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

DETECÇÃO POR RADAR E CLASSIFICAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS



PRIMEIRO-TENENTE PAULO ROBERTO OLIVEIRA MARTINS FILHO

Rio de Janeiro 2023

PRIMEIRO-TENENTE PAULO ROBERTO OLIVEIRA MARTINS FILHO

DETECÇÃO POR RADAR E CLASSIFICAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS

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

Orientadores: CMG (RM1) Henrique Luiz Neto CT Willian Sathler Lino Soares

CIAA Rio de Janeiro 2023

PRIMEIRO-TENENTE PAULO ROBERTO OLIVEIRA MARTINS FILHO DETECÇÃO POR RADAR E CLASSIFICAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS

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

Aprovada em 23/11/2023

Banca Examinadora:

Henrique Luiz Neto - CIAA

Willian Sathler Lino Soares, MSc - CASOP

Beatriz Alencar Ribeiro, MSc - CIAA

William Sollaler Sino Sources

CIAA Rio de Janeiro 2023

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do presente curso.

Aos meus pais e irmãs, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Aos amigos do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Guerra Eletrônica, pela amizade que se faz presente desde os tempos do Colégio Naval.

Aos meus orientadores, CMG (RM1) Henrique Luiz Neto e CT Willian Sathler Lino Soares, pelos ensinamentos e orientações que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de aperfeiçoamento profissional.

"A vitória sorri àqueles que antecipam o caráter da guerra e não aos que esperam para se adaptar depois que ela ocorre"

Giulio Douhet

DETECÇÃO POR RADAR E CLASSIFICAÇÃO DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS

Resumo

O crescimento na utilização de aeronaves remotamente pilotadas (ARP), comumente conhecidas como drones, e a semelhança de seus perfis de voo com os pássaros instigou a demanda por sistemas mais eficientes de detecção e classificação destes objetos. Este estudo teve como objetivo avaliar, mediante simulações em MATLAB, a potencialidade do efeito Micro-Doppler (MD) na identificação e categorização de ARP, focando, adicionalmente, na distinção desses veículos em relação às aves. Para tal, adotou-se uma abordagem metodológica que engloba uma revisão bibliográfica minuciosa para elucidar os princípios atrelados à detecção por radar, compreendendo a influência exercida pelas bandas de frequência no reconhecimento de alvos de menor porte. A pesquisa buscou, ainda, entender os desafios intrínsecos à detecção de objetos com RCS (Radar Cross Section) diminuta, enfatizando as nuances envolvidas na identificação entre drones e pássaros. Como instrumento complementar, simulações foram executadas no software MATLAB para analisar o comportamento do efeito MD em diferentes ambientes. Os resultados destas simulações foram confrontados, consolidando uma análise crítica que visa validar a abordagem proposta. As descobertas desta investigação fornecem insights valiosos para aprimoramentos futuros em sistemas de detecção e reforçam a viabilidade do uso do efeito micro-Doppler como uma ferramenta diferenciadora na identificação de ARP.

Palavras- chave: Detecção radar; Aeronave Remotamente Pilotada; Micro-doppler.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 Apresentação do Problema	6
1.2 Justificativa e Relevância	6
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo Geral	6
1.3.2 Objetivos Específicos	6
1.4 Metodologia	7
2 FUNDAMENTOS DA DETECÇÃO POR RADAR	7
2.1 História e Evolução dos Radares	7
2.2 Princípios básicos da detecção por radar	9
2.2.1 Determinação da distância de um alvo	10
2.2.2 Direcionalidade e foco do feixe radar	10
2.2.3 Resolução em distância	11
2.2.4 O Efeito Doppler	14
2.3 Correlação entre bandas de frequência e detecção radar	14
2.3.1 Influência das Bandas de Frequência na Detecção Radar	16
2.3.2 Vantagens e desvantagens das diferentes bandas na detecção de alvos de baix	(a RCS17
3 DESAFIOS NA DETECÇÃO DE ALVOS DE BAIXA RCS	18
3.1 Problemas associados à detecção de alvos de baixa RCS	
4 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ARP	20
4.1 Técnicas visuais e detecção infravermelha	20
4.2 Técnicas acústicas	21
4.3 Técnicas baseadas em rádio frequência	22
4.4 Técnica baseada em detecção por radar	
4.4.1 Características e exemplos de radares específicos para detecção de ARP	24
5 O EFEITO MICRO-DOPPLER	26
5.1 Origens e características do Efeito Micro-Doppler.	26
5.2 Aplicações do Efeito Micro-Doppler na Detecção de ARP	27
5.3 Vantagens e limitações do Micro-Doppler na discriminação entre ARP e p	ássaros.28

6 CATEGORIAS DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS	29
6.1 Pelo peso e tamanho	30
6.2 Pela altitude operacional e autonomia	
7 MODELOS MATEMÁTICOS DOS SINAIS DO ECO PROVENIENTE DE	E ARPs
E PÁSSAROS	32
7.1 Modelo matemático do sinal do eco proveniente de ARPs	
7.2 Modelo Matemático do Movimento de Batida de Asas de Pássaros	
8 SIMULAÇÕES DO EFEITO MD PRODUZIDO POR ARPS E PÁSSAROS	3 41
8.1 Simulação do Efeito MD produzido por ARPs	41
8.2 Simulação do Efeito MD produzido por pássaros	42
8.3 Resultados Obtidos	46
8.3.1 Análise das simulações do Efeito Micro-Doppler produzido por ARPs	46
8.3.2 Análise das simulações do Efeito Micro-Doppler produzido por pássaros	54
9 CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	60
ANEXO A - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA ARP MAVIC PRO	62
ANEXO B - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA ARP INSPIRE 1	63

1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização das Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP), popularmente conhecidos como *drones*, tem sido observada em diversos contextos, desde aplicações lúdicas até finalidades comerciais e estratégicas. Em meio a essa popularização, emergem desafios em termos de monitoramento e segurança, sobretudo no que tange à capacidade de discernir e controlar o tráfego desses dispositivos, particularmente em zonas sensíveis.

1.1 Apresentação do Problema

Em que medida é possível otimizar a precisão na detecção e classificação de ARPs através da tecnologia radar, de forma a distingui-los eficazmente de entidades similares, como pássaros, em ambientes onde a coexistência é uma constante?

1.2 Justificativa e Relevância

A proliferação dos *drones* no espaço aéreo contemporâneo instiga questões relativas à segurança e à privacidade. Nesse contexto, assegurar uma detecção e classificação apurada destes dispositivos torna-se premente. Esse discernimento, especialmente quando contraposto a seres como os pássaros, é fundamental para minimizar falsos positivos e potencializar a eficácia das respostas de sistemas defensivos e autoridades competentes.

1.3 Objetivos

Analisar o método detecção por radar e classificação de ARPs, principalmente o efeito Micro-Doppler.

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar, por meio de ampla revisão bibliográfica e simulações em MATLAB, a potencialidade do efeito micro-Doppler (MD) na detecção por radar e classificação de ARP, e de maneira complementar a diferenciação em relação aos pássaros.

1.3.2 Objetivos Específicos

No que se refere aos objetivos específicos, este trabalho se propõe a elucidar os princípios intrínsecos à detecção por radar e entender a influência das bandas de frequência na identificação de alvos de menor envergadura. Adicionalmente, pretende-se investigar os

obstáculos intrínsecos à identificação de alvos com RCS (*Radar Cross Section*) reduzida, com ênfase na dicotomia na identificação entre *drones* e aves. O estudo também abordará a execução de simulações no software MATLAB para interpretar a manifestação do efeito MD em variados cenários. A culminância deste enfoque se dará com o confronto dos dados simulados no intuito de validar a proposta metodológica apresentada.

1.4 Metodologia

O escopo deste trabalho é fundamentado em uma abordagem híbrida, que entrelaça uma meticulosa revisão bibliográfica com a experimentação prática. Inicialmente, será empreendida uma imersão teórica acerca da detecção radar, da manifestação Micro-Doppler e das adversidades atreladas à detecção de ARPs. Posteriormente, simulações serão arquitetadas no ambiente MATLAB, objetivando discernir as nuances do efeito MD em distintas situações. A culminância deste estudo dar-se-á mediante a análise e confrontação dos resultados simulados, visando corroborar a efetividade do método sugerido.

2 FUNDAMENTOS DA DETECÇÃO POR RADAR

Esta seção tem como objetivo realizar uma abordagem técnica e conceitual dos princípios básicos que envolvem os radares e a detecção realizada por este sensor, de forma a oferecer o embasamento conceitual necessário para o entendimento do conteúdo das próximas seções.

2.1 História e Evolução dos Radares

A história da tecnologia radar, representada pelo acrônimo "*Radio Detection and Ranging*", tem origens no início do século XX e é profundamente entrelaçada com a evolução tecnológica global, continuamente moldada pelas necessidades emergentes, seja em contextos militares ou civis.

De acordo com Chernyak (2009), a concepção inicial da detecção por meio de ondas de rádio data do final do século XIX. Nikola Tesla, em 1904, tinha ideias sobre a detecção remota de objetos usando ondas de rádio. Embora muitos desses conceitos iniciais fossem rudimentares, os fundamentos para o desenvolvimento subsequente do radar estavam sendo estabelecidos. Contudo, foi na década de 1930 que a tecnologia do radar começou a materializar-se de maneira mais concreta, motivada principalmente pela iminente ameaça de conflitos aéreos na Europa. Em 1935, Sir Robert Watson-Watt, um físico britânico, demonstrou

o que é frequentemente reconhecido como o primeiro sistema radar funcional, capaz de detectar aeronaves a distâncias de vários quilômetros.

A Segunda Guerra Mundial foi, indiscutivelmente, o período que solidificou o papel do radar como ferramenta estratégica. Durante esse período, foram desenvolvidos sistemas radar que abrangiam desde a detecção e rastreamento de aeronaves inimigas, até a assistência em operações de bombardeio e navegação. Foi também durante esta época que emergiu o conceito de radar Doppler, um sistema que, aproveitando a mudança de frequência das ondas refletidas por um objeto em movimento, permitia não apenas a detecção, mas também a determinação da velocidade do objeto (idem).

Com o final da guerra e o início da Guerra Fria, os radares passaram por avanços tecnológicos notáveis. O radar de abertura sintética (SAR), por exemplo, emergiu como uma ferramenta valiosa, proporcionando imagens de alta resolução do solo a partir de plataformas aéreas ou espaciais. O SAR utiliza o movimento da plataforma (como um satélite ou aeronave) para simular uma antena muito maior, permitindo assim a resolução de detalhes muito mais finos do que seria possível com uma única antena.

A era contemporânea testemunhou avanços ainda mais significativos. O radar cognitivo, uma fusão da clássica tecnologia radar com os princípios da inteligência artificial e aprendizado de máquina, representou uma mudança paradigmática. Ao adaptar-se dinamicamente ao ambiente, essa variante de radar pode reconfigurar-se em tempo real para evitar interferências, otimizar a detecção e identificar alvos com uma precisão sem precedentes em ambientes congestionados ou desafiadores.

O Radar de Varredura Eletrônica Ativa (AESA) também merece destaque. Em vez de utilizar uma única antena rotativa ou um conjunto fixo de antenas, os sistemas AESA usam múltiplos módulos transmissores/receptores, permitindo que feixes de rádio sejam direcionados quase instantaneamente em diferentes direções. Isso resulta em rastreamento de múltiplos alvos simultaneamente, resposta mais rápida a ameaças emergentes e uma robustez geral aumentada contra táticas de interferência (CHERNYAK, 2009).

Os radares quantitativos, ainda em estágios iniciais de pesquisa e desenvolvimento, prometem revolucionar ainda mais o campo. Ao explorar os princípios da mecânica quântica, busca-se desenvolver sistemas capazes de detectar objetos que permaneceriam invisíveis para os radares tradicionais, abrindo portas para aplicações em segurança nacional, pesquisa espacial e muito mais.

Além dos usos militares, os radares modernos encontraram aplicações em inúmeras áreas civis. No tráfego aéreo, são indispensáveis para o controle e monitoramento de aeronaves.

Em meteorologia, são essenciais para rastrear e prever formações climáticas. Na medicina, técnicas baseadas em radar estão sendo exploradas para aplicações de imagem e monitoramento.

Segundo Chernyak (2009), em síntese, a história do radar é uma sequência de inovação e adaptação. Das primeiras ideias de detecção à distância até as aplicações da tecnologia contemporânea, o radar destaca-se como um dos maiores testemunhos da capacidade humana de inovar e superar desafios. Em um mundo em constante mudança, é certo que a evolução do radar continuará adaptando-se e moldando-se às necessidades emergentes da humanidade.

2.2 Princípios básicos da detecção por radar

O radar é uma combinação multifacetada de física e engenharia, sendo uma das tecnologias mais impactantes do século XX. Sua invenção foi um divisor de águas em domínios que vão da aviação e navegação até a meteorologia e sistemas defensivos. Em sua essência, o radar baseia-se na emissão, reflexão e recepção de ondas eletromagnéticas, com a finalidade primordial de identificar, localizar e, frequentemente, determinar a velocidade de objetos a distâncias consideráveis (CHERNYAK, 2009).

O funcionamento básico de um radar começa com a emissão de um pulso de energia eletromagnética em direção a um espaço específico. Quando esse pulso encontra um objeto, parte da energia é refletida e retorna ao radar, servindo como indicador da presença e localização do objeto. Este retorno é frequentemente referido pelo termo "eco".

O espectro eletromagnético abrange uma gama vasta de frequências. Dentro deste espectro, o radar opera majoritariamente nas faixas de rádio e micro-ondas. A escolha precisa da frequência é um exercício delicado e estratégico, com implicações diretas na capacidade do radar de penetrar em certos meios, na resolução de alvos e, claro, na distância máxima de detecção efetiva. Por exemplo, radares que funcionam na faixa de frequência VHF, devido à sua longa onda, são frequentemente capazes de detectar alvos furtivos, que são projetados especificamente para evadir radares de frequência mais alta (SKOLNIK, 2008).

A reflexão do pulso eletromagnético por um objeto é influenciada por diversas características deste. A forma, tamanho, composição material e orientação do objeto no momento da reflexão determinam a natureza e magnitude do eco. O conceito de Seção Reta Radar é empregado para quantificar o quanto um alvo é "visível" para um radar. Em termos simples, o RCS é uma métrica que representa a dispersão do sinal incidente por um alvo.

2.2.1 Determinação da distância de um alvo

A determinação da distância de um alvo é uma das tarefas primordiais de um sistema radar. A capacidade de localizar um objeto no espaço e avaliar sua distância em relação ao radar é fundamental para diversas aplicações, desde a navegação aérea até o monitoramento de fenômenos meteorológicos. Mas como exatamente um radar, utilizando ondas eletromagnéticas, consegue calcular essa distância?

Segundo Skolnik (2008), a base do princípio de determinação da distância em sistemas radar reside no conceito do tempo de ida e volta do sinal emitido. Quando um radar emite uma onda eletromagnética, essa onda viaja pelo espaço até encontrar um alvo, refletindo de volta ao radar. O tempo que leva para essa onda sair do radar, atingir o alvo e retornar é diretamente proporcional à distância do objeto.

Considerando que as ondas eletromagnéticas se propagam aproximadamente à velocidade da luz (c), que é cerca de (3 x 10⁸) metros por segundo no vácuo, podemos usar este valor para calcular a distância. O cálculo leva em consideração o tempo total do percurso de ida e volta, mas é crucial lembrar que estamos interessados apenas na distância unidirecional até o alvo. Por isso, o cálculo envolve a divisão do tempo total por dois.

A equação que representa essa relação é:

$$R = \frac{c\Delta t}{2} \tag{1.1}$$

Nesta equação:

- R é a distância do alvo em relação ao radar.

- c é a velocidade da luz.

Essa técnica de determinação de distância é frequentemente referida como ranging e é fundamental para a operação de qualquer sistema radar. Através desse simples, mas poderoso princípio, o radar pode identificar, localizar e monitorar objetos em vastas distâncias, fornecendo informações cruciais para inúmeras aplicações no mundo moderno.

2.2.2 Direcionalidade e foco do feixe radar

O radar, enquanto ferramenta de detecção e monitoramento, não apenas precisa determinar a distância de um alvo, mas também a sua direção no espaço. Para isso, o sistema

de radar emprega o que chamamos de direcionalidade do feixe e seu foco. Compreender esses conceitos é crucial para entender a capacidade do radar de "apontar" para determinadas regiões do espaço e receber informações específicas sobre elas.

A direcionalidade do feixe de radar refere-se à capacidade do sistema de focar suas ondas eletromagnéticas em uma direção específica, ao invés de irradiá-las uniformemente em todas as direções. Essa focagem é alcançada principalmente através do design da antena e dos componentes associados. As antenas direcionais, como antenas parabólicas, concentram a energia do radar em um feixe estreito que pode ser orientado em direções específicas.

A largura do feixe, frequentemente medida em graus, determina quão "estreito" ou "largo" é o foco desse feixe. Um feixe estreito proporciona maior resolução angular, permitindo ao radar distinguir alvos próximos entre si em termos angulares. Em contraste, um feixe mais largo cobre uma área maior, mas com menor precisão angular.

A orientação ou "apontamento" do feixe é alcançada rotacionando a antena. Isso pode ser observado, por exemplo, em radares de controle de tráfego aéreo, onde a antena gira continuamente, varrendo todo o espaço ao seu redor. Em alguns sistemas avançados, a orientação do feixe também pode ser ajustada eletronicamente, sem a necessidade de movimento físico da antena, utilizando a técnica chamada de formação de feixe eletrônico (SKOLNIK, 2001).

Além da direcionalidade, o foco do feixe também é um aspecto vital. Isso se refere à capacidade do radar de "afinar" seu feixe, ajustando sua largura efetiva. Um feixe mais focado oferece melhor resolução e capacidade de detecção, especialmente em ambientes com muitos alvos próximos. Por outro lado, um feixe mais difuso pode cobrir uma área maior, mas com menor precisão.

2.2.3 Resolução em distância

A resolução em distância, um pilar fundamental na teoria e prática de radar, referese à capacidade de um sistema de radar de distinguir e resolver dois ou mais alvos que estão proximamente colocados no eixo de alcance. Esse conceito, enquanto aparentemente simples, é profundamente enraizado em princípios matemáticos e físicos e tem implicações significativas no *design* e operação de sistemas de radar.

Para iniciar a discussão, é imperativo relembrar a própria natureza do radar, que é essencialmente a detecção e determinação da distância usando ondas de rádio. Quando o radar transmite um pulso eletromagnético, essa onda viaja através do espaço, reflete-se em alvos e

retorna ao radar. Analisando o tempo que leva para o pulso refletido retornar, podemos determinar a distância do alvo.

Aqui reside o cerne da questão da resolução em distância. Consideremos dois alvos que estejam muito próximos um do outro. Se o pulso transmitido pelo radar for longo o suficiente, o reflexo do primeiro alvo pode ainda estar retornando quando o reflexo do segundo alvo começar a chegar. Nesse cenário, os retornos se sobreporiam e o radar perceberia os dois alvos como uma única entidade. Esta incapacidade de discernir alvos proximamente colocados é o desafio que a resolução em distância se propõe a superar (SKOLNIK, 2008).

Matematicamente, a resolução em distância é definida pela expressão:

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} \tag{1.2}$$

onde:

- ΔR é a resolução em distância;

- c é a velocidade da luz no vácuo, aproximadamente (3×10^8) m/s;

- τ é a largura do pulso transmitido.

A divisão por dois é uma consequência do fato de que o sinal viaja até o alvo e retorna, ou seja, o tempo total de trânsito é o dobro da distância até o alvo.

Contudo, simplesmente reduzir a largura do pulso (e, assim, melhorar a resolução em distância) não é isento de desafios. Pulsos curtos têm menor energia total e, portanto, um alcance efetivo mais curto. Aqui, entra em cena um dos marcos mais significativos na tecnologia de radar: a compressão de pulso.

A compressão de pulso envolve a transmissão de pulsos modulados em frequência ou fase, com duração relativamente longa, e a subsequente "compressão" desse pulso no processamento para obter uma resolução em distância equivalente a um pulso muito mais curto. Uma técnica comum é a modulação de frequência de varredura linear (LFM), na qual a frequência do pulso é linearmente modulada ao longo de sua duração.

Segundo Skolnik (2008), o princípio fundamental por trás da compressão de pulso é que a largura do pulso no domínio da frequência (banda larga) pode ser traduzida em alta resolução no domínio do tempo (ou distância). Quando o eco refletido é recebido, um processo de filtragem correlaciona o sinal recebido com a versão transmitida, resultando em um pico agudo que tem uma largura efetiva muito menor que o pulso original.

A capacidade de um radar em discernir alvos que estão proximamente colocados no eixo de alcance, conhecida como resolução em distância, é fundamental para muitas aplicações práticas. Em ambientes operacionais modernos, onde os cenários são cada vez mais complexos e congestionados, aprimorar essa resolução é imperativo.

A resolução em distância de um radar está diretamente relacionada à duração do pulso transmitido. Teoricamente, ao diminuir a duração deste pulso, a resolução é melhorada. Entretanto, isso pode diminuir a quantidade de energia transportada pelo pulso, resultando em uma redução do alcance efetivo do radar (SKOLNIK, 2008). Uma técnica que surgiu para contornar essa limitação é a compressão de pulso. Ao modularem o pulso transmitido em frequência ou fase e, em seguida, processá-lo para "comprimir" no domínio do tempo, consegue-se melhorar a resolução sem sacrificar o alcance. Uma das modulações mais comuns utilizadas é a Modulação de Frequência de Varredura Linear (LFM).

Outra abordagem para aprimorar a resolução em distância envolve a utilização de transmissões de banda larga. Simplificando, uma maior largura de banda leva a uma melhor resolução. Um exemplo prático disto é o Radar de Abertura Sintética (SAR, do inglês *Synthetic Aperture Radar*), que se aproveita do movimento da plataforma de radar para simular uma antena de dimensões muito maiores, resultando em uma resolução ampliada.

Paralelamente, a codificação de onda é uma técnica que permite ao radar transmitir pulsos mais longos e ainda assim manter uma alta resolução em distância. Através da codificação, seja pela modulação de fase ou outras técnicas, o radar pode extrair uma riqueza maior de informações do sinal refletido, auxiliando na distinção e identificação de alvos próximos. Além disso, o avanço em técnicas de processamento de sinal, como a filtragem por correlação, tem permitido que se extraia e resolva informações dos ecos recebidos com uma precisão sem precedentes.

Na fronteira da tecnologia radar, encontramos aplicações do conceito MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*), originalmente concebido para telecomunicações. Em sistemas de radar, o uso de múltiplas antenas para transmissão e recepção permite explorar a diversidade espacial para obter ganhos significativos em resolução em distância (SKOLNIK, 2008).

Além de todas essas técnicas, o radar cognitivo, com sua capacidade adaptativa e de aprendizado, traz um novo paradigma para a otimização da resolução em distância. Ele pode ajustar seus parâmetros de operação em tempo real, como largura de banda e duração do pulso,

baseado na análise do ambiente e dos alvos, maximizando assim a resolução conforme as necessidades específicas de cada situação.

2.2.4 O Efeito Doppler

O efeito Doppler é um fenômeno físico que descreve a alteração na frequência ou comprimento de onda de uma onda em relação a um observador em movimento. Esse efeito foi primeiramente observado e descrito pelo cientista austríaco Christian Doppler em 1842, e, desde então, encontrou inúmeras aplicações práticas, especialmente no campo da detecção por radar (CHERNYAK, 2009).

Para compreendermos o efeito Doppler, imaginemos uma fonte de onda, como um carro que emite um som enquanto se move em uma estrada. Se você estiver parado e o carro se aproximar de você, perceberá um aumento na frequência do som (um tom mais agudo). Por outro lado, à medida que o carro se afasta de você, a frequência diminuirá (um tom mais grave). Este é o efeito Doppler em ação: a mudança aparente na frequência devido ao movimento relativo entre a fonte de onda e o observador.

No contexto do radar, o efeito Doppler é crucial para determinar a velocidade de um objeto. Quando o radar emite uma onda eletromagnética e esta onda atinge um objeto em movimento, a onda refletida de volta ao radar terá sua frequência alterada se o objeto estiver se movendo em direção ou afastando-se do radar.

Essa capacidade de medir a frequência Doppler dá ao radar a habilidade única de identificar não apenas a localização, mas também a velocidade de um alvo. Isso é particularmente útil em aplicações como controle de tráfego aéreo, onde se requer monitorar a velocidade e direção das aeronaves, ou em aplicações militares, onde a velocidade de um alvo pode fornecer informações táticas valiosas.

2.3 Correlação entre bandas de frequência e detecção radar

A operação dos sistemas de radar em diferentes bandas de frequência está intrinsecamente ligada aos comprimentos de onda dessas frequências e às características físicas associadas. O entendimento das diferentes bandas de frequência e seus comprimentos de onda é crucial para compreender o desempenho, as limitações e as aplicações ideais de um sistema radar.

Em termos conceituais, o espectro eletromagnético é uma contínua distribuição de frequências de radiação eletromagnética, que vão desde as ondas de rádio, passando por micro-

ondas até raios X e gama. Dentro deste espectro, as frequências utilizadas pelos radares são geralmente classificadas em várias bandas, cada uma com seu respectivo intervalo de frequência.

O comprimento de onda, que é inversamente proporcional à frequência, determina várias características de propagação e interação do sinal radar com o ambiente e os alvos. Por exemplo, comprimentos de onda mais longos, encontrados em frequências mais baixas, são menos afetados pela precipitação e podem penetrar certos tipos de coberturas e obstáculos, como a folhagem.

Agora, para uma apreciação técnica das bandas de frequência s e suas características, segundo Skolnik (2008):

- I) Bandas de Baixa Frequência (VHF e UHF): Estas bandas operam em frequências que vão desde os 30 MHz até 1 GHz, aproximadamente. Devido ao seu comprimento de onda mais longo, radares que operam nestas bandas são capazes de detectar aeronaves furtivas e são menos afetados por contra-medidas eletrônicas. No entanto, devido ao seu maior comprimento de onda, a resolução espacial pode ser menor em comparação com radares de frequências mais altas.
- II) Banda L: Variando de 1 a 2 GHz, esta banda é comumente usada para aplicações de radar de longo alcance, em especial para radares de alerta antecipado. Seu comprimento de onda mais longo permite uma melhor penetração através da atmosfera e da precipitação.
- III) Banda S: Na faixa de 2 a 4 GHz, é frequentemente usada em sistemas de radar de vigilância aérea e meteorológicos devido à sua capacidade de combinar alcance e resolução aceitáveis.
- IV) Banda C e Banda X: Estas bandas, que vão de 4 a 8 GHz e de 8 a 12 GHz, respectivamente, são amplamente utilizadas para radares de controle de tráfego aéreo e aplicações de radar de navegação. Elas fornecem uma boa combinação de resolução e alcance.
- V) Bandas de Alta Frequência (Ku, K, Ka): Variando de 12 a 40 GHz, estas bandas são caracterizadas por seus curtos comprimentos de onda, o que permite sistemas de radar com antenas mais compactas e maior resolução. São comuns em aplicações de mapeamento, radares de veículos e algumas aplicações de defesa. Contudo, são mais suscetíveis à atenuação atmosférica.

A escolha da banda de frequência para uma aplicação radar específica é influenciada por vários fatores, incluindo o tipo de alvo, o ambiente operacional, a distância de detecção desejada e a resolução necessária. Em muitos casos, trade-offs são necessários. Por exemplo, enquanto uma banda mais alta pode fornecer melhor resolução, ela pode ser mais afetada pela atenuação atmosférica ou precipitação.

Assim, a compreensão detalhada das bandas de frequência e seus comprimentos de onda é crucial para a eficácia e eficiência da detecção e rastreamento de alvos em diferentes cenários e condições operacionais. É este entendimento que possibilita o desenvolvimento e a implementação de sistemas de radar altamente adaptados às necessidades específicas de suas aplicações.

2.3.1 Influência das Bandas de Frequência na Detecção Radar

A detecção por radar fundamenta-se na emissão e recepção de ondas eletromagnéticas. Esse mecanismo, em sua essência, parece simples: um sinal é transmitido e, ao encontrar um objeto, é refletido de volta, permitindo a identificação desse alvo. Entretanto, a operação do radar e sua eficácia dependem profundamente das características das ondas utilizadas, em particular, da frequência e, por consequência, do comprimento de onda.

A frequência de um sinal radar determina diretamente o seu comprimento de onda e, desse modo, diferentes frequências têm propriedades distintas na interação com os alvos e com o ambiente. Por exemplo, alvos diversos, seja um grande avião metálico, um pequeno *drone* de plástico ou um pássaro, apresentarão respostas distintas às ondas de radar, e essa interação será modulada pela frequência do sinal.

Em frequências mais baixas, como nas bandas VHF e UHF, os comprimentos de onda são mais longos. Estas conseguem detectar alvos grandes, como aeronaves e navios, porém não são tão sensíveis a pequenas características nos alvos. Essa insensibilidade faz com que a diferenciação entre alvos pequenos, como um drone e um pássaro, seja mais desafiadora. Por outro lado, frequências mais altas, como as bandas Ka ou Ku, têm comprimentos de onda mais curtos, o que permite detectar e diferenciar detalhes menores com maior eficácia.

Entretanto, as ondas de radar não operam em um vácuo. A atmosfera terrestre influencia a trajetória e a integridade do sinal. Em algumas bandas de frequência, especialmente as mais altas, a atenuação devido a fatores atmosféricos, como a umidade, chuva ou neblina, pode ser expressiva. Embora um radar em alta frequência possa teoricamente ter uma excelente resolução e capacidade de detectar alvos menores, seu desempenho pode ser comprometido em condições meteorológicas adversas. Além disso, fenômenos como a difração, que permite que ondas de radar contornem obstáculos, são mais proeminentes em frequências mais baixas.

Portanto, de acordo com Skolnik (2008), a seleção da banda de frequência para um sistema radar é uma decisão técnica crucial que balanceia diversos fatores. A resolução desejada, o tipo de alvo a ser detectado, as distâncias envolvidas e as condições ambientais sob as quais o radar operará são todas considerações pertinentes. Em última análise, a escolha da frequência determina um equilíbrio entre resolução, sensibilidade, alcance e capacidade de operar em diferentes condições atmosféricas, ilustrando a complexidade técnica por trás da operação dos sistemas de radar.

2.3.2 Vantagens e desvantagens das diferentes bandas na detecção de alvos de baixa RCS

Na detecção radar, o entendimento acerca das bandas de frequência e seus impactos na identificação e diferenciação de alvos é crucial. A eficiência com que um sistema de radar detecta e classifica objetos – especialmente alvos pequenos como drones ou pássaros – está intrinsecamente ligada à escolha da banda de frequência. Cada banda, devido às suas características de comprimento de onda e propagação, possui vantagens e desvantagens em determinadas aplicações e cenários.

- I) Vantagens e Desvantagens das Bandas Baixas (VHF, UHF):
- a) Vantagens: Os radares operando em bandas baixas são capazes de detectar alvos a grandes distâncias devido à baixa atenuação atmosférica dessas frequências. Essas bandas têm maior capacidade de difração, permitindo que as ondas contornem obstáculos físicos, tornando-as adequadas para detecção em áreas montanhosas ou urbanas. Estas também são menos sensíveis à interferência causada por fenômenos meteorológicos, como chuvas e neblinas.
- b) Desvantagens: a resolução é tipicamente mais baixa em bandas baixas, dificultando a distinção entre alvos pequenos e próximos entre si. A diferenciação entre um drone e um pássaro, por exemplo, pode ser mais desafiadora devido à falta de detalhamento.
- II) Vantagens e Desvantagens das Bandas Médias (L, S, C):
- a) Vantagens: oferecem um equilíbrio entre alcance e resolução, sendo versáteis para várias aplicações. Têm capacidade de penetração moderada, tornando-as úteis em ambientes com obstruções leves, como vegetação.
- b) Desvantagens: aumento da sensibilidade a interferências meteorológicas em relação às bandas mais baixas. A resolução, embora superior à das bandas baixas, pode ainda não ser suficiente para a identificação precisa de alvos muito pequenos.

- III) Vantagens e Desvantagens das Bandas Altas (X, Ku, Ka, W):
- a) Vantagens: estas bandas oferecem alta resolução, tornando-as ideais para detecção e diferenciação de alvos pequenos. Estas oferecem a capacidade de discernir detalhes finos e assim permite a classificação mais precisa de alvos, diferenciando, por exemplo, tipos específicos de drones ou até características do alvo.
- b) Desvantagens: são muito mais sensíveis a condições atmosféricas adversas. A chuva, neblina ou neve pode atenuar significativamente o sinal, reduzindo o alcance e a eficácia da detecção. Nestas bandas a difração é reduzida, tornando difícil para essas ondas contornarem obstáculos significativos.

O desafio na seleção da banda ideal para detecção de alvos pequenos está em equilibrar as necessidades de resolução e alcance com as limitações impostas pelo ambiente operacional e pelas características do alvo. Por exemplo, em ambientes urbanos com muitos obstáculos, uma banda média pode ser ideal, enquanto em áreas abertas onde a identificação precisa de alvos pequenos é crucial, as bandas mais altas são preferíveis.

3 DESAFIOS NA DETECÇÃO DE ALVOS DE BAIXA RCS

Em sistemas de radar, a Seção-Reta Radar, comumente referida por sua sigla em inglês, RCS (*Radar Cross Section*), é fundamental para determinar a detectabilidade de um objeto. Essa métrica representa a quantidade de energia do radar refletida de volta ao sistema pelo objeto em questão. Em termos mais simplificados, ela pode ser interpretada como a "visibilidade" de um alvo para um radar.

Embora intuitivamente possamos pensar que objetos maiores teriam RCS mais elevadas, esse não é sempre o caso. A RCS é comumente expressa em metros quadrados (m²) e sua magnitude não se correlaciona diretamente com o tamanho físico do alvo. Dessa forma, uma aeronave de combate, por exemplo, pode ter uma RCS projetada para ser menor do que um objeto consideravelmente menor, como um pássaro. Essa incongruência é o resultado da complexa interação de diversos fatores que influenciam a RCS.

Um desses fatores é a geometria do alvo. Enquanto formas simples, como esferas ou placas planas, possuem RCS previsíveis, objetos de geometria mais complexa, como aeronaves ou navios, têm uma RCS que varia significativamente dependendo do ângulo a partir do qual são observados. Juntamente com a geometria, os materiais de que o alvo é composto também desempenham um papel crucial; materiais que tendem a absorver a energia das ondas do radar em vez de refleti-las diminuem a RCS. Foi esse princípio que levou ao desenvolvimento de tecnologias *stealth* em aeronaves militares, onde materiais compostos e tratamentos de superfície específicos são empregados para dispersar ou absorver as ondas do radar. Adicionalmente, a orientação e o aspecto relativo de um alvo em relação à fonte do sinal radar são de suma importância, visto que a posição e o ângulo podem afetar drasticamente a energia refletida de volta ao radar.

Contudo, o desafio de detectar alvos com baixa RCS é uma preocupação significativa para sistemas de vigilância e defesa. Alvos que apresentam RCS reduzida podem escapar à detecção até que estejam perigosamente próximos, limitando assim o tempo de resposta. Além disso, a sua sinalização pode confundir-se facilmente com ruído de fundo, tornando a distinção entre o alvo e fenômenos naturais ou outros objetos irrelevantes um desafio. Tal problemática é ainda mais evidente quando consideramos objetos como *drones*, cuja RCS pode se assemelhar à de pássaros, complicando ainda mais a tarefa de detecção e classificação.

Para lidar com esses desafios, tem havido uma pressão constante no avanço de tecnologias e técnicas em sistemas de radar. A utilização de frequências de radar variáveis, implementação de técnicas avançadas de processamento de sinal e a integração de dados de múltiplos sensores estão entre as inovações buscadas para melhorar a detecção e monitoramento de alvos de baixa RCS. Em um mundo crescentemente complexo, onde a tecnologia *stealth* e os ARPs estão em rápida evolução, a necessidade de compreender e adaptar-se às nuances da RCS torna-se cada vez mais imperativa.

3.1 Problemas associados à detecção de alvos de baixa RCS

A detecção de alvos pequenos, em especial aqueles com baixa RCS (Seção-Reta Radar), coloca em destaque uma série de problemas técnicos e teóricos nos sistemas de radar. Para compreender esses desafios, é importante não apenas considerar o tamanho físico do alvo, mas também a complexidade das interações entre as ondas de radar e os alvos.

Em primeiro lugar, a física básica da propagação de ondas radar estabelece que alvos menores tendem a refletir menos energia de volta para o radar, o que diminui sua detectabilidade. Isso é particularmente problemático em ambientes onde o nível de ruído de fundo é significativo, como em zonas urbanas ou em ambientes naturais complexos. Em tais cenários, os retornos de alvos pequenos podem ser ofuscados por reflexões indesejadas provenientes de edifícios, árvores ou mesmo fenômenos atmosféricos.

Acrescentando à complexidade, os alvos de baixa RCS, como drones ou aeronaves furtivas, são projetados para minimizar a quantidade de energia refletida de volta ao radar. Eles

conseguem isso através de uma combinação de design aerodinâmico e materiais avançados que dissipam, absorvem ou dispersam a energia do radar. Isso significa que, além de serem intrinsecamente difíceis de detectar devido ao seu tamanho, esses alvos adicionam uma camada adicional de complexidade ao processo de detecção.

A velocidade e a altitude de voo de alvos pequenos também apresentam desafios específicos. Muitas ARPs, por exemplo, são capazes de voar a altitudes muito baixas, aproveitando o terreno para ocultar-se e operar abaixo da cobertura do radar. Suas velocidades podem variar drasticamente, desde pairar no local até voar em velocidades consideráveis. Essa ampla gama de comportamentos de voo requer sistemas de radar com capacidades de rastreamento altamente adaptáveis.

Do ponto de vista técnico, a resolução do radar torna-se uma questão crítica. Sistemas com baixa resolução em distância ou angular podem ter dificuldade em distinguir um alvo pequeno de outros objetos ou ruídos. Além disso, sistemas de radar que operam em certas bandas de frequência podem ser menos eficazes na detecção de alvos menores. Por exemplo, os radares que operam em bandas de frequência mais altas, como a banda X ou banda Ku, podem oferecer melhor resolução e, consequentemente, uma maior capacidade de detecção de alvos pequenos. No entanto, essas bandas também podem ser mais suscetíveis a atenuação atmosférica, limitando seu alcance efetivo (SKOLNIK, 2008).

Por fim, do ponto de vista do processamento de sinais, a capacidade de filtrar eficazmente o ruído de fundo e identificar sinais fracos associados a alvos pequenos é primordial. Isso pode exigir o uso de algoritmos avançados e capacidades computacionais robustas, particularmente em ambientes com alta densidade de alvos ou interferências.

4 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ARP

A detecção de drones é uma necessidade crescente em várias aplicações, desde a segurança aeroportuária até a defesa de instalações críticas. No cenário atual, onde o número de ARPs aumenta rapidamente, existem várias técnicas que são aplicadas para detectar e rastrear esses veículos aéreos não tripulados.

4.1 Técnicas visuais e detecção infravermelha

A detecção visual baseia-se na captura de imagens no espectro de luz visível. Os sistemas de detecção visual usam câmeras de alta resolução para identificar drones com base em sua aparência visual. Uma das principais vantagens desse método é a capacidade de obter

uma identificação clara do tipo e modelo de ARP, especialmente em condições de boa iluminação (OPROMOLLA, 2018).

Contudo, a detecção visual enfrenta desafios em certas condições ambientais. A presença de neblina, chuva ou poeira podem degradar significativamente a qualidade da imagem e tornar a detecção de drones mais difícil. Além disso, à noite, a detecção visual tornase quase impossível sem alguma forma de iluminação auxiliar. Por outro lado, a capacidade de utilizar análise de movimento e técnicas de processamento de imagem para identificar e rastrear drones em voo é uma força considerável desse método.

Já os sistemas de detecção por infravermelho (IR) funcionam capturando a radiação emitida ou refletida por um objeto na faixa do infravermelho. Todo objeto com temperatura acima do zero absoluto emite radiação infravermelha. Drones, em especial seus motores e baterias, tendem a emitir uma assinatura térmica distinguível que pode ser detectada por câmeras infravermelhas.

A principal vantagem dos sistemas IR é a capacidade de operar em condições de baixa luminosidade ou mesmo na total escuridão, já que eles não dependem da luz visível. Além disso, eles são menos afetados por obscuramentos como neblina ou fumaça. Contudo, em ambientes muito quentes ou quando o fundo tem uma temperatura similar ao do drone, pode haver desafios na diferenciação do alvo do seu entorno.

Em termos técnicos, a qualidade da detecção IR está fortemente ligada à sensibilidade do sensor e à resolução espacial. A habilidade de discernir pequenas diferenças de temperatura e identificar *drones* a distâncias significativas é crucial para a eficácia dessa técnica. Combinar detecção visual e infravermelha em um sistema multimodal é uma abordagem que vem ganhando popularidade. Tal combinação procura aproveitar as forças de cada método e mitigar suas fraquezas.

4.2 Técnicas acústicas

A detecção de *drones* através de técnicas acústicas é um domínio que explora a capacidade de identificar e localizar veículos aéreos não tripulados (VANTs) com base no som que eles produzem. Todo drone em funcionamento produz uma assinatura acústica. Esta emissão sonora provém, em grande parte, dos motores elétricos e das hélices em rotação. O perfil sonoro de um *drone* é distinto e pode variar de acordo com o modelo, tamanho, design da hélice, velocidade de operação e carga.

Estes sons, embora às vezes sejam quase inaudíveis ao ouvido humano em grandes distâncias, podem ser captados por microfones sensíveis. Assim, os sistemas de detecção

acústica de *drones* são projetados para identificar a assinatura sonora característica dessas ARPs e distinguir esses sons de outros ruídos ambientais (DUMITRESCU, 2020).

Um sistema de detecção acústica típico é composto por uma rede de microfones, posicionados estrategicamente, e uma unidade de processamento. A técnica se baseia em dois princípios: análise espectral e localização por triangulação.

Na análise espectral, o som captado é analisado em termos de sua composição de frequências. Os *drones* tendem a ter picos distintos em certas faixas de frequência, que são consequência do giro das hélices e do ruído característico do motor. Algoritmos especializados analisam esses dados acústicos para identificar a assinatura sonora do drone.

A triangulação, por outro lado, utiliza a diferença no tempo de chegada do som aos diferentes microfones para determinar a direção e, possivelmente, a distância do drone. A precisão deste método depende da disposição dos microfones e da qualidade do ambiente acústico.

Uma das principais vantagens da detecção acústica é a sua natureza passiva. Não emite radiação, como no caso dos radares, tornando o sistema imperceptível para o operador da ARP. Além disso, é uma técnica relativamente barata em comparação com algumas alternativas.

No entanto, de acordo com Bernardini (2017) a detecção acústica não está isenta de desafios. Em ambientes urbanos ou industriais, onde há uma abundância de ruídos de fundo, identificar a assinatura sonora de um *drone* pode ser uma tarefa complexa. A presença de obstáculos, como edifícios ou árvores, também pode afetar a propagação do som, complicando a localização precisa da ARP. Além disso, conforme os *drones* evoluem, existe a possibilidade de serem projetados para serem cada vez mais silenciosos, o que pode reduzir a eficácia dos sistemas acústicos.

4.3 Técnicas baseadas em rádio frequência

Estas técnicas, focadas nas ondas eletromagnéticas, se beneficiam do fato de que a maioria dos *drones* modernos se comunica por radiofrequência, seja para receber instruções de controle do operador, seja para transmitir informações de telemetria ou vídeo.

As ARP, em sua operação regular, emitem sinais de RF. Elas comunicam-se com seus controladores (por exemplo, *joysticks* ou *smartphones*) usando frequências específicas, que muitas vezes se encontram nas faixas de 2.4 GHz ou 5.8 GHz, embora outras frequências possam ser usadas, dependendo do dispositivo e da região geográfica. Essas emissões de RF

podem ser detectadas por sensores de RF, que, ao identificarem um sinal com as características de um drone, podem acionar um alerta ou iniciar ações de resposta (SHI, 2018).

O primeiro passo na detecção de ARPs via RF é identificar a presença de sinais de RF que correspondem a *drones*. Para isso, sistemas avançados analisam o espectro eletromagnético em busca de padrões conhecidos de comunicação de drones. Uma vez detectado o sinal, é possível discernir características do *drone*, como o modelo ou a marca, baseando-se na assinatura RF única do dispositivo.

Adicionalmente, ao monitorar o tráfego de RF, é possível determinar o canal de controle da ARP e, em certos casos, até mesmo interceptar a comunicação entre esta e o controlador, proporcionando informações valiosas sobre as intenções e atividades do deste.

A principal vantagem da detecção por RF é sua capacidade de detecção em longas distâncias. Diferente das técnicas visuais ou acústicas, que podem ser limitadas pelo alcance ou por obstruções visuais, a detecção por RF pode identificar *drones* muito antes de se tornarem visíveis ou audíveis. Isso oferece uma janela maior de tempo para a tomada de decisões e ação. Além disso, a técnica RF pode ser menos suscetível a falsos positivos em comparação com outros métodos, dado que os padrões de comunicação RF de *drones* são distintos.

Entretanto, a técnica também enfrenta desafios. Em ambientes com alta poluição eletromagnética ou com muitos dispositivos comunicando-se simultaneamente, a detecção do sinal de uma ARP pode se tornar mais complexa. Além disso, operadores mal-intencionados podem empregar técnicas de ofuscação ou criptografia para tornar a comunicação RF menos discernível.

Outro desafio é a evolução contínua da tecnologia de *drones*. À medida que estes se tornam mais avançados, suas comunicações podem migrar para frequências menos convencionais ou empregar métodos mais sofisticados de transmissão, exigindo uma atualização contínua dos sistemas de detecção.

4.4 Técnica baseada em detecção por radar

Dentre os métodos propostos, a detecção baseada em radar tem se destacado como uma abordagem promissora, dadas as suas vantagens intrínsecas. Ao analisar esta técnica no contexto da detecção de *drones*, é facilmente depreendido que esta possui diversos benefícios em comparação com outras metodologias. Tais vantagens estão listadas abaixo, de acordo com Park (2021):

- a) Alcance o radar tem capacidade para detectar objetos a longas distâncias, frequentemente muito além da visão humana ou da capacidade de outras técnicas de detecção, como as baseadas em infravermelho ou acústicas. Esta extensa área de cobertura proporciona um tempo de reação valioso para avaliar a ameaça e, se necessário, implementar contramedidas.
- b) Operação em Condições Meteorológicas Adversas ao contrário das técnicas visuais ou infravermelhas, o radar não é significativamente afetado por condições climáticas como neblina, chuva ou neve. Também pode operar em total escuridão, oferecendo capacidade de detecção em período noturno.
- c) Identificação os sistemas de radar modernos são capazes de identificar e rastrear múltiplos alvos simultaneamente. Ao correlacionar a assinatura radar de um objeto com bibliotecas de assinaturas conhecidas, é possível não apenas detectar, mas também identificar o tipo de drone, o que é fundamental para avaliar o nível de ameaça.
- d) Menos Vulnerável a Técnicas de Evasão enquanto drones podem ser projetados para minimizar sua assinatura infravermelha ou acústica, é consideravelmente mais desafiador (especialmente para drones maiores) evitar completamente a detecção por radar.
- e) Integração com Sistemas Existentes em muitos cenários, especialmente em ambientes de alta segurança como aeroportos ou instalações militares, já existem sistemas de radar em operação. Estes sistemas podem ser adaptados ou complementados com módulos específicos para detecção de drones, economizando recursos e facilitando a integração.

Ao avaliar as técnicas de detecção de ARPs, torna-se evidente que os sistemas baseados em radar oferecem benefícios significativos em termos de alcance, confiabilidade e precisão. Enquanto nenhuma técnica é infalível, e é frequentemente benéfico combinar múltiplos métodos de detecção para cobrir uma gama mais ampla de cenários e ameaças, o radar emerge como uma ferramenta fundamental no arsenal de técnicas para monitorar e gerenciar o crescente tráfego de *drones* no espaço aéreo.

4.4.1 Características e exemplos de radares específicos para detecção de ARP

A detecção de ARP, especialmente as de pequeno porte, tornou-se uma preocupação crescente em vários setores devido ao aumento de seu uso recreativo, comercial e potencialmente mal-intencionado. Isso tem impulsionado desenvolvimentos significativos em tecnologias de radar, com foco específico na detecção eficaz de *drones*. Segue uma breve

análise breve das principais características técnicas dos radares desenvolvidos especificamente para a detecção de ARPs:

- a) Radares de alta resolução: Radares desenvolvidos para detectar *drones* são projetados para serem altamente sensíveis e capazes de identificar alvos com baixíssima seção reta radar, muitas vezes em ambientes com alto nível de interferência.
- b) Processamento de sinal avançado: Modernos sistemas de radar para detecção de *drones* empregam algoritmos sofisticados que podem distinguir padrões de voo de ARP de outros objetos, usando o efeito micro-Doppler, que será abordado em profundidade na próxima seção deste trabalho. Isso é crucial para evitar falsos positivos e melhorar a taxa de detecção.
- c) Operação em diversas bandas de frequência: A operação em diferentes bandas, como a banda L ou S, permite que o radar opere sem interferências consideráveis em várias condições atmosféricas e oferece uma detecção melhorada em diferentes cenários. Algumas bandas são mais adequadas para detecção de alvos pequenos, enquanto outras podem fornecer maior alcance ou resolução, conforme abordado na subseção 2.3.2.
- d) Integração multisensorial: Para garantir uma detecção robusta e eficaz, os sistemas de radar para *drones* muitas vezes são integrados com outras tecnologias, como câmeras infravermelhas, sistemas acústicos ou sensores de radiofrequência. Essa abordagem multisensorial ajuda a confirmar detecções e reduzir falsos alarmes.
- e) Emprego de aprendizado de máquina: À medida que os *drones* evoluem, os radares também precisam se adaptar. Muitos dos radares mais recentes incorporam técnicas de aprendizado de máquina (*machine learning*), permitindo que o sistema "aprenda" sobre novos padrões de *drones* e adapte sua detecção de acordo, conceito básico dos radares cognitivos.

f) Radares holográficos: A tecnologia de radar holográfico processa a energia refletida de um alvo de forma a criar uma "imagem" ou "holograma" em tempo real desse alvo. Esta imagem permite uma identificação mais precisa do tipo de alvo e, muitas vezes, uma melhor diferenciação entre alvos de interesse (como ARP) e outros objetos irrelevantes (como pássaros ou balões).

Estas complexas características são o estado-da-arte na área de detecção de *drones* por meio de radares e podem ser encontrados nos mais recentes modelos lançados neste promissor mercado. Abaixo estão listados alguns exemplos de modernos radares projetados especificamente para essa função:

- a) Thales' *Gamekeeper*: Um radar holográfico projetado para monitorar amplos perímetros, como em áreas de infraestrutura crítica.
- b) SRC's ARES: O sistema Aerial Radiolocation Enhanced Surveillance (ARES) da SRC foi projetado especificamente para detectar e rastrear *drones* de baixa altitude, oferecendo uma cobertura de 360 graus e capacidade de rastreamento 3D.
- c) Robin Radar's Elvira: Especificamente projetado para detectar e rastrear *drones*, Elvira é conhecido por sua alta precisão, capacidade de filtrar ruídos (como pássaros) e por sua capacidade de integração com sistemas de neutralização.

5 O EFEITO MICRO-DOPPLER

O efeito Micro-Doppler (MD), inserido no âmbito da teoria e aplicação dos radares, tornou-se uma ferramenta essencial para a identificação e classificação refinada de alvos, sobretudo em contextos em que os detalhes do movimento de um objeto são cruciais. Para entender adequadamente este fenômeno, as suas origens e característica são abordadas a seguir.

5.1 Origens e características do Efeito Micro-Doppler

O efeito Doppler, nomeado em homenagem ao cientista Christian Doppler, descreve a mudança na frequência observada (e consequentemente na onda) de uma onda em relação a um observador em movimento. No contexto do radar, o efeito Doppler é usado para determinar a velocidade de um alvo ao observar a mudança na frequência do sinal refletido. Entretanto, quando nos voltamos para alvos que possuem componentes internos em movimento (como as hélices de um drone ou as asas de um pássaro em voo), um efeito mais complexo e sutil é observado: o Micro-Doppler.

Segundo Kang (2021), a origem do efeito MD reside no movimento relativo dos componentes internos de um objeto em relação ao radar. Enquanto o objeto como um todo pode ter um movimento de translação que gera um efeito Doppler tradicional, os componentes individuais do objeto também refletem o sinal do radar, cada um com sua própria velocidade relativa. Este conjunto de movimentos internos resulta em uma variedade de frequências refletidas, formando um espectro mais amplo em torno da frequência Doppler principal.

O efeito MD possui diversas características inerentes, dentre elas:

 a) Assinatura única: o espectro MD é como uma assinatura para o objeto. Cada objeto, dependendo de seus movimentos internos e estrutura, produzirá um espectro MD distinto. *Drones* com diferentes números de hélices, seres humanos *versus* animais correndo, ou até mesmo a diferença entre uma pessoa caminhando e correndo, pode ser discernida pelo seu perfil MD.

- b) Sensibilidade ao movimento: O efeito MD é altamente sensível a movimentos rotativos ou oscilatórios. Isso significa que, para objetos que têm movimentos rápidos e frequentes de seus componentes internos, o efeito será mais pronunciado.
- c) Variabilidade temporal: O espectro MD não é estático. Ele pode variar com o tempo dependendo de como os movimentos internos do objeto mudam. Por exemplo, as assinaturas MD de um *drone* que acelera suas hélices serão diferentes de quando está em velocidade constante.
- d) Riqueza de Informação: O espectro MD não fornece apenas informações sobre a velocidade e direção de um alvo, mas também sobre sua estrutura, tipo, intenções e possíveis cargas ou alterações. Esta profundidade de informação torna-o uma ferramenta inestimável em aplicações de segurança, monitoramento e resgate.

5.2 Aplicações do Efeito Micro-Doppler na Detecção de ARP

Dentro do campo de desenvolvimento de radares, a detecção e identificação precisas de alvos móveis tornaram-se de extrema relevância, principalmente em cenários que envolvem objetos aéreos de dimensões reduzidas, como as ARPs. Estes, devido às suas pequenas dimensões e capacidade de manobrar em ambientes complexos, representam desafios consideráveis para os sistemas tradicionais de radar. É aqui que o efeito MD se torna um aliado poderoso.

As ARPs, possuem componentes em movimento contínuo, como hélices, que, ao girarem, induzem variações de frequência no sinal refletido detectado por um radar. Este fenômeno, característico do efeito MD, acarreta um "espectro" de frequências que fornece uma assinatura única para o alvo em movimento.

De acordo com Chen (2019), para a análise do efeito MD espectrogramas são utilizados para visualizar a modulação Doppler adicional gerada pelo movimento de partes do alvo além do corpo principal. O espectrograma é uma representação visual do conteúdo de frequência de um sinal à medida que ele varia com o tempo. É um gráfico bidimensional que mostra o espectro de frequência de um sinal no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal, sendo a intensidade dos componentes da frequência representada pela cor ou brilho do gráfico.

A riqueza de informações contida no espectro MD gerado pelo movimento das hélices de um *drone* permite várias aplicações vitais, segundo Chen (2019):

- a) Identificação do Alvo: A frequência e amplitude das variações MD produzidas por uma ARP são influenciadas pelo número de hélices, sua velocidade de rotação e o seu *design*. Assim, é possível, a partir do espectro MD, identificar e classificar diferentes modelos de drones, distinguindo-os de outros alvos aéreos, como pássaros ou detritos.
- b) Estimativa de Características de Voo: Analisando o perfil MD de uma ARP, os operadores de radar podem inferir aspectos vitais, como a sua velocidade, altitude e até possíveis perfis de voo (por exemplo, se ele está pairando, acelerando ou desacelerando).
- c) Detecção em Ambientes Complexos: Em ambientes urbanos ou com muita vegetação, a presença de múltiplos obstáculos pode gerar reflexões e ecos que confundem sistemas de radar convencionais. No entanto, o espectro MD gerado por *drones* é distinto das assinaturas geradas por objetos estáticos ou por interferências ambientais, permitindo uma detecção mais confiável.
- d) Identificação de Cargas Suspensas: Em certas situações, os *drones* podem transportar cargas. Alterações no perfil MD podem indicar mudanças no padrão de voo ou na dinâmica do drone, sugerindo a presença de uma carga. Isso é especialmente relevante em cenários de segurança, onde *drones* podem ser utilizados para atividades ilícitas.
- e) Integração com Sistemas Multimodais: Enquanto o efeito MD por si só é uma ferramenta robusta, sua combinação com outros métodos de detecção, como infravermelho ou acústico, pode ampliar ainda mais a precisão e confiabilidade da detecção de ARP.

A aplicação do efeito MD na detecção de *drones* representa uma revolução na forma como os sistemas de radar abordam alvos pequenos e de movimento complexo. Ao explorar a assinatura única gerada pelo movimento das hélices e outros componentes móveis, os operadores podem identificar, rastrear e classificar ARPs com um grau de precisão e confiabilidade sem precedentes.

5.3 Vantagens e limitações do Micro-Doppler na discriminação entre ARP e pássaros

O fenômeno MD se posicionou como uma ferramenta de destaque na discriminação entre alvos aéreos, especialmente na árdua tarefa de diferenciar pequenos *drones* de pássaros. Esta capacidade distintiva é atribuída, principalmente, à habilidade do efeito MD em extrair assinaturas específicas que se originam pelo movimento de componentes dos alvos. Em drones, tais assinaturas são, em grande medida, resultado do giro de suas hélices. Em contraste, os pássaros geram um espectro MD diferenciado, proveniente do padrão de batimento de suas asas (LEONARDI, 2022).

Esta diversidade dos movimentos das hélices dos *drones* e das asas dos pássaros se traduz em uma ampla cobertura no espectro de frequências, possibilitando a identificação dos alvos em variadas velocidades e modos de voo. Isso se torna ainda mais valioso em ambientes complexos, como áreas urbanas ou regiões com densa vegetação. Em tais cenários, a presença de obstáculos e interferências pode confundir sistemas de radar tradicionais. No entanto, o espectro MD, com sua assinatura característica, sobressai, permitindo a identificação precisa de pequenas ARPs em meio a essas adversidades.

No entanto, existem certos desafios associados a essa técnica. A imensa variedade tanto em espécies de pássaros quanto em modelos de *drones* pode resultar em sobreposições no espectro MD. Essa sobreposição complica o processo de discriminação. Além disso, situações em que pássaros estão em voo planado apresentam assinaturas MD mínimas ou até inexistentes. Esse cenário compromete tanto a detecção quanto a diferenciação dos alvos. Outro desafio é a sensibilidade do efeito MD à qualidade do sinal de radar. Qualquer ruído ou interferência pode mascarar as assinaturas, tornando a discriminação menos eficaz.

Para uma implementação bem-sucedida do efeito MD, é necessária uma alta resolução temporal do sistema de radar (CHEN, 2019). No entanto, nem todos os sistemas possuem tal capacidade, restringindo a aplicação dessa técnica em certos cenários. A situação se agrava ainda mais em condições climáticas adversas, como chuva ou neblina, onde a eficiência do radar pode ser comprometida, afetando diretamente a extração de assinaturas MD confiáveis.

6 CATEGORIAS DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS

Antes de prosseguirmos para as seções referentes às simulações baseadas nos modelos matemáticos provenientes de ARPs e pássaros, faz-se necessário realizar uma breve análise das categorias de drones.

Os *drones* têm experimentado uma ascensão vertiginosa em aplicações e popularidade nas últimas décadas. Desde o mapeamento agrícola, passando por aplicações cinematográficas até ações militares de reconhecimento e ataque, a versatilidade dos drones tem se mostrado inegável. Para compreender plenamente esse dinâmico cenário, é fundamental dividir as ARPs em categorias baseadas em parâmetros como peso, tamanho, altitude operacional e autonomia.

6.1 Pelo peso e tamanho

As categorias de ARP, quando classificadas com base no peso e tamanho, oferecem uma perspectiva distinta sobre a vasta gama de aplicações e funcionalidades destes veículos aéreos. O entendimento desta classificação é crucial, pois influencia diretamente aspectos como legislação, permissões de voo, capacidades técnicas e operacionais, além das finalidades específicas de cada categoria.

6.1.1 Nano-ARP

Pesando menos de 250 gramas, os nano-*drones* são as aeronaves mais leves desta classificação. Com dimensões que podem caber na palma da mão, estas unidades são geralmente equipadas com câmeras de baixa resolução e possuem autonomia de voo limitada. Devido ao seu tamanho reduzido, são ideais para operações de reconhecimento em ambientes fechados ou confinados. Além disso, são frequentemente utilizados em aplicações educacionais e de pesquisa, onde o objetivo é compreender os princípios básicos da aerodinâmica e do controle de voo.

6.1.2 Micro-ARP

Com um peso que varia de 250 gramas até 2 kg, os micro-*drones* oferecem mais capacidades em relação aos nano-*drones*. Equipados com câmeras de melhor qualidade e sensores avançados, são amplamente utilizados em aplicações de fotografia aérea e filmagem. Devido à sua portabilidade, são preferidos por muitos entusiastas e profissionais que necessitam de imagens aéreas de qualidade sem o incômodo de equipamentos pesados.

6.1.3 Mini-ARP

Estas ARPs têm um peso que varia entre 2 a 25 kg e ocupam um espaço significativo em termos de aplicação e funcionalidade. Com uma maior capacidade de carga útil e autonomia de voo ampliada, são frequentemente empregados em missões de monitoramento, inspeções de infraestrutura e mapeamento topográfico. A capacidade de carregar sensores especializados, como LIDAR e câmeras termográficas, torna-os ideais para aplicações industriais e agrícolas.

6.1.4 ARP de tamanho médio

Com um peso que varia entre 25 a 150 kg, os drones de tamanho médio representam um segmento mais especializado da indústria de *drones*. Equipados com avançadas capacidades de voo, comunicação e sensores, são frequentemente empregados em missões críticas que exigem precisão e confiabilidade. Exemplos de aplicações incluem o monitoramento de grandes áreas agrícolas, levantamentos geológicos, e operações de busca e resgate.

6.1.5 ARP de grande porte

As ARPs de grande porte, pesando mais de 150 kg, são os maiores da indústria de *drones*. Devido ao seu tamanho e capacidade, são equiparados a aeronaves convencionais em termos de regulamentação e requerem pilotos certificados para operação. São frequentemente usados em missões militares de reconhecimento, vigilância e, em alguns casos, operações ofensivas. Com uma capacidade de carga útil significativa, estes *drones* também são explorados para transporte de mercadorias e, potencialmente, passageiros no futuro.

6.2 Pela altitude operacional e autonomia

A classificação de *drones* com base na altitude operacional e autonomia oferece uma visão essencial de como essas ARP são projetados para operar em diferentes ambientes e para diferentes missões.

6.2.1 ARP de Baixa Altitude e Baixa Autonomia (*Low Altitude, Short Endurance* - LASE)

Estes *drones* são projetados para operar a altitudes de até 1.500 metros. Com uma autonomia de voo geralmente limitada a uma ou algumas horas, são mais adequados para missões de curta duração. Estes *drones* incluem muitos dos quadricópteros comerciais disponíveis no mercado e são comuns para usos recreativos, fotografia aérea, inspeções de infraestrutura e monitoramento agrícola.

6.2.2 ARP de Média Altitude e Longa Autonomia (*Medium Altitude, Long Endurance* - MALE)

Projetados para operar a altitudes entre 1.500 a 9.000 metros, estes *drones* têm capacidades significativas em termos de autonomia, muitas vezes capazes de voar por mais de 24 horas consecutivas. Estes *drones* são frequentemente utilizados em missões de

monitoramento, seja em operações militares, patrulhamento de fronteiras ou em pesquisas atmosféricas. A capacidade de permanecer no ar por longos períodos torna-os ideais para vigilância contínua.

6.2.3 ARP de Alta Altitude e Longa Autonomia (*High Altitude, Long Endurance* - HALE)

Estes *drones* são complexas obras da engenharia aeronáutica, capazes de operar em altitudes superiores a 9.000 metros, muitas vezes chegando aos limites da estratosfera. Com autonomias que podem exceder 48 horas, são projetados para missões de longo prazo e para cobrir vastas áreas geográficas. Além de missões militares, são também utilizados em pesquisas climáticas e atmosféricas, monitorando fenômenos que seriam inacessíveis para aeronaves tripuladas.

7 MODELOS MATEMÁTICOS DOS SINAIS DO ECO PROVENIENTE DE ARPS E PÁSSAROS

Nesta seção serão apresentados os modelos matemáticos dos sinais do eco provenientes de ARPs e das batidas das asas dos pássaros, que serão utilizados para a análise do efeito MD gerado por estes.

7.1 Modelo matemático do sinal do eco proveniente de ARPs

O sinal do eco de uma ARP é a resultante da combinação do efeito Doppler causado pelo deslocamento do corpo principal da aeronave e do efeito MD gerado pelos rotores (CHEN, 2019). A figura 1, apresenta em perspectiva tridimensional os parâmetros a serem utilizados como base para a desenvolvimento de um modelo matemático do sinal produzido por uma ARP e recebido por uma plataforma radar, que se encontra na origem do sistema de coordenadas (X,Y,Z). A distância R_0 é a medida entre a plataforma radar e o centro da ARP ao longo da linha de visada (Line of sight) e β , por sua vez, representa o ângulo de elevação que a estrutura principal da ARP possui em relação a plataforma radar. Além disso, a velocidade constante radial e angular são definidas respectivamente por $v e \omega_p$ sendo o índice p referente a numeração dos rotores.



Figura 1: Geometria de movimento de uma ARP em relação a uma plataforma radar

Fonte: (KANG, 2021)

O parâmetro R_p é utilizado para representar a distância medida do centro da ARP até o centro do p-ésimo rotor e α , o ângulo entre R_0 e R_p . Desta forma, a distância entre a plataforma radar e o centro do p-ésimo rotor pode ser expressa pela seguinte equação (KANG, 2021):

$$R_{Tp}(t) = \sqrt{(R_0 + vt)^2 + R_p^2 - 2(R_0 + vt)R_P\cos(\alpha)}.$$
(2.1)

Considerando a situação de campo distante entre a ARP e a plataforma radar, ou seja, os sinais de eco retornados da ARP são ondas planares, é possível assumir que $R_0 + vt \gg R_p$ e a equação (2.1) pode ser reescrita da seguinte forma

$$R_{Tp}(t) = R_0 + \nu t - R_p \cos(\alpha).$$
(2.2)

4 10

Com isso, apenas a movimentação radial da ARP ocasionará em mudanças no valor de $R_{Tp}(t)$. Segundo Chiaofeng (2011), supondo um q-ésimo ponto de espalhamento sobre uma das hélices do p-ésimo rotor, a distância entre a plataforma radar e o q-ésimo espalhamento pode ser representada por:

$$R_{pq}(t) = \left[R_{Tp}^2 + r_{pq}^2 - 2R_{Tp}r_{pq}\cos(\beta_p)\cos(\omega_p t + \phi_{0pq})\right]^{1/2}.$$
(2.3)

Onde r_{pq} ($r_{pq} \leq$ comprimento da hélice) é a distância entre o centro de um *p-ésimo* rotor e um *q-ésimo* ponto de espalhamento. Adicionalmente, β_p é o ângulo entre $R_{Tp}(t)$ e o plano XY e ϕ_{0pq} é a fase inicial do *q-ésimo* ponto de espalhamento. Considerando $R_{Tp}(t) \gg$ r_{pq} , então $\beta_p \approx \beta$ e a equação (2.3) pode ser aproximada para

$$R_{pq}(t) \approx R_{Tp}(t) - r_{pq}\cos(\beta)\cos(\omega_p t + \phi_{0pq})$$
(2.4)

Na equação (2.4) é possível notar que apenas o segundo termo é alterado pela micro movimentação das hélices. Portanto, a distância entre a plataforma radar e o q-ésimo ponto de espalhamento da hélice pode ser modelada como a soma linear das distâncias determinadas pelo movimento do corpo principal da ARP e o micro movimento das hélices. Com isso a equação (2.4) passa a ser apresentada como

$$R_{pq}(t) = R_{Tp}(t) + R_{Mpq}(t), (2.5)$$

e o segundo termo por

$$R_{Mpq}(t) = -r_{pq}\cos(\beta)\cos(\omega_p t + \phi_{0pq})$$
(2.6)

Segundo (KANG, 2021), a expressão no domínio do tempo para o sinal do eco de uma ARP pode ser expressa por

$$s(t) = \sum_{k=1}^{K} A_k \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_{Tk}(t)\right] + \sum_{p=q}^{P} \sum_{q=1}^{Q} B_{pq} \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(R_{Tp}(t) + R_{Mpq}(t)\right)\right], \quad (2.7)$$

Sendo *K* o número de pontos de espalhamento sobre o corpo da ARP e A_k , a amplitude complexa do k-ésimo ponto de espalhamento. O parâmetro *P* e *Q*, representam o número de rotores e o número de pontos de espalhamento sobre a hélice de cada rotor. Além disso, β_{pq} amplitude complexa do q-ésimo ponto de espalhamento sobre o p-ésimo rotor. Desta forma, a equação (2.7) pode ser escrita como

$$s(t) = \overline{A}_k \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_T(t)\right] + \sum_{p=1}^{P}\sum_{q=1}^{Q} \overline{B_{pq}} \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(R_T(t) + R_{Mpq}(t)\right)\right], \quad (2.8)$$

Onde

$$\overline{A}_{k} = \sum_{p=1}^{K} \sum_{q=1}^{Q} A_{k} \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_{0} - R_{k}\cos\alpha)\right],$$
(2.9)

$$\overline{B}_{p,q} = B_{p,q} \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} (R_0 - R_p \cos\alpha)\right], \qquad (2.10)$$

e

$$R_T(t) = vt \tag{2.11}$$

De acordo com Kang (2021), a equação (2.8) pode ser simplificada em:

$$s(t) = \overline{A}_{ST}(t) + s_T(t) \times s_M(t), \qquad (2.12)$$

em que

$$s_T(t) = \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_T(t)\right] = \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\nu t\right],$$
(2.13)

e

$$s_{M}(t) = \sum_{p=1}^{P} \sum_{q=1}^{Q} \quad \overline{B}_{pq} s_{Mpq}(t), \tag{2.14}$$

sendo

$$s_{Mpq}(t) = \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_{Mpq}(t)\right] = \exp\left[j\Gamma_{pq}\cos\omega_p t + \phi_{0pq}\right],\tag{2.15}$$

e		-	
C	4		L.
v	c		
		÷	•

$$\Gamma_{pq} = \frac{4\pi}{\lambda} r_{pq} \cos\beta. \tag{2.16}$$

Aplicando a transformada de Fourier (FT) na equação (2.12), em relação ao tempo, pode ser obtido o espectro de frequência doppler de uma ARP quadricóptero:

$$S(f) = \overline{A}S_T(f) + S_T(f) * S_M(f).$$
(2.17)

Onde * é o operador convolucional e $S_T(f)$ é o espectro doppler de $s_T(t)$,

$$S_T(f) = \delta\left(f + \frac{2\nu}{\lambda}\right). \tag{2.18}$$

Na Equação (2.15), segundo (BELL, 1993), $s_{Mpq}(t)$ pode ser expressa usando a expansão da série de Fourier, como se segue

$$s_{Mpq}(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(\Gamma_{pq}) \exp\left[jm\left(\phi_{0pq} - \frac{\pi}{2}\right)\right] \exp(j\omega_p m t)$$
(2.19)

Onde $J_m(.)$ é o termo de ordem m da função de Bessel de primeiro tipo. Desta forma, o espectro doppler de $S_{Mpq}(t)$ se torna

$$S_{Mpq}(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{pq}(m) \delta\left(f - \frac{\omega_p}{2\pi}m\right), \qquad (2.20)$$

em que

$$C_{pq} = J_m \left(\Gamma_{pq} \right) \exp \left[jm \left(\phi_{0pq} - \frac{\pi}{2} \right) \right], \tag{2.21}$$

E $\delta(.)$ representa a função delta de Dirac. Adicionalmente, $S_M(f)$ pode ser obtida

por

$$S_M(f) = \sum_{p=1}^{P} \sum_{q=1}^{Q} \quad \overline{B}_{pq} \quad \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{pq}(m) \delta\left(f - \frac{\omega_p}{2\pi}m\right)$$
(2.22)

Na Equação (2.21), $\phi_{0pq} \notin \phi_{0pq} = \frac{2\pi n}{N} + \phi_p (n = 1, 2, ..., N)$, sendo N o número de hélices de cada rotor, e ϕ_p é a fase inicial do p-ésimo rotor. Logo, a Equação (2.22) se torna aproximadamente zero quando m não é um múltiplo inteiro de N sob a suposição de que $|\overline{B}_{p1}| \approx |\overline{B}_{p2}| \approx \cdots \approx |\overline{B}_{pQ}|$, assim é possível aproximar a Equação (2.22) para

$$S_M(f) \approx \sum_{p=1}^{P} \sum_{q=1}^{Q} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \overline{B}_{pq} C_{pq}(Nm) N\delta\left(f - \frac{\omega_p}{2\pi} Nm\right)$$
(2.23)

Realizando a substituição da Equação (2.18) e (2.23) dentro da equação (2.17) pode-se finalmente expressar o espectro doppler de uma ARP por

$$S(f) = \overline{A}\delta\left(f + \frac{2\nu}{\lambda}\right) + \sum_{p=1}^{P} \sum_{q=1}^{Q} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \overline{B}_{pq} C_{pq}(Nm)\delta\left(f + \frac{2\nu}{\lambda} - \frac{\omega_p}{2\pi}Nm\right).$$
(2.24)

Na equação (2.24), pode-se notar que o espectro doppler de uma ARP consiste em pares de linhas espectrais harmônicas $\left(\frac{\omega_p Nm}{2\pi}\right)$ em torno da frequência central, $\frac{-2v}{\lambda}$. De acordo com (TAIT, 2005), o intervalo entre as linhas espectrais adjacentes, geralmente chamadas de frequência chopper (f_{ch}) , é

$$f_{ch} = \frac{N\omega_p}{2\pi}.$$
(2.25)

Segundo Der (2008), considerando que para $m > \frac{\Gamma_{pq}}{N}$, $|J_m()|$ converge para zero e adotando a regra da largura de banda de Carson Bell (1993), pode-se obter a largura de banda do espectro de frequência do sinal de eco de uma ARP, sendo esta representada por

$$[f_{dmin,}f_{dmax}] = \left[-\frac{2}{\lambda}(r\cos\beta\,\omega_{max}+v),\frac{2}{\lambda}(r\cos\beta\,\omega_{max}-v)\right]$$
(2.26)

Onde f_{dmin} representa o valor mínimo do espectro doppler e f_{dmax} o valor máximo obtido pela equação (2.24). O parâmetro r está relacionado ao comprimento da hélice e ω_{max} à máxima velocidade angular dos rotores.

De acordo com Kang (2019) as Equações (2.25) e (2.26), demonstram que o espectro doppler de uma ARP é espalhado sobre uma banda de frequência com linhas espectrais igualmente espalhadas em uma certa frequência chopper.

7.2 Modelo Matemático do Movimento de Batida de Asas de Pássaros

A estrutura da asa de um pássaro apresentada na Figura 2, segundo Chen (2019), consiste em corda, braço superior (úmero), antebraço (ulna e rádio) e mão (punho, mão e dedos), em analogia aos termos empregados em um braço humano. De acordo com Chen (2022) os movimentos das asas de uma ave são o bater, torcer e varrer. A batida de asas envolve a elevação e depressão do braço ou antebraço ao redor das articulações, seguindo ângulos específicos. O torcer da asa implica em rotacioná-la em torno de seu eixo principal, resultando na elevação da borda traseira e na depressão da borda dianteira. A varredura refere-se ao deslocamento da asa para a frente ou para trás.





Fonte: Sathler (2023)

De acordo com Chen (2019), sinal do eco retornado de aves em voo possuem modulação doppler gerado pelo movimento de batida das asas e a máxima velocidade radial esperada de um elemento de asa pode ser calculada por:

$$\max\{v_{radial}\} = 2Af_{batida}d.$$
 (2.27)

Onde A é amplitude do movimento de batida da asa, f_{batida} é a taxa de batida da asa e d é a distância do centro do corpo da ave até a ponta da asa. Com isso, a máxima velocidade radial apresentará variações dependendo das características da espécie de ave a ser analisada.

Na Figura 3 é apresentada a geometria da asa de um pássaro que será utilizada como modelo cinético para o estudo da sua movimentação. A asa é dividida em duas partes, braço superior de tamanho L_1 e antebraço de tamanho L_2 , as quais são interligadas no ponto P_1 . A articulação 1, que representa a parte mais próxima do corpo da ave, pode realizar movimentos no plano yz e forma o ângulo ψ_1 que tem origem no eixo y. A articulação 2 representa o ponto de conexão entre o braço superior e o antebraço de medida L_2 , e que possui capacidade de se movimentar nos planos yz e xy, conforme apresentado na Figura 3. Na vista frontal, pode-se visualizar o ângulo $\psi_1 - \psi_2$ entre o eixo y e o antebraço, por outro lado, na vista superior têmse o ângulo $\varphi_{2\perp}$ entre o eixo y e o antebraço.





Fonte: Sathler (2023)

De acordo com a parametrização estabelecida por Chen (2019), foi definido que o ângulo de batida do braço superior, o ângulo de batida do antebraço, respectivamente dados por

 $\psi_1(t) \in \psi_2(t)$, e o ângulo de torção do antebraço $\varphi_2(t)$ são funções harmônicas variantes no tempo e expressas por:

$$\psi_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_{batida}t) + \psi_{10} \tag{2.28}$$

$$\psi_2(t) = A_2 \cos(2\pi f_{batida} t) + \psi_{20} \tag{2.29}$$

Em que A_1 é a amplitude do ângulo de movimento do braço superior, A_2 é a amplitude do ângulo de movimento do antebraço e C_2 a amplitude do ângulo de varredura do antebraço. Adicionalmente, os ângulos iniciais de movimento são dados por ψ_{10} , ψ_{20} e φ_{20} . Portanto, segundo Chen (2019), o ponto que se encontra sobre a articulação 2 é definido por $P_1 = (x_1, y_1, z_1)$ e possui posição variando no tempo dada por:

$$x_{1}(t) = 0$$

$$y_{1}(t) = L_{1} \cos \frac{\psi_{1}(t)\pi}{180}; e \qquad (2.31)$$

$$z_{1}(t) = y_{1} \tan \frac{\psi_{1}(t)\pi}{180}.$$

Além disso, o ponto 2 que se encontra na parte mais extrema do antebraço é simbolizada por $P_2 = (x_2, y_2, z_2)$, e possui mudança de posição no tempo dada por Chen (2019).

$$x_2(t) = -[y_2(t) - y_1(t)]\tan(d);$$

$$y_2(t) = L_1 \cos \frac{\psi_1(t)\pi}{180} + L_2 \cos \varphi_2(t) \cos[\psi_1(t) - \psi_2(t)]; e \qquad (2.32)$$

$$z_2(t) = z_1(t) + [y_2(t) - y_1(t)] \tan \frac{[\psi_1(t) - \psi_2(t)]\pi}{180}.$$

Onde $d = \frac{\varphi_2(t)}{\cos[\psi_1(t) - \psi_2(t)]}$.

A partir do modelo cinemático das asas de um pássaro o autor Chen (2019) conseguiu desenvolver no *software* MATLAB um modelo animado de uma ave com capacidade de se deslocar e bater as asas. Com isso, tornou-se possível coletar os sinais de eco radar resultantes deste modelo animado e gerar espectrogramas de aves com diferentes dimensões, velocidades de voo e frequência de batidas de asas.

8 SIMULAÇÕES DO EFEITO MD PRODUZIDO POR ARPS E PÁSSAROS

A presente seção tem por objetivo apresentar a metodologia utilizada na geração dos resultados. Para isso, são apresentados os parâmetros utilizados nas simulações para análise do efeito MD produzidos por alguns modelos de ARPs quadricópteras e espécies de aves.

8.1 Simulação do Efeito MD produzido por ARPs

As simulações para análise do efeito MD produzido pelos rotores de ARPs quadricópteras foram obtidas por meio do Modelo Matemático do Sinal do Eco Proveniente de ARPs descrito na subseção 6.1. Os parâmetros utilizados nas simulações são: tamanho das hélices, taxa de rotação dos rotores (ou velocidade angular) e ângulo de elevação em relação à uma plataforma radar. Com o propósito de obter variados espectrogramas e espectros de potência foram selecionados dois modelos de ARPs de diferentes dimensões conforme apresentados na Figura 4.

Figura 4: Modelos de ARPs utilizados para análise do efeito MD. (1) Mavic Pro e (2) Inspire 1.



(1)



Fonte: DJI Mavic Pro¹ e Inspire 1²

A tabela 1 apresenta os modelos de ARPs e os parâmetros que foram variados durante as simulações. Para as taxas de rotação dos rotores foi empregada a unidade de revoluções por segundo (Rev/s), de acordo com Chen (2019), tendo em vista a possibilidade de permitir a conversão de T_c para ω_m (velocidade angular) de forma direta. Nos dois modelos foram utilizadas taxas de rotação baixas e altas e ângulos de elevação de 0° e 60° a fim de se realizar combinações entre estes valores e analisar como influenciam nos resultados gerados pelas simulações. De acordo com Sathler (2023), valores de β próximos a 90° podem inviabilizar a extração de informações dos espectrogramas, por isso optou-se por não os utilizar. Os parâmetros de tamanho da hélice, taxa de rotação e as principais medidas de comprimento, presentes no Anexo A e B, utilizados nas simulações, foram obtidos de especificações técnicas³ do fabricante das ARPs.

Modelo da ARP	Tamanho da Hélice (cm)	Taxa de rotação (Rev/s)	Ângulo de elevação (β)	Simulação
		70	0°	1
Mavic Pro	10,5	70	60°	2
		140	0°	3
Inspire 1		70	0°	4
	18		60°	5
		130	60°	6

Tabela 1: Parâmetros das ARPs utilizadas nas simulações.

8.2 Simulação do Efeito MD produzido por pássaros

¹ Disponível em:

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.dji.com%2Fbr%2Fmavic&psig=AOvVaw3oD v3IqzeUk4Iq_-

ie2Lky&ust=1695825223072000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBIQjhxqFwoTCPCxwszAy IEDFQAAAAAdAAAABAl>. Acesso em: 08 set. 2023.

² Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.dji.com%2Finspire-

^{1&}amp;psig=AOvVaw3XGb_ogzPAmbs5uv9Q2HyA&ust=1696877323845000&source=images&cd=vfe&opi=8997 8449&ved=0CBEQjRxqFwoTCJivx4OQ54EDFQAAAAAdAAAABAE>. Acesso em: 08 set. 2023.

 $[\]label{eq:specificacce} {}^3 \ {\rm Fonte} \ {\rm especificacces} \ : \ {\rm https://advancedstructures.in/dji-inspire-1-drone-teardown-and-costing/} \ ,$

https://www.dji.com/mavic/info#specs e https://forum.dji.com/thread-66918-1-1.html

A modelagem matemática do movimento das asas de uma ave apresentada na subseção 6.2, quando aplicada ao software MATLAB, possibilita a realização de simulações para análise do efeito MD. Nesse ambiente virtual, é criado um modelo de pássaro que executa uma trajetória entre dois pontos distintos no espaço (X, Y, Z) em linha reta ao longo do eixo x, com velocidade e frequência de batida de asas (*fbatida*) constantes, conforme pode ser visualizado na figura 5. O voo da ave, em todas as simulações, tem início na origem do sistema de coordenadas (0,0,0), e possui duração de 10 segundos. Um radar é inserido na posição (X, 200, -50), onde X representa o ponto médio da distância percorrida em voo pela ave, o qual varia de acordo com a velocidade considerada. A função deste radar é transmitir pulsos e receber os sinais de retorno da ave durante o seu deslocamento, com o propósito de gerar espectrogramas de acordo com cada simulação executada.



Figura 5: Dinâmica de voo do modelo animado utilizado nas simulações.

A figura 6 ilustra o modelo animado de um pássaro que foi empregado nas simulações. A amplitude do movimento de batida de asas e a sua trajetória descrita pelas asas durante o voo são apresentadas na figura 7.

Figura 6: Modelo animado de um pássaro utilizado nas simulações.



Figura 7: (a) Amplitude do movimento de batida de asas e (b) Trajetória descrita pelas asas durante o voo.



Os parâmetros de velocidade de voo e envergadura utilizados nas simulações foram baseados nas medições das espécies Garça-branca-grande e Trinta-réis-negro-de-asa-branca, realizadas por Bruderer (2001) e ilustradas na figura 8. Com relação aos comprimentos do braço superior *L*1 e antebraço *L*₂, ambos foram considerados iguais e a sua soma como equivalentes à metade do valor da envergadura. Em todas as simulações foram fixados os valores angulares de amplitude do ângulo de movimento do braço superior ($A_1 = 40^\circ$), amplitude do ângulo de movimento do antebraço ($A_2 = 30^\circ$), amplitude do ângulo de varredura do antebraço ($C_2 = 20^\circ$), atraso do ângulo de batimento na parte superior do braço ($\psi 10 = 15^\circ$) e de atraso do ângulo de batida do antebraço ($\psi 20 = 40^\circ$).

Figura 8: Espécies de aves utilizadas nas simulações. Garça-branca-grande (1) e Trinta-réis-negro-de-asa-branca (2)





Os valores de *fbatida* são aproximações de medições reais realizadas com diversas espécies de aves em Pennycuick (2001). Desta forma, foram selecionadas frequências de batidas de asas de espécies semelhantes as empregadas nas simulações, observando que de

acordo com Ornithology (2004), aves menores batem as asas com maior frequência do que as aves de maior envergadura.

A tabela 2 apresenta os principais parâmetros de cada espécie de ave utilizada nas simulações. A velocidade de voo e *fbatida* foram combinadas entre si, a fim de se obter um maior número de espectrogramas, e deste modo analisar as diferentes influências que ambos possuem no efeito MD gerado na plataforma radar. No entanto, pode-se observar que estes dois parâmetros foram mantidos fixos nas simulações (d) e (e) para se analisar o efeito da variação do tamanho das asas das aves no sinal de retorno recebido pelo radar. Por último, uma comparação entre as análises do efeito MD produzidos pelos modelos de ARPs e espécies de aves foi realizada.

Espécie de ave	Metade do comprimento daenvergadura (L1 + L2)	Velocidade de voo (m/s)	fbatida (Hz)	Simulação
			2	(a)
Garça-branca- grande (egretta alba)	0,775 m	8	2,5	(b)
		12	2,5	(c)
Trinta-réis-negro- de-asa-branca (chlidonias leucopterus)	0,325 m	6	2	(d)

Tabela 2: Parâmetros das espécies de aves utilizadas nas simulações

	0	2,5	(e)
	8	4	(f)

Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com um espectrograma proveniente de uma ave real medida em campo por Kang (2021), que pode ser visualizada na figura 9. A plataforma radar inserida no ambiente virtual para medição do efeito MD foi configurado de forma semelhante ao radar utilizado na medição em campo. Os parâmetros utilizados foram: frequência de operação de 9,85 GHz, 8192 pulsos, resolução em distância de 5cm e tempo de observação do alvo de 10 segundos.





Fonte: Kang (2021)

8.3 Resultados Obtidos

O objetivo desta seção é apresentar os resultados gerados em cada uma das simulações realizadas. Os procedimentos empregados para análise do efeito MD produzido pelos modelos de ARPs são apresentados e os espectrogramas gerados pelas variações do tamanho de hélices, taxa de rotação dos rotores e ângulos de elevação em relação à plataforma radar são comparados. Em seguida, os espectrogramas produzidos por espécies de aves com diferentes velocidades de voo, frequência de batidas de asas e dimensões das asas são expostos e analisados. Por fim uma comparação é realizada entre os efeitos MD gerados pelos modelos de ARPs e espécies de aves.

8.3.1 Análise das simulações do Efeito Micro-Doppler produzido por ARPs

As figuras 10 e 11 apresentam os espectrogramas gerados pelo Modelo Matemático do Sinal do Eco Proveniente de ARPs, aplicado ao software MATLAB. Nas simulações foram

utilizadas as variações dos parâmetros de tamanho das hélices (r), taxa de rotação dos rotores (ω_p) e ângulo de elevação (β) , estabelecidas na Tabela 1.

A análise dos espectrogramas permite visualizar o efeito MD gerado pela modulação Doppler adicional das partes rotativas das ARPs, que é a única de interesse para a extração de parâmetros para a classificação destes alvos, de acordo com Chen (2019). Além disso, possibilita a extração dos valores de largura de banda (LB) e do período de rotação (T_c). Por meio da expressão ($\omega_p = \frac{1}{T_c}$) torna-se possível estimar a taxa de rotação dos rotores (ω_p), que por sua vez, juntamente com LB e β , possibilita o cálculo aproximado do tamanho da hélice (r) na equação (2.26).

Ao analisar a figura 10 é possível perceber que mantendo o valor de ω_p em 70 (Rev/s) e variando de 0° a 60° o ângulo de elevação entre as simulações 1 e 2, realizadas com o modelo de ARP Mavic Pro, os espectrogramas sofrem uma diminuição de 2,5 kHz na LB. Por outro lado, nas simulações 2 e 3 onde o valor do ângulo de elevação se manteve em 60° e o valor de ω_p foi alterado para 140 (Rev/s), é possível notar que o período de rotação diminuiu proporcionalmente e a LB aumentou consideravelmente de 6 kHz para 14,75 kHz.



Figura 10: Espectrogramas das simulações 1, 2 e 3 realizadas com a ARP Mavic Pro.



Fonte: autoria própria

Da mesma forma ao se comparar os resultados das simulações 4, 5 e 6 presentes na figura 11, realizadas com a ARP Inspire 1, é possível notar que aumentos no ângulo de elevação ou na taxa de rotação proporcionam diminuição ou aumento na LB, respectivamente. Além disso, nota-se que T_c , continua mantendo a proporcionalidade em relação à ω_{p} , observada em cada uma das simulações.



Figura 11: Espectrogramas das simulações 4, 5 e 6 realizadas com a ARP Inspire 1.



Fonte: autoria própria

Por último, ao se observar as simulações 1 e 4 ou 2 e 5, onde os parâmetros de taxa de rotação dos rotores e ângulo de elevação se mantiveram fixos, é possível perceber que a variação no tamanho da hélice de 10,5 cm para 18 cm entre os modelos Mavic Pro e Inspire, implica em aumento da LB.

O segundo produto gerado pelas simulações é o espectro de potência, que consiste em uma representação gráfica da distribuição de potência ao longo das frequências de um sinal. Destes espectros de potência é possível extrair a LB e a frequência chopper. De acordo com Kang (2021), para se obter a LB e separar o sinal do eco gerado pelas ARPs do ruído externo, deve-se considerar os valores que estão acima de um limiar de 20 dB.

As figuras 12 e 13 representam os espectros de potência das simulações 1, 2 e 3, realizadas com a ARP Mavic Pro, e das simulações 4, 5 e 6, realizadas com a ARP Inspire 1. Assim como os espectrogramas, os espectros de potência são alterados de acordo com a variação dos parâmetros inseridos nas simulações. Para aumentos apenas em β , observa-se diminuição de LB. Em contrapartida, ao se aumentar somente ω_p , tem-se um acréscimo proporcional na LB. Em última análise, a LB ainda pode ser alterada quando se considera variações exclusivamente no de tamanho das hélices.

Figura 12: Espectros de potência das simulações 1,2 e 3 realizadas com a ARP Mavic Pro



Fonte: autoria própria.

Figura 13: Espectros de potência das simulações 4, 5 e 5 realizadas com a ARP Inspire 1.



Fonte: autoria própria.

Por outro lado, segundo Kang (2021) o valor da frequência chopper, que é calculado considerando a diferença entre a primeira e a segunda linhas espectrais da banda positiva do espectro de potência, pode ser utilizado para estimar ω_p por meio da equação (2.25), conhecendo-se o número de hélices de cada rotor. As figuras 14 e 15 representam intervalos das bandas positivas de frequências de todas as simulações realizadas e as suas respectivas frequências chopper.

Figura 14: Frequências chopper das simulações 1, 2 e 3 realizadas com a ARP Mavic Pro.



Fonte: autoria própria.

Ao se compararem as simulações, nota-se que aumentos apenas em β geram acréscimos nas amplitudes das frequências, enquanto para incrementos somente no valor de r, percebe-se o inverso. Por fim, os valores de frequência chopper medidas se mantiveram constantes para as simulações onde não houve variação em ω_p .

Figura 15: Frequências chopper das simulações 4, 5 e 6 realizadas com a ARP Inspire 1.



Fonte: autoria própria.

Na tabela 3, são exibidos os valores obtidos por meio das simulações e os parâmetros estimados a partir deles. Em cada um dos modelos, o cálculo aproximado do tamanho das hélices foi feito com a média dos valores encontrados nas três simulações e arredondado para número inteiro mais próximo.

]	Mavic Pro	Inspire 1				
Resultados	Simulações						
	1	2	3	4	5	6	
LB dos Espectrogramas (kHz)	7,5	6	14,75	13	7	12,75	
LB do Espectros de Potência (kHz)	7,48	5,86	14,58	12,82	6,74	12,57	
Período de Rotação (Tc) dos Espectrogramas (ms)	14,18	14,31	7,12	14,32	14,37	7,75	
Frequência chopper (Hz)	140,62	140,62	277,34	140,62	140,62	257,81	
Tamanho das Hélices (r) estimado (cm)	11				17		
Taxa de rotação (ωp) estimada (rev/s)	70,52	69,88	140,44	69,83	69,58	129,03	

Tabela 3: Resultados obtidos das simulações do efeito MD gerados por ARPs.

8.3.2 Análise das simulações do Efeito Micro-Doppler produzido por pássaros

As figuras 16 e 17 apresentam os espectrogramas gerados pelo Modelo Matemático do Movimento de Batida de Asas de Pássaros, aplicado ao software MATLAB. Nas simulações foram utilizadas as variações dos parâmetros de metade do comprimento da envergadura $(L_1 + L_2)$, velocidade de voo e frequência de batida de asas (f_{batida}) apresentadas na Tabela 3.2. Por meio da análise destes espectrogramas é possível visualizar as batidas de asas por meio das oscilações e a influência que os referidos parâmetros possuem sobre o efeito MD produzido. Além disso, é possível extrair informações de largura de Banda (LB) e período de batida de asas, sendo este último o inverso da f_{batida} .

A figura 16 representa os resultados obtidos das simulações (a), (b) e (c) realizadas com a espécie de ave Garça-branca-grande. Observa-se que LB aumenta em função do acréscimo inserido na velocidade de voo de 8 m/s para 12 m/s, como pode ser percebido entre as simulações (a) e (c) ou (b) e (c). Além disso, é possível notar que ao se fixar o valor da velocidade de voo em 8 m/s nas simulações (a) e (b) e diminuir o período de batida de asas, por meio do aumento f_{batida} de 2 para 2,5 Hz, a LB aumentou em 68,8 Hz.



Figura 16: Espectrogramas das simulações (a), (b) e (c) realizadas com espécie de ave Garça -branca-grande.

Fonte: autoria própria.

A mesma análise pode ser realizada na figura 17 para a espécie de ave Trinta-réisnegro-de-asa-branca. Nas simulações (d), (e) e (f), a LB aumentou proporcionalmente onde se observou incrementos na velocidade de voo e diminuição do período de batida de asas. Por outro lado, ao se comparar as simulações (b) e (e), onde se mantiveram fixos os valores de velocidade de voo e f_{batida} , pode-se notar que as dimensões da asa $(L_1 + L_2)$ da Garça-brancagrande por serem aproximadamente o dobro do tamanho da asa do Trinta-réis-negro-de-asabranca, produziram uma LB quase duas vezes maior.



Figura 17: Espectrogramas das simulações (a), (b) e (c) realizadas com espécie de ave Trinta-réis-negro-de-asabranca.

Fonte: autoria própria.

Adicionalmente, em todos os espectrogramas gerados pelas duas espécies de aves, é possível perceber uma variação da frequência doppler positiva até o instante de 5 segundos, o qual marca o ponto de menor distância entre a ave e o radar, e consequentemente a maior intensidade do sinal. Isso ocorre pois no intervalo de 0 a 5 segundos, a ave está se aproximando do radar. De forma simétrica ocorre uma variação negativa da frequência doppler durante o afastamento da ave no período entre 5 e 10 segundos. A menor intensidade do sinal é observada nos pontos extremos dos espectrogramas, ou seja, nos pontos de 0 segundos e 10 segundos.

Ao se comparar a simulação (a) com a medição realizada em campo por (KANG, 2021), apresentada na figura 18, é perceptível que os espectrogramas possuem semelhanças, para os intervalos de tempo considerados, nos valores de LB. Isso permite presumir que as dimensões das asas das aves são próximas, tendo apenas diferentes valores para as medidas de velocidade de voo e f_{batida} . A ave medida em campo, na figura 3.6, provavelmente possui uma velocidade de voo inferior aos 8 m/s da Garça-branca-grande empregada na simulação (a) e uma frequência de batida de asas de 3,3 Hz.

Figura 18: Espectrograma obtido pela medição em campo da ave apresentada na figura 3.6



Fonte: (KANG, 2021).

Por fim, observa-se que a variação da LB medida nos espectrogramas produzidos pelas aves foi de 166,4 Hz à 300 Hz, enquanto para as ARPs foi de 6 Khz à 14,75 Khz. Isso mostra que a LB produzida em um espectrograma por ARPs é muito maior do que a produzida por aves e que este parâmetro pode ser utilizado na diferenciação entre os mesmos.

Na Tabela 4, são exibidos os valores de largura de banda (LB) e período de batida de asas obtidos nas simulações. A última coluna da tabela apresenta os valores para a medição realizada em campo por (KANG, 2021).

Tabela 4: Resultados das simulações e medição em campo do efeito MD gerados por aves.

Resultados	Garça-branca-grande Trinta-réis-negro-de-asa- branca			Ave medida por (KANG)			
	Simulações						Medição em campo
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
LB dos Espectrogramas (Hz)	299,2	401,6	412,8	166,4	193,6	284,8	300
Período de batida de asas (s)	0,503	0,410	0,405	0,498	0,405	0,249	0,302

9 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi analisar a detecção radar por meio do efeito MD produzido pela rotação das hélices de ARPs quadricópteras a fim de permitir a classificação desses alvos por meio da estimativa da taxa de rotação dos rotores (ω_p) e tamanho das hélices (r). Além disso, foi realizada uma comparação com o efeito MD produzido pelas batidas de asas de aves em voo, para determinar parâmetros que possibilitem a distinção destes dois tipos de alvos durante a detecção radar.

A aplicação do Modelo Matemático do Sinal do Eco Proveniente de ARPs no software MATLAB, constatou a influência que os parâmetros r, $\omega_p \, e \, \beta$ possuem no efeito MD produzido. A análise dos resultados obtidos pelas simulações com as ARPs Mavic Pro e Inspire 1 demonstraram que os acréscimos na largura de banda (LB) estão diretamente relacionados aos aumentos no tamanho de r, ω_p ou diminuição de β . Os espectrogramas, espectros de potência e frequência chopper permitiram a obtenção dos valores de LB e período de rotação (T_c), que por sua vez, possibilitaram por meio de conversão direta ($\omega_p = \frac{1}{T_c}$) estimar ω_p . Estes parâmetros, associados ao ângulo de elevação β , calculado pelo radar, viabilizaram os cálculos para a estimativa de r por meio da equação (2.26).

Por outro lado, através dos espectrogramas obtidos pelo Modelo Matemático do Movimento de Batida de Asas de Pássaros implementado em ambiente virtual, foi observado que o as batidas de asas das espécies de aves Garça-branca-grande e Trinta-réis-negro-de-asabranca geraram oscilações perceptíveis em relação ao corpo central da ave. Isso permitiu extrair a LB e período de batida de asas. Ao analisar os resultados obtidos, foi demonstrado que

59

acréscimos na LB são provenientes do aumento da frequência de batida de asas (f_{batida}) , maiores dimensões de asas $(L_1 + L_2)$ ou velocidades de voo mais elevadas.

Além disso, ao se compararem os espectrogramas obtidos do efeito MD gerado pelos modelos de ARPs Mavic Pro e Inspire 1, foi observado que as partes rotativas das ARPs produziram valores de LB entre 6 kHz e 14,75kHz, enquanto as espécies de aves Garça-brancagrande e Trinta-réis-negro-de-asa-branca, em voo, geraram valores entre 166,4 Hz e 300 Hz. Desta forma, a diferença nas medições das LB torna-se um parâmetro capaz de ser utilizado na distinção destes dois tipos de alvos.

Desta forma, através dos resultados obtidos nas simulações no MATLAB e da ampla revisão bibliográfica conclui-se que o presente trabalho atingiu o objetivo esperado, demonstrando as especificidades da detecção por radar de Aeronaves Remotamente Pilotadas e a sua posterior classificação. Contudo, faz-se necessária a recomendação de implementação de radares de busca e vigilância convencionais que possuam a capacidade de detectar alvos com baixa RCS, tendo em vista que a adoção de sensores que utilizam o efeito Micro-Doppler ainda não é amplamente difundida, a fim de garantir uma bem-sucedida detecção e classificação de drones.

REFERÊNCIAS

DER, LAWRENCE. Frequency modulation (fm) tutorial. In: . United Kingdom: [s.n.], 2008.

BELL, M. R.; GRUBBS, R. A. Jem modeling and measurement for radar target identification. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, IEEE, v. 29, n. 1, p. 73–87, 1993.

BERNARDINI, A.; MANGIATORDI, F.; PALLOTTI, E.; CAPODIFERRO, L. **Drone detection by acoustic signature identification**. Electronic Imaging, Society for Imaging Science and Technology, v. 2017, n. 10, p. 60–64, 2017.

BRUDERER, B. Flight characteristics of birds: I. Radar measurements of speeds. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/227621013_Flight_characteristics_of_birds_I_Rad ar_measurements_of_speeds>. Acesso em: 17 ago. 2023.

CHEN, V. C. **The micro-Doppler effect in radar.** 2°. ed. Norwood, MA: Artech house, 2019. (ISBN-13: 978-1-63081-546-2).

CHEN, X.; ZHANG, H.; SONG, J.; GUAN, J.; LI, J.; HE, Z. Micro-motion classification of flying bird and rotor drones via data augmentation and modified multi-scale cnn. Remote Sensing, MDPI, v. 14, n. 5, p. 1107, 2022

CHERNYAK, V. A Brief History of Radar. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/224602004_A_Brief_History_of_Radar. Acesso em: 05 ago. 2023.

CHIPER, F.-L.; MARTIAN, A.; VLADEANU, C.; MARGHESCU, I.; CRACIUNESCU, R.; FRATU, O. Drone detection and defense systems: Survey and a softwaredefined radiobased solution. Sensors, MDPI, v. 22, n. 4, p. 1453, 2022

DUMITRESCU, C.; MINEA, M.; COSTEA, I. M.; CHIVA, I. C.; SEMENESCU, A. **Development of an acoustic system for uav detection.** Sensors, MDPI, v. 20, n. 17, p. 4870, 2020.

ERIKSSON, N. Conceptual study of a future drone detection system-Countering a threat posed by a disruptive technology. Dissertação (Mestrado), 2018.

HOU, H.; YANG, Z.; PANG, C. Rotor uav's micro-doppler signal detection and parameter estimation based on frft-fsst. Sensors, MDPI, v. 21, n. 21, p. 7314, 2021.

KANG, K.-B.; CHOI, J.-H.; CHO, B.-L.; LEE, J.-S.; KIM, K.-T. **Analysis of microdoppler signatures of small uavs based on doppler spectrum.** IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, IEEE, v. 57, n. 5, p. 3252–3267, 2021.

LEONARDI, M.; LIGRESTI, G.; PIRACCI, E. **Drones classification by the use of a multifunctional radar and micro-doppler analysis.** Drones, MDPI, v. 6, n. 5, p. 124, 2022.

OPROMOLLA, R.; FASANO, G.; ACCARDO, D. A vision-based approach to uav detection and tracking in cooperative applications. Sensors, MDPI, v. 18, n. 10, p. 3391, 2018.

ORNITHOLOGY, C. L. (Ed.). **Handbook of Bird Biology**. 2nd ed., cap. 5, Cornell Laboratory of Ornithology, 2004

PARK, S.; KIM, H. T.; LEE, S.; JOO, H.; KIM, H. Survey on anti-drone systems: Components, designs, and challenges. IEEE Access, IEEE, v. 9, p. 42635–42659, 2021.

PENNYCUICK, V. **Speeds and wingbeat frequencies of migrating birds compared with calculated benchmarks.** Disponível em: https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Pennycuick 2001.pdf>. Acesso em 15

https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Pennycuick_2001.pdf>. Acesso em 15 ago. 2023

SATHLER, W. L. **Detecção por radar e classificação de aeronaves remotamente pilotadas.** Disponível em: < https://biblioteca.sdm.mar.mil.br/handle/ripcmb/846192>. Acesso em: 07 jun. 2023.

SHI, X.; YANG, C.; XIE, W.; LIANG, C.; SHI, Z.; CHEN, J. Anti-drone system with multiple surveillance technologies: Architecture, implementation, and challenges. IEEE Communications Magazine, IEEE, v. 56, n. 4, p. 68–74, 2018.

SKOLNIK, M. I. Introduction To Radar Systems. 2° ed.. ed. Singapore: McGraw-Hi, 1980. ISBN N 0-07-057909-1.

SKOLNIK, M. I. Radar handbook. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2008.

SKOLNIK, M. Introduction to radar systems. Columbus, OH: McGraw-Hill, 2001.

UDDIN, Z.; QAMAR, A.; ALHARBI, A. G.; ORAKZAI, F. A.; AHMAD, A. **Detection of multiple drones in a time-varying scenario using acoustic signals**. Sustainability, MDPI, v. 14, n. 7, p. 4041, 2022.

ANEXO A

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA ARP MAVIC PRO



ANEXO B

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA ARP INSPIRE 1

