

ANÁLISE DA DETECÇÃO DE DRONES POR RADAR MARÍTIMO DE NAVEGAÇÃO EMPREGANDO O SOFTWARE *ADVANCED REFRACTIVE EFFECTS PREDICTION SYSTEM (AREPS)*

Analysis of drone detection by marine navigation radar using AREPS software

Anderson Silva Soares¹, Willian Sathler Lino Soares², Guilherme Ribeiro Colen³, André Pinheiro da Silveira⁴, Paulo Victor Gonçalves Sampaio⁵, Vanessa Przybylski Ribeiro Magri⁶

Resumo: Os *drones* estão conquistando um espaço cada vez maior na sociedade; sua tecnologia vem evoluindo e permitindo que eles se tornem menores e mais eficientes. Entretanto, sua crescente aplicação está-se tornando um problema pelo fato de que essas aeronaves podem ser empregadas para finalidades ilícitas. Logo, é imprescindível saber como os sensores presentes nos meios navais se comportam na tarefa de detectar tais objetos, que possuem valores reduzidos de seção reta radar. O presente estudo visa analisar o desempenho do radar *VisionMaster FT 250* na detecção de *drones*, especialmente do modelo *DJI Phantom 4*, utilizando o *software Advanced Refractive Effects Prediction System (AREPS)*. A análise realizada identificou o alcance máximo de detecção e as melhores configurações para esse caso. Com isso um fluxograma de operação do radar foi desenvolvido com o objetivo de orientar seus operadores a realizar o monitoramento dessa ameaça. Conclui-se que o radar pode ser empregado para a detecção de *drones* com certas restrições.

Palavras-chave: Detecção. AREPS. Drone. Sessão reta radar. Configuração radar.

Abstract: Drones are conquering an increasing space in society, their technology has been evolving and allowing them to become smaller and more efficient. However, their increasing application is becoming a problem due to the fact that these aircrafts can be used for illegal purposes. Therefore, it is essential to know how the sensors in naval resources behave in the task of detecting such objects, which have reduced values of radar cross section. The present study analyzed the performance of the *VisionMaster FT 250* radar in detecting drones, especially the *DJI Phantom 4* model, using the *Advanced Refractive Effects Prediction System (AREPS)* software. The analysis performed identified the maximum detection range and the best settings for this case. Thus, a radar operation flowchart was developed to guide its operators to monitor this threat. It is concluded that the radar can be used to detect drones with certain restrictions.

Keywords: Detection. AREPS. Drone. Radar cross section. Radar setup.

1. Capitão de corveta. Mestre em Engenharia Elétrica. Encarregado da Divisão de Reconhecimento Eletrônico, Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: anderson.soares@marinha.mil.br

2. Capitão-Tenente. Mestrando em Engenharia de Telecomunicações pela Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: willian.sathler@marinha.mil.br

3. Doutor em Engenharia Elétrica. Professor do Centro de Instrução Almirante Wandenkolk, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: guilherme.colen@marinha.mil.br

4. Suboficial. Graduando em Matemática. Supervisor da Divisão de Análise de Campo de Guerra Eletrônica do Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: pinheiro.da@marinha.mil.br

5. Capitão-Tenente. Graduado em Ciências Navais. Encarregado da Seção de Inteligência Eletrônica, Centro de Guerra Acústica e Eletrônica da Marinha, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: paulo.sampaio@marinha.mil.br

6. Doutora em Eletromagnetismo. Professora do Departamento de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ - Brasil. E-mail: vanessamagri@id.uff.br

1. INTRODUÇÃO

Drone é um termo popularmente divulgado pela mídia, porém, de acordo com Brasil (2020), o correto é aeronave não tripulada (UA, do inglês *unmanned aircraft*). As UA podem ser classificadas em aeronaves remotamente pilotadas (RPA, do inglês *remotely piloted aircraft*) e em aeronaves autônomas. As primeiras são pilotadas remotamente por um operador, e as últimas possuem tecnologia para que seu voo seja programado previamente e não necessite de intervenção humana durante o percurso. Adicionalmente, as aeronaves que são empregadas em finalidades recreativas são denominadas de aeromodelos.

As RPA multirotores, como o *DJI Phantom 4* ilustrado na Figura 1, são de fácil aquisição e estão em constante evolução, com melhores sensores e baterias que as tornam mais eficientes e menores a cada ano (MICHEL, 2019). Esse tipo de RPA é amplamente empregado em diversas atividades, como: fotografia aérea, inspeção de infraestrutura, monitoramento agrícola, serviços de emergência e entrega de pequenas mercadorias, graças a sua manobrabilidade e alcance (POITEVIN, 2017). Todavia, as RPA multirotores também podem ser empregadas em atividades ilícitas como espionagem, interdição de aeroportos e até atentados terroristas (MICHEL, 2019).

Dessa forma, existe a necessidade de que estudos sejam realizados para descobrir o nível de proteção que os atuais sistemas de detecção empregados nos navios possuem diante dessa ameaça. Além disso, a necessidade deste estudo justificava-se pelo fato de que essas RPA são caracterizadas por um valor reduzido de sessão reta radar (RCS, do inglês *radar cross*

section) por seu reduzido tamanho e pelos materiais com que são construídas (SEMKIM et al., 2020).

A RCS representa a força reflexiva de um alvo, ou em outras palavras a visibilidade que um objeto possui para o radar. Bruder (2013) afirma que o valor de RCS em aplicações como análises de detecção estatística é descrito por seu valor médio. Outro ponto importante relacionado à RCS é que, de acordo com Sholnik (1981), seu valor tende a aumentar quando se utilizam frequências maiores.

Nesse sentido, Drozdowicz (2016) apresentou um sistema experimental baseado em radares de onda contínua modulado em frequência (FMCW), que opera em 35 GHz e pode ser utilizado para acompanhamento e reconhecimento de RPA multirotores. Já Semkim et al. (2020) analisaram a RCS de diversos RPA para a faixa de frequências de 26 até 40 GHz. Enfim, Null et al. (2017) apresentaram um sistema baseado em radares de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) e de multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM) para vigilância de grandes áreas e detecção de *drones*.

Tendo em vista esse panorama, o presente estudo visa analisar o desempenho da detecção do radar de navegação *VisionMaster FT 250* (FT 250), da empresa *Northrop Grumman Sperry Marine B.V.*, na tarefa de detectar um RPA quadricóptero modelo *DJI Phantom 4*. Permite-se assim mensurar se esse radar, já existente em meios navais com a finalidade de navegação, tem o potencial de ser utilizado para a detecção desse tipo de aeronave. Dessa forma, contribui-se para o planejamento de futuras missões que incluam essa nova ameaça. Adicionalmente, o radar selecionado é um equipamento consolidado no mercado e que possui seus dados técnicos disponibilizados em fonte aberta na internet. Por fim, a escolha da RPA dá-se pelo fato de se tratar de um modelo popular, de fácil aquisição, que possui elevada manobrabilidade e a capacidade de transportar uma câmera de alta resolução, podendo ser empregada para atividades de espionagem.

O estudo identificou as melhores configurações de operação do radar para a tarefa proposta, os valores de alcance e a altitude máxima de detecção. De posse dessas informações, criou-se um fluxograma de operação do radar com o objetivo de orientar os operadores na tarefa de monitorar a ameaça em foco, extraíndo a máxima eficiência do radar. Por fim, este trabalho possibilita mensurar a operacionalidade do radar escolhido para a tarefa proposta.



Fonte: DJI Phantom 4 (2021).

Figura 1. Aeronave remotamente pilotada quadricóptero *DJI Phantom 4*.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o desempenho do radar FT 250 na tarefa de detectar um RPA multirotor. Os objetivos específicos são obter as melhores configurações de operação de acordo com a escala de alcance selecionada, obter os valores de alcance de detecção máximo para diferentes altitudes, obter a altitude máxima de detecção para cada largura de pulso (τ) e gerar aos operadores desse radar instruções para maximizar a detecção e o monitoramento de RPA iguais ou similares ao *DJI Phantom 4*, por meio de um fluxograma.

3. METODOLOGIA

Com o objetivo de realizar simulações com a RCS de uma RPA multirotor, foi empregado o resultado obtido por Sedivy e Nemeč (2021), que ao realizar medidas em câmara anecoica encontraram o valor médio de RCS monostático de $0,02 \text{ m}^2$ para a RPA *DJI Phantom 4*, para a frequência de 9 GHz. A RCS monostática é obtida utilizando o transmissor (Tx) e o receptor (Rx) espacialmente colocalizados, ou seja, quando a mesma antena é usada para transmissão e recepção (BRUDER, 2013). Esse valor de RCS foi inserido no *software* AREPS para gerar a configuração do alvo. Esse programa é empregado em pesquisas científicas e em análises operacionais militares para a modelagem de propagação eletromagnética e a predição do alcance de detecção de radares em função das condições ambientais (PATTERSON, 2007). Para gerar os resultados, o AREPS também foi configurado com os dados do radar FT 250 e os dados atmosféricos da região costeira próxima à cidade do Rio de Janeiro (RJ).

Os parâmetros do radar FT 250 — frequência, potência de pico, τ , figura de ruído do receptor, máximo alcance instrumentado, frequência de repetição de pulso (f_p), ganho da antena, taxa de rotação da antena (ω_m), largura de feixe horizontal e largura de feixe vertical — foram obtidos de manual técnico (NORTHROP GRUMMAN SPERRY MARINE, 2006) e usados para gerar as configurações do radar no *software*, como apresentado na Figura 2.

O radar FT 250 utiliza uma antena formada por *array de slots*, motivo por que, para representar o padrão de irradiação dessa antena, foi escolhido o padrão *sinc(x)* não normalizado.

Figura 2. Tela de inserção dos parâmetros do radar no *software* AREPS, para a configuração 2.

Além disso, foi usado como perdas assumidas pelo sistema o valor de 1 dB, pois se considerou que o sistema possui poucas perdas. A probabilidade de falso alarme, que é a probabilidade de na ausência de sinal de eco um pico de ruído ser detectado erroneamente como um sinal útil, foi configurada na maior constante possível pelo fato de RPA similares à analisada possuírem pequeno valor de RCS, o que tende a aumentar o valor da probabilidade de falso alarme (POITEVIN, 2017). Essas configurações também foram inseridas no *software* AREPS.

O radar FT 250 pode trabalhar com as frequências de 3.050 MHz (banda S) e 9.410 MHz (banda X). A banda X foi a escolhida para as simulações, pois é a que oferece melhor identificação e discriminação de alvos. Adicionalmente, de acordo com o manual técnico, o radar opera com diferentes valores de τ , f_p , ω_m e escala de alcance. O operador pode realizar a seleção dos valores desses parâmetros no *display* de operação do radar (NORTHROP GRUMMAN SPERRY MARINE, 2006).

Os valores de τ são: pulso curto ($0,05 \mu\text{s}$), pulso médio ($0,25 \mu\text{s}$) e pulso longo ($0,75 \mu\text{s}$), que são selecionados no *display* de operação de maneira manual ou automática. Ademais, para pulso curto, a f_p pode ser configurada em 1.800 Hz ou 3.000 Hz; já para pulso médio, a f_p admite apenas o valor de 1.800 Hz; e, para pulso longo, o valor de f_p é 785 Hz. Em todas as larguras de pulso, a ω_m pode ser configurada em 28 ou 45 RPM (NORTHROP GRUMMAN SPERRY MARINE, 2006). As oito configurações selecionadas para a banda X são apresentadas na Tabela 1.

O radar permite ao operador a seleção dos valores da escala de alcance apresentados na Tabela 2. Ademais, para

Tabela 1. Configurações da banda X utilizadas na simulação.

N°	τ (μ s)	f_p (Hz)	ω_m (RPM)
1	0,05	1,800	45
2	0,05	1,800	28
3	0,05	3,000	45
4	0,05	3,000	28
5	0,25	1,800	28
6	0,25	1,800	45
7	0,75	785	28
8	0,75	785	45

Fonte: Northrop Grumman Sperry Marine (2006).

Tabela 2. Escalas de alcance disponíveis ao operador.

Escala de alcance em milhas náuticas (mn)	Escala de alcance em metros (m)	τ (μ s)	Configurações
0,125	231,5	0,05	1 a 4
0,25	463	0,05	1 a 4
0,5	926	0,05/0,25	1 a 6
0,75	1.389	0,05/0,25	1 a 6
1,5	2.778	0,05/0,25	1 a 6
3	5.556	0,05/0,25/0,75	1 a 8
6	11.112	0,25/0,75	5 a 8
12	22.224	0,25/0,75	5 a 8
24	44.448	0,25/0,75	5 a 8
48	88.896	0,75	7 e 8
96	177.792	0,75	7 e 8

Fonte: Northrop Grumman Sperry Marine (2006).

cada valor dessa escala apenas algumas configurações existentes na Tabela 1 são disponíveis, pois, ao se alterar a escala de alcance, o radar limita os valores de τ .

Para cada configuração apresentada na Tabela 1, o *software* AREPS gerou o alcance de detecção em diferentes altitudes; o alcance máximo de detecção e a altitude máxima de detecção foram identificados em cada caso. O radar não fornece ao operador a informação de altitude, porém saber em

qual altitude uma UA pode se aproximar sem ser detectada é importante para estimar o nível de proteção que o radar fornece. O *software* foi configurado para gerar resultados com o valor máximo de exatidão disponível, de 90%. De posse desses resultados, um fluxograma de operação foi desenvolvido para guiar os operadores na tarefa de maximizar a eficiência desse radar para a detecção e o monitoramento de objetos com RCS igual ou similar ao da ameaça em foco.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Utilizando os dados das simulações obtidas pelo *software* AREPS, as Figuras 3, 4 e 5 foram criadas. Elas apresentam, respectivamente, os resultados das configurações presentes na Tabela 1, que utilizam pulso curto, médio e longo.

De acordo com a Figura 3 é possível observar que, para o pulso curto de duração 0,05 μ s, a detecção é realizada até o alcance máximo de 5.186 m na altitude de 25 m, e que a altitude máxima de detecção é de 807 m, com alcance máximo de 3.704 m. Além disso, a configuração que obteve melhor desempenho foi a 4, com f_p de 3.000 Hz e ω_m de 28 RPM.

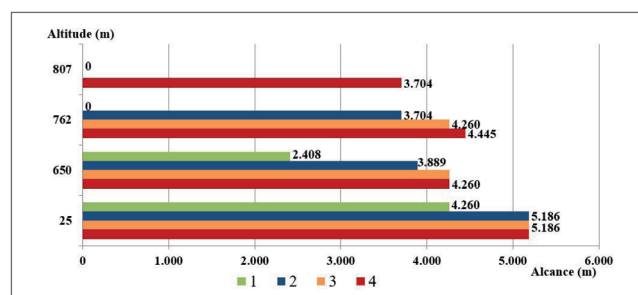


Figura 3. Valores do alcance da detecção radar para diferentes valores de altitude, empregando pulso curto.

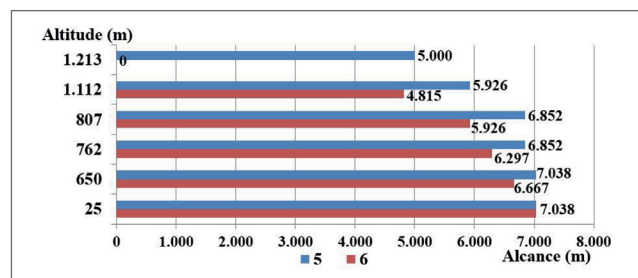


Figura 4. Valores do alcance da detecção radar para diferentes valores de altitude, empregando pulso médio.

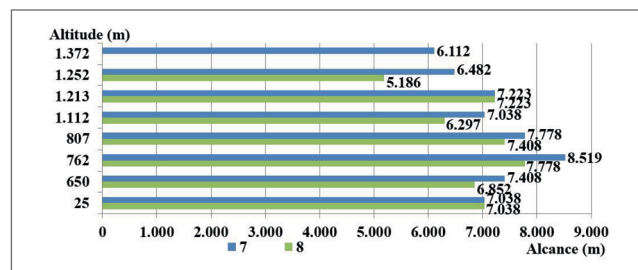


Figura 5. Valores do alcance da detecção radar para diferentes valores de altitude, empregando pulso longo.

Ao se analisar a Figura 4, nota-se que com o pulso médio de duração de 0,25 μ s é possível detectar o RPA ao alcance máximo de 7.038 m em 25 m e 650 m de altitude. A altitude máxima de detecção é de 1.213 m, com alcance de detecção máximo de 5.000 m. De forma complementar, a configuração que obteve os melhores resultados foi a 5, com f_p de 1.800 Hz e ω_m de 28 RPM.

Podemos perceber, ao observar a Figura 5, que o emprego do pulso longo de duração 0,75 μ s permite maiores alcance e altitude de detecção se comparado às demais τ . Adicionalmente, a configuração 7 obteve melhores resultados, com alcance máximo de detecção de 8.519 m para a altitude de 762 m e altitude máxima de detecção de 1.372 m. A RPA *DJI Phantom 4* possui teto máximo de serviço acima do nível do mar, de 6.000 m (DJI PHANTOM 4, 2021); logo, caso se aproxime acima de 1.372 m, não será detectada.

Na presença da ameaça em lide, o operador do radar precisa estar atento à seleção da escala de alcance, τ , ω_m e de f_p . Isso porque τ está relacionada à resolução em distância. A resolução em distância representa a partir de que ponto se começa a confundir dois ou mais alvos como sendo um só, devido a pouca separação em distância entre os alvos em relação ao radar (SHOLNIK, 1981). Menores valores de τ fornecem melhor resolução em distância e, pelo pequeno valor da RCS do objeto em análise, é desejável que o radar opere com a maior capacidade de resolução em distância para melhor acompanhamento do alvo (POITEVIN, 2017).

A Figura 6 apresenta um fluxograma sugerido de operação do radar para o monitoramento da ameaça em análise. As escalas de alcance usadas são apresentadas na Tabela 2 e as configurações, na Tabela 1. Assim, caso o radar ainda não tenha detectado a RPA, é recomendado que opere com sua máxima capacidade de detecção — que, segundo a Figura 5, é obtida pela configuração 7 — e utilize a escala de alcance de 6 mn (11.112 m), tendo em vista que a capacidade máxima de detecção do radar para esse objeto é de 8.519 m, assim não necessitando de escala de alcance superior a essa.

Uma vez que a RPA tenha sido detectada, é importante saber qual a distância a que ela se encontra do radar, para que se possam adotar a melhor configuração e escala de alcance. Se ela estiver a mais de 3 mn (5.556 m), é desejável utilizar a configuração 7 e a escala de 6 mn, pois nessa situação é melhor utilizar a máxima capacidade de detecção. Entretanto, quando essa aeronave estiver entre 3 mn e 1,5 mn, é recomendado alterar a escala de alcance para 3 mn e a configuração para 5,

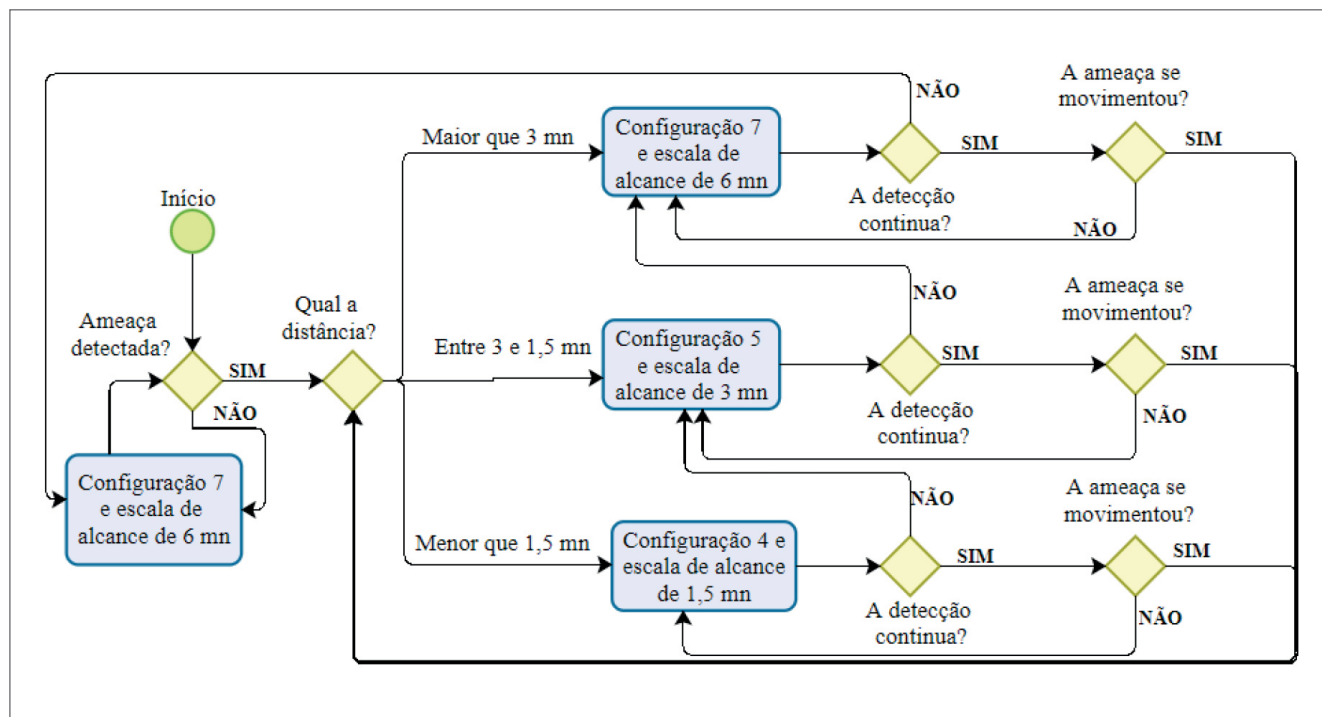


Figura 6. Fluxograma sugerido de operação do radar na presença de uma aeronave remotamente pilotada DJI Phantom 4.

pois nesse caso utilizar pulso médio proporcionará o alcance de detecção necessário e melhorará a resolução em distância. Além disso, a redução da escala para 3 mn proporciona melhor visualização desse alvo no *display* do radar.

Por fim, no momento em que essa ameaça estiver a menos de 1,5 mn (2.778 m) do radar, é indicado que se passe a usar a escala de 1,5 mn e a configuração 4, já que nesse caso o uso de pulso curto gerará alcance de detecção suficiente e proporcionará melhor resolução em distância. Além disso, o uso da escala de 1,5 mn oferecerá melhor visualização desse alvo pelo operador. Em todos esses cenários, o operador deve ficar atento para as situações em que a detecção parar ou a ameaça se movimentar. Nesses casos, será preciso modificar a configuração do radar de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 6.

CONCLUSÃO

Conforme com os resultados apresentados, é possível notar que o radar em análise realiza a detecção da RPA DJI

Phantom 4, pois a configuração 7 fornece alcance de detecção de até 8.519 m para a altitude de 762 m. Contudo, essa RPA possui a capacidade de se aproximar a altitudes superiores a 1.372 m e não ser percebida pelo radar.

Outro ponto importante é que o emprego de ω_m de 28 RPM se mostrou mais eficiente para todos os valores de τ analisados. Adicionalmente, para pulso curto, o uso de f_p de 3.000 Hz apresentou melhores resultados. Finalmente, o operador do radar deve ter atenção na seleção das configurações e escalas de alcance, de acordo com o fluxograma sugerido, para otimizar a detecção e o monitoramento.

Este trabalho apresentou resultados baseados em simulações. Como sugestão de trabalhos futuros, propõem-se testes em campo que empreguem o radar FT 250 e a RPA DJI Phantom 4 ou similar para fins de comparação com os resultados simulados obtidos.

A abordagem utilizada no presente estudo pode ser empregada para outros radares na tarefa de detectar outras UA, permitindo assim realizar uma análise operacional de diferentes radares em relação à tarefa de detectar esse tipo de aeronave.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Defesa. *ICA 100-40, Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro*. Brasil: Ministério da Defesa, 2020.

BRUDER, J.B. IEEE radar standards and the radar systems panel. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, v. 28, p. 19-22, 2013. <https://doi.org/10.1109/MAES.2013.6559377>

DJI PHANTOM 4. Disponível em: https://www.topdrone.com.br/drones/dji/Phantom%204?PS=8&map=c,b,specificationFilter_93. Acesso em: 14 out. 2021.

DROZDOWICZ, J. et al. 35 GHz FMCW drone detection system. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE RADAR, Cracóvia, 2016. *Anais [...]*. 2016.

MICHEL, A.H. *Counter-Drone Systems*. Nova York: Centro de Estudos de Drones, Universidade Bard, 2019.

NORTHROP GRUMMAN SPERRY MARINE. *VisionMaster FT: Ships Manual*. Surrey: Northrop Grumman Sperry Marine, 2006.

NULL, B. et al. MIMO OFDM Radar System for Drone Detection. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE RADAR, 18., 2017, Praga. *Anais [...]*. 2017.

PATTERSON, W.L. *Advanced Refractive Effects Prediction System (AREPS)*. San Diego: Centro de Guerra Espacial e Naval, 2007.

POITEVIN, P. et al. Challenges in detecting UAS with radar. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL IEEE DE CARNAHAN, 2017. *Anais [...]*. 2017.

SEDIVY, P.; NEMEC, O. *Drone RCS Statistical Behaviour*. Pardubice: Organização do Tratado do Atlântico Norte, Organização de Ciência e Tecnologia, 2021.

SEMKIM, V. et al. Analyzing radar cross section signatures of diverse drone models at mmWave frequencies. *IEEE Access*, v. 8, p. 48958-48969, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979339>

SHOLNIK, M.L. *Introduction to radar systems*. 3. ed. Cingapura: McGraw-Hill, 1981.