído + *jamming* + imprecisões de estimativa da DOA") com limiar



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

É possível descrever, pela Tabela 4, as taxas de bits errados calculadas no decorrer das

Tabela 4: Compêndio de taxas de bits errados calculadas durante a pesquisa

Cenário	Técnica / Algoritmo empregado		
	<i>Phase Shift</i>	MVDR	LCMV
Com Interferências	<b>Saturação</b>	<b>3,56 %</b>	3,6 %
Com Interferências e DOA imprecisas	Saturação	<b>Anula- ção</b>	<b>3,6 %</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Os valores em negrito correspondem àqueles descritos no decorrer da seção. 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 se limitar 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 por Strohmeier et al. (2014), 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, nota-se que o algoritmo adaptativo LCMV mantém certa regularidade frente à progressão de complexidade dos ambientes, o que não é observado nos demais métodos testados. 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*.

## 5 CONCLUSÃO

Os receptores ADS-B podem ser impactados negativamente por medidas de ataque eletrônico que afetem a disponibilidade dos sinais. Nesse a presente pesquisa examinou conceitos e conduziu experimentos que pudessem fundamentar a resposta da questão

simulações:

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 ADS-B é considerado o estandarte das iniciativas de modernização do sistema de gerenciamento de tráfego aéreo em nível global. A partir da exposição de seus princípios básicos de funcionamento, identificou-se que a vantagem da transmissão de dados em radiodifusão poderia se tornar 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*.

Os resultados das simulações 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.

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 correspondente à 4,16%.

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.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- BALANIS, Constantine A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 4. ed. Hoboken, Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 1104 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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, 2005. 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.
- 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.



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. 2014.

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 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.

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