

Capacidade de Detecção da Aeronave UAV X-47B em Função da Predição da RCS Estática

Newton A. S. Gomes^{1,2}, Renan M. Richter¹, Braulio H. K. Lopes³ e Maurício R. Baldan^{1,2}

¹ Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos/SP - Brasil

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos/SP - Brasil

³ Composite Wave Solutions - CWS, São José dos Campos/SP - Brasil

Resumo—O pilar doutrinário "Sobrevivência em Combate" ganha dia a dia mais notoriedade no meio militar. Os recentes conflitos, tais como a Guerra da Ucrânia, bem como o embate entre Azerbaijão e Armênia, denotam o crescente uso de *loitering munitions* e UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles* - Veículos Aéreos Não Tripulados) como plataformas aéreas de ataque, diminuindo o contato humano nas linhas de combate. Este trabalho realiza a predição radar do UAV X-47B baseado em sua RCS (*Radar Cross Section* - Seção Reta Radar) estática nas bandas de frequência VHF, L, S, C e X através de simulações eletromagnéticas. Emprega-se um radar hipotético para avaliar os maiores alcances de detecção entre as bandas supracitadas. Os resultados demonstram que a banda VHF obteve o maior alcance de detecção, com um ganho de 272,2% em relação à banda L. Dessa forma, a análise da RCS de uma plataforma aérea com uma geometria do tipo asa voadora em forma de delta, como o UAV X-47B, sem materiais absorvedores eletromagnéticos, não apresenta características furtivas nas bandas do espectro eletromagnético analisadas.

Palavras-Chave—UAV, RCS, Detecção Radar.

I. INTRODUÇÃO

O advento das aeronaves não tripuladas foi revolucionário no meio militar, tanto na sua concepção quanto no emprego [1]. Nesse contexto, os UAVs tem se destacado nas funções de apoio e ataque ao solo, em regiões de conflito como no Afeganistão e recentemente, na guerra da Ucrânia [2], [3]. No entanto, a doutrina das Forças Aéreas de vários países carecem de conhecimento e informações específicas aplicadas a processos de controle e principalmente, detecção radar dessas estruturas aéreas em várias frequências eletromagnéticas [4].

Assim, o presente estudo propõe uma metodologia para avaliar o grau de furtividade radar da aeronave de combate UAV X-47B. Essa função é executada a partir da estimativa computacional da RCS em função de um conjunto de frequências de engajamento. Atualmente, devido à escassez de informações sobre a RCS dos UAVs na literatura, principalmente os de aplicações militares, esse trabalho deseja minimizar essa assimetria no contexto técnico-operacional do combate aéreo.

O artigo está dividido da seguinte forma: a seção II apresenta a fundamentação teórica, o conceito da RCS e da equação Radar. Além disso, um pequeno histórico sobre a origem e desenvolvimento do UAV X-47B será apresentado. Na seção III é discutido o processo de modelagem e simulação do UAV X-47B. Na seção IV é apresentada a RCS do X-47B em função das frequências e a predição do alcance radar. Ao final, é apresentada a conclusão do trabalho.

Newton A. S. Gomes, newtonsg@ita.br/newton.gomes@inpe.br; Renan M. Richter, richter@ita.br; Braulio H. K. Lopes, lopes@compositewave.com.br; Maurício R. Baldan, mauricio.baldan@inpe.br.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. UAV X-47B

Nos anos 1970, foi iniciado na DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) um projeto de desenvolvimento de um UAV conhecido como *Amber*. A partir desse projeto originou-se a aeronave MQ-1 *Predator* empregada pelas forças militares dos EUA, que iniciou sua operação em 1995 [5].

Em 1997, a DARPA iniciou o programa de desenvolvimento UCAV (*Uninhabited Combat Air Vehicle* - Veículo Aéreo de Combate Não Tripulado), em paralelo com a USAF (*United States Air Force* - Força Aérea dos Estados Unidos) que desejava obter uma plataforma multi-missão com uma capacidade do tipo SEAD (*Suppression of Enemy Air Defenses* - Supressão de Defesas Aéreas Inimigas). Esse esforço originou o demonstrador Boeing X-45A, sendo o primeiro drone a executar um disparo de armamento aéreo de forma autônoma [6].

Nos anos 2000, a USN (*United States Navy* - Marinha dos Estados Unidos) lançou programa UCAV-N (*Uninhabited Combat Air Vehicle - Naval* - Veículo Aéreo de Combate Não Tripulado - Naval), no intuito de desenvolver um demonstrador de tecnologia de ataque, capaz de transportar uma carga útil de 1.814 kg e de ISR (*Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance* - Inteligência, Vigilância e Reconhecimento) com autonomia de 12 horas de voo e raio operacional de 650 NM, embarcado em porta-aviões. A DARPA e a USN emitiram contratos de projeto para Boeing e Northrop Grumman. A Boeing responde com a plataforma designada X-46, baseado no modelo X-45, e a Northrop Grumman apresenta o X-47, Fig. 1 [6].



Fig. 1. Aeronave UAV X-47B [7].

A Northrop Grumman, com recursos próprios, criou inici-

almente um pequeno demonstrador de prova de conceito, denominado X-47A *Pegasus*, voando em 2003. Posteriormente, foi desenvolvido o X-47B, no período de 2011 a 2015. O X-47B foi o primeiro UAV a decolar e pousar de porta-aviões e a realizar o reabastecimento em voo de forma autônoma. Essa aeronave obteve o equilíbrio entre uma capacidade aerodinâmica para voos de longo alcance e resistência estrutural, capacidade de sobrevivência e estabilidade de voo em baixa velocidade, adequados as operações em porta-aviões, tendo como um dos requisitos a capacidade de furtividade radar [6].

B. Equação Radar e a RCS

O conceito do radar está associado à propagação de ondas eletromagnéticas, empregando as equações de Maxwell [8]. Um sistema radar básico é composto por um transmissor, um receptor e uma antena, sendo emitido um conjunto de sinais pulsados em micro-ondas, onde a energia eletromagnética transmitida pela antena é definida pelo vetor de *Poynting* ($\vec{S}$) apresentado em (1) cuja onda eletromagnética é composta pelo campo elétrico $\vec{E}$ e o campo magnético $\vec{H}$ [9].

$$\vec{S}(r, \theta, \phi) = \vec{E}(r, \theta, \phi) \times \vec{H}(r, \theta, \phi) \quad (1)$$

O vetor de *Poynting* corresponde a densidade direcional do fluxo de energia transferida por unidade de área, W/m^2 , de um campo eletromagnético em um determinado volume no espaço, em uma frequência específica [10]. O princípio de funcionamento do radar corresponde a detecção do fluxo de energia espalhado pelo alvo, sendo detectado pelo receptor radar, o qual define uma distância máxima entre esse alvo e o radar por (2) [11].

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k_B T_e B W F (S N R_o)_{min}}} \quad (2)$$

Nesta condição, o alcance radar está formatado para parâmetros inerentes às características do radar, como amplificador de potência de transmissão (P_t), o ganho da antena (G), o comprimento de onda eletromagnética emitida (λ) em função da frequência de operação, a constante de Boltzmann (k_B), a temperatura de operação do sistema (T_e), a largura de banda do receptor radar (BW), a figura de ruído do receptor (F) e a relação sinal-ruído do receptor ($S N R_o$). A única variável independente do sistema radar é a RCS σ do alvo [9].

$$\sigma(\theta, \phi) = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left| \frac{\vec{E}_s(r, \theta, \phi)}{\vec{E}_i(r, \theta, \phi)} \right|^2 \quad (3)$$

Conforme em (3), a RCS (σ) corresponde a relação entre o campo elétrico espalhado pelo alvo ($\vec{E}_s$) e o campo elétrico incidente pelo radar ($\vec{E}_i$) em função dos ângulos azimutais (ϕ) e de elevação (θ). O valor da RCS em (3) é dado em m^2 , sendo utilizado também o valor em $dBsm$, definido por (4). Os valores da RCS, quando estão abaixo de $1m^2$, são normalmente empregados na unidade de $dBsm$. Este trabalho utiliza os valores da RCS em $dBsm$ [9].

$$\sigma = 10 \cdot \log_{10}(\sigma [m^2]) [dBsm] \quad (4)$$

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Modelagem e Simulação do UAV X-47B

O estudo da RCS de alvos complexos, como é o caso de um UAV, é realizado por meio de medidas eletromagnéticas em uma câmara anecoica ou por métodos computacionais numéricos utilizando softwares específicos para a modelagem e simulação eletromagnética [12].

O CAD (*Computer Aided Design*) foi modelado geometricamente pelo software *FreeCAD* nas dimensões de 12,07 m de comprimento, 19,0 m de envergadura e 3,2 m de altura [6], Fig. 2.

O software utilizado no estudo é o FEKO® da empresa ALTAIR, sendo aplicado o método assintótico RL-GO (*Ray Launching Geometrical Optics*) com discretizações (*mesh*) de $\lambda/2$ no CAD. Todas as modelagens e simulações utilizaram uma máquina Intel Xeon E-2246 com 12 núcleos e uma memória RAM de 64 GB.

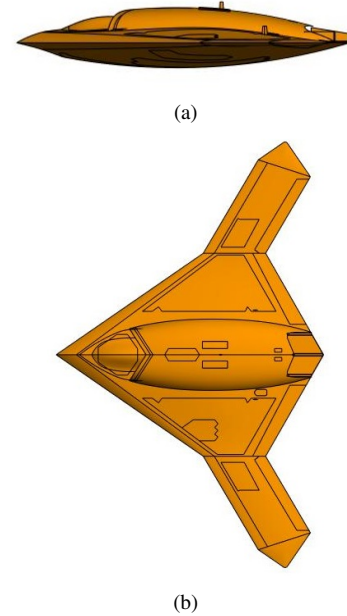


Fig. 2. (a) Visão lateral do CAD do X-47B. (b) Visão de topo do X-47B.

A estrutura física do UAV é modelada com materiais condutores metálicos, conhecidos na literatura como PEC (*Perfect Electric Conductor*). Nesta topologia de material, o UAV está na configuração de melhor caso para a detecção, correspondendo ao de máxima reflexão das ondas eletromagnéticas em função do material empregado. Esta condição é essencial para compreender o efeito geométrico da conformação aeronáutica em função das frequências eletromagnéticas aplicadas em sua superfície.

A partir do CAD importado para o FEKO®, foi aplicado um *mesh* em sua estrutura de PEC, obtendo uma malha triangular, Fig. 3, tendo um total de 42.108 triângulos com um comprimento médio de 0,10 m, e um desvio-padrão de 0,06 m, cujo valor máximo foi de 0,23 m e um valor mínimo de 0,001 m.

Avaliando os tipos de radares primários utilizados mundialmente para uso na defesa aérea e controle de tráfego aéreo empregado para detecção de estruturas aeronáuticas, foram definidas as frequências para as simulações eletromagnéticas, conforme a Tabela I.

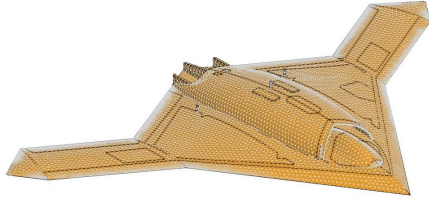


Fig. 3. Apresentação do *mesh* modelado no FEKO® para o UAV X-47B.

TABELA I
FREQUÊNCIAS UTILIZADAS NOS PROCESSOS DE MODELAGEM E
SIMULAÇÃO

Radar	Frequência [GHz]
Banda VHF	0,18
Banda L	1,32
Banda S	2,80
Banda C	5,30
Banda X	10,0

Devido ao tipo de missão que o X-47B foi projetado, as suas ameaças radar estão em áreas terrestres ou navais. Os radares monoestáticos alocados nessas áreas, possuem uma rotação mecânica em torno do seu eixo ou uma varredura eletrônica, no caso, um radar *phased-array* [13].

No FEKO®, a modelagem do engajamento radar é realizada empregando-se coordenadas esféricas, definindo-se os ângulos de azimute ϕ e de elevação θ , conforme a Fig. 4.

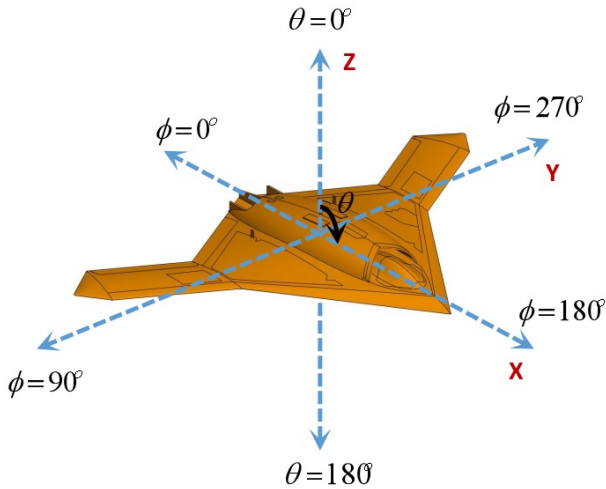


Fig. 4. Definição dos ângulos phi (ϕ) azimutais e theta (θ) de elevação no modelo do UAV X-47B.

O engajamento do radar é realizado com variações de θ e ϕ dependendo do tipo de plataforma empregado e altitude operacional do UAV. Neste trabalho, é utilizado o vetor campo elétrico $\vec{E}$ paralelo ao plano XY do UAV, Fig. 4, correspondendo a uma polarização horizontal, do tipo HH, que representa a emissão de uma onda eletromagnética na polarização horizontal e a detecção de uma onda espalhada, originada do alvo, na polarização horizontal.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. RCS do UAV X-47B

A condição de furtividade radar necessário para classificar uma aeronave ou um artefato aeroespacial está relacionado aos

valores numéricas das RCS obtidas em função dos ângulos de azimute e elevação, bem como a frequência de engajamento. Uma classificação empregada é a LO (*Low Observable* - Baixa Observabilidade) correspondendo a uma RCS média entre -10 dBsm e -30 dBsm e a condição VLO (*Very Low Observable* - Muito Baixa Observabilidade) correspondendo a uma RCS média com valores abaixo de -30 dBsm [14].

Tendo como referência a Fig. 4, é realizado o engajamento radar para a avaliação da RCS do X-47B em um feixe radar no ângulo de $\theta = 90^\circ$ e um ϕ entre 0° e 360° . Esses resultados são apresentados na forma polar, combinando a banda de VHF com as outras bandas de frequência nas Fig. 5 (banda L), Fig. 6 (banda S), Fig. 7 (banda C) e Fig. 8 (banda X).

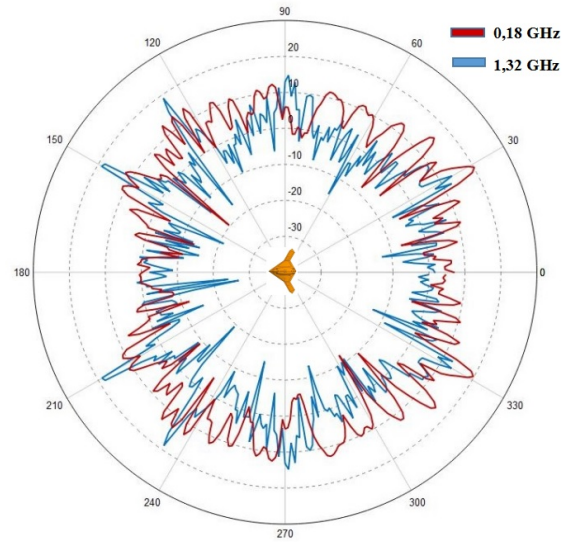


Fig. 5. RCS do X-47B, em dBsm, na frequência de 0,18 GHz e 1,32 GHz na forma polar para $\theta = 90^\circ$.

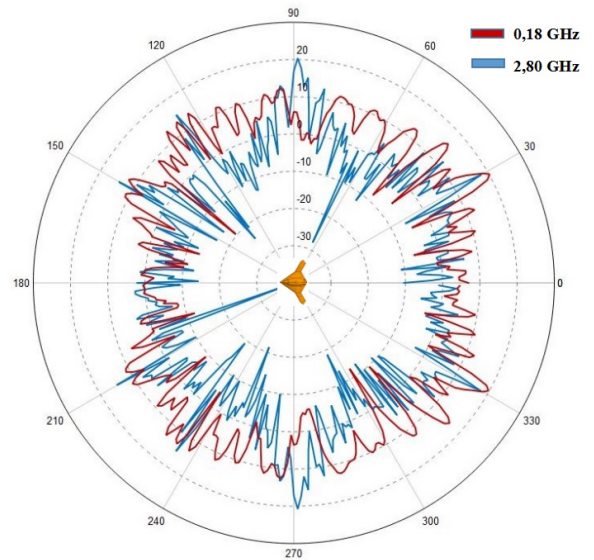


Fig. 6. RCS do X-47B, em dBsm, na frequência de 0,18 GHz e 2,80 GHz na forma polar para $\theta = 90^\circ$.

É observado nas Fig. 5, 6, 7 e 8 que a frequência de 0,18 GHz possui uma RCS superior as outras frequências, em vários azimutes avaliados. Nos ângulos de 90° e de 270° na frequência de 0,18 GHz, o X-47B gera uma RCS reduzida

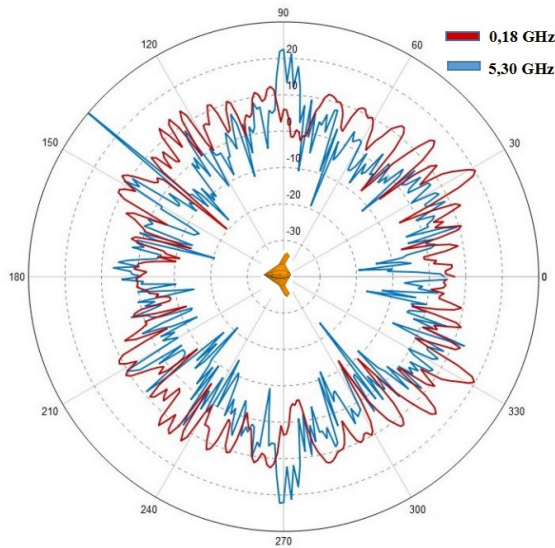


Fig. 7. RCS do X-47B, em dBsm, na frequência de 0,18 GHz e 5,30 GHz na forma polar para $\theta = 90^\circ$.

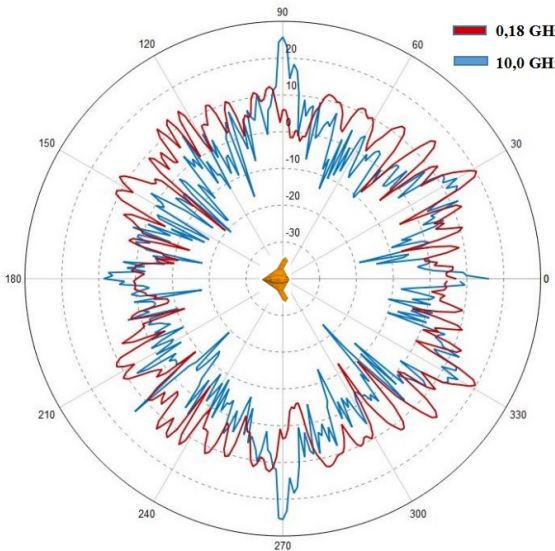


Fig. 8. RCS do X-47B, em dBsm, na frequência de 0,18 GHz e 10,0 GHz na forma polar para $\theta = 90^\circ$.

em relação as outras frequências empregadas na simulação.

No intuito de uma melhor compreensão do efeito da RCS no UAV X-47B é proposto a separação em setores, os quadrantes de engajamento radar, conforme a Fig. 9.

Os quadrantes de engajamento são divididos em 4 setores, Fig. 9. O Setor 1 possui uma variação azimutal de $0^\circ \leq \phi < 90^\circ$, o Setor 2 é de $90^\circ \leq \phi < 180^\circ$, o Setor 3 é de $180^\circ \leq \phi < 270^\circ$ e o Setor 4 é de $270^\circ \leq \phi < 360^\circ$. A partir da definição dos setores de engajamento, para cada conjunto de frequências são determinados os valores médios e o desvio-padrão das RCS. Esses resultados são apresentados na Tabela II.

As RCS nas frequências de 1,32 GHz, 2,80 GHz, 5,30 GHz e 10,0 GHz possuem um valor médio muito próximo para cada setor avaliado. Essa condição implica que mesmo variando as frequências de emissão, os valores das RCS obtidas nas simulações não são muito diferentes em cada setor de engajamento.

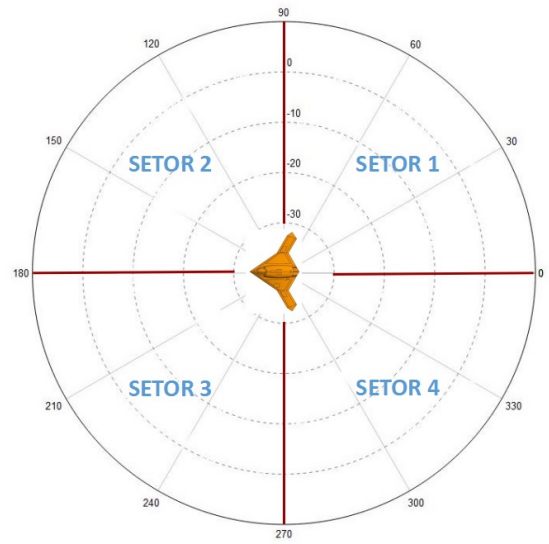


Fig. 9. Definição dos setores de engajamento radar para análise da RCS do UAV X-47B.

TABELA II
VALORES DA RCS MÉDIA E DESVIO-PADRÃO DO UAV X-47B EM
FUNÇÃO DOS SETORES DE ENGAJAMENTO

Freq. [GHz]	Setor 1 [dBsm]	Setor 2 [dBsm]	Setor 3 [dBsm]	Setor 4 [dBsm]
0,18	$6,82 \pm 5,84$	$4,66 \pm 6,47$	$4,65 \pm 6,03$	$6,49 \pm 6,28$
1,32	$1,29 \pm 5,64$	$-1,07 \pm 7,73$	$-1,18 \pm 7,79$	$1,32 \pm 5,93$
2,80	$1,43 \pm 7,24$	$-2,94 \pm 7,75$	$-2,28 \pm 7,83$	$1,49 \pm 7,00$
5,30	$0,72 \pm 7,05$	$-1,19 \pm 8,44$	$-2,16 \pm 7,40$	$1,06 \pm 7,55$
10,0	$1,94 \pm 7,71$	$-2,12 \pm 8,29$	$-1,32 \pm 6,73$	$2,22 \pm 8,20$

Conforme a Tabela II, para a frequência de 0,18 GHz, a RCS nos 4 setores avaliados estão com os valores acima das RCS médias obtidas nas frequências de 1,32 GHz, 2,80 GHz, 5,30 GHz e 10,0 GHz.

É importante evidenciar que essas condições são válidas para um ângulo de elevação no valor de 90° , o que corresponde a um voo de baixa altitude em relação ao radar e o emprego de um material metálico na construção do X-47B.

O critério de furtividade radar, apresentado nesse trabalho, só é realizável com o emprego de materiais absorvedores eletromagnéticos (RAM - *Radar Absorbing Materials*), incorporados na estrutura da aeronave, do tipo RAS (*Radar Absorbing Structures* - Estrutura Absorvedora de Radar) [15]. No caso, para as frequências de 1,32 GHz, 2,80 GHz, 5,30 GHz e 10,0 GHz, o material deve atenuar no mínimo, em média, de 10 dB e para a frequência de 0,18 GHz, o valor de atenuação deve ser no mínimo, em média, de 20 dB.

Considerando um radar hipotético, mantendo constante todas as variáveis atribuídas ao radar na equação radar (2), nas frequências avaliadas nesse trabalho, as únicas variáveis são o comprimento de onda (λ) e a RCS (σ) obtida das simulações eletromagnéticas em função da frequência. Em (5), o valor k corresponde a uma constante do radar hipotético em função de (2), sendo λ e σ as variáveis empregadas para estimar o alcance máximo provável R_{max} .

$$R_{max} = k \cdot \sqrt[4]{\lambda^2 \cdot \sigma} \quad (5)$$

Atribuindo um alcance máximo R_{max} para a frequência de 10 GHz no valor de 20 NM e aplicando (5) para as outras frequências, é estimado os valores de R_{max} . Os resultados

de alcance máximos prováveis de detecção em função das frequências de engajamento são apresentados na Tabela III.

TABELA III
ALCANÇE PROVÁVEL DO ENGAJAMENTO DO X-47B COM UM RADAR
HIPOTÉTICO.

Freq. [GHz]	0,18 [GHz]	1,32 [GHz]	2,80 [GHz]	5,30 [GHz]	10,0 [GHz]
R_{max}	210,6 NM	56,5 NM	37,6 NM	27,1 NM	20,0 NM

Os resultados apresentados na Tabela III evidenciam que as bandas L e S, empregados nas defesas aéreas, possuem um ganho de alcance em relação à banda C e X, contudo, a banda VHF obtém um ganho de alcance muito superior em relação à banda L, no valor de 272,7%.

V. CONCLUSÃO

Esse trabalho apresenta um estudo da RCS do UAV X-47B na condição de voo em baixa altitude, em um perfil de penetração furtiva em um ambiente radar multi-espectral, com frequências nas bandas VHF, L, S, C e X.

Em função dos engajamentos nos setor avaliados, as RCS obtidas em função das frequências, ângulos θ e ϕ , o UAV X-47B obteve valores elevados em relação aos parâmetros que classifica uma aeronave como LO ou VLO. Neste caso, sob essas condições de modelagem e simulação, essa aeronave não pode ser considerada furtiva ao radar na faixa de micro-ondas.

No intuito de atender os requisitos de furtividade radar é necessário a aplicação de materiais absorvedores eletromagnéticos em sua estrutura (RAS), priorizando o maior número de frequência a serem otimizadas no intuito de obter a redução da RCS no mínimo de 10 dB.

A predição da RCS no X-47B, em várias frequências de engajamento, apresenta valores elevados da RCS na faixa de VHF. Essa condição implica que radares nessa banda possuem uma maior probabilidade de detecção de aeronaves com capacidades furtivas. Comparando o alcance obtido na banda de VHF com a banda L, a variação da RCS com valor médio de 5 dB, implica em uma variação do alcance de detecção no valor de 272,7%.

Esse trabalho evidencia que, a análise da RCS de uma plataforma aérea com uma geometria tendo uma provável capacidade "stealth", como uma asa voadora em forma de delta, não necessariamente terá uma furtividade radar efetiva. É desejável que se realize avaliações do tipo apresentadas nesse trabalho no intuito de obter uma previsibilidade inicial dessa capacidade furtiva e se necessário, apontar o caminho de melhorias em seu projeto aeronáutico.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS) do INPE, pelo uso das suas instalações computacionais e a empresa ALTAIR pela possibilidade de emprego do software FEKO® nas modelagens e simulações eletromagnéticas.

REFERÊNCIAS

- [1] W. W. Greenwood, J. P. Lynch, and D. Zekkos, "Applications of UAVs in Civil Infrastructure," *Journal of infrastructure systems*, vol. 25, no. 2, p. 04019002, 2019.
- [2] R. Stojar, "The Drones and Issues Connected with Their Use in Contemporary Conflicts," in *International Conference Knowledge-Based Organization*, vol. 23, no. 1, 2017, pp. 305–310.

- [3] M. Eslami, "Iran's Drone Supply to Russia and Changing Dynamics of the Ukraine War," *Journal for Peace and Nuclear Disarmament*, vol. 5, no. 2, pp. 507–518, 2022.
- [4] A. G. Westra, "Radar Versus Stealth: Passive Radar and the Future of US Military Power," National Defense Univ Washington DC Inst For National Strategic Studies, Tech. Rep., 2009.
- [5] DARPA, "UAV," Disponível em: <https://www.darpa.mil/about-us/timeline/amber-predator-global-hawk-predator>. Acesso em: 18 outubro 2021.
- [6] J. Whittenbury, "Configuration Design Development of the Navy UCAS-D X-47B," in *AIAA Centennial of Naval Aviation Forum "100 Years of Achievement and Progress"*, 2011, p. 7041.
- [7] Lucas Karasinski, "Como seria a terceira guerra mundial na era high-tech," Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/tecnologia-militar/22374-como-seria-a-terceira-guerra-mundial-na-era-high-tech.htm>. Acesso em: 28 de maio 2023.
- [8] D. J. Griffiths, *Eletrodinâmica*, 3rd ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.
- [9] E. F. Knott, J. F. Schaeffer, and M. T. Tulley, *Radar Cross Section*. SciTech Publishing, 2004.
- [10] C. Balanis, *Teoria de Antenas*. Rio de Janeiro: LTC, 2009, vol. 1.
- [11] B. Mahafza, *Radar Signal Analysis and Processing using Matlab*, Alabama, 2009.
- [12] M. Ezuma, C. K. Anjinappa, M. Funderburk, and I. Guvenc, "Radar Cross Section Based Statistical Recognition of UAVs at Microwave Frequencies," *arXiv preprint arXiv:2102.11954*, 2021.
- [13] A. J. Fenn, D. H. Temme, W. P. Delaney, and W. E. Courtney, "The Development of Phased-array Radar Technology," *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 321–340, 2000.
- [14] Air Power Australia, "A Preliminary Assessment of Specular Radar Cross Section Performance in the Chengdu J-20 Prototype," Disponível em: <https://www.ausairpower.net/APA-2011-03.html#A.1>. Acesso em: 1 de junho 2023.
- [15] D. C. Silveira, N. A. S. Gomes, M. C. Rezende, and E. C. Botelho, "Microwave Absorbing Properties of Glass Fiber/Epoxy Resin Composites Tailored with Frequency Selective Surface based on Nonwoven of Carbon Fibers Metalized with Nickel," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 31, pp. 13 095–13 103, 2020.