



Aplicação de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética na redução da Seção Reta Radar.

**Felipe de Moraes Yamamoto¹, Braulio Haruo Kondo Lopes¹, Renan Miranda Richter³,
Maria Tereza Fabbro^{1,4}, Giovana Silva Cembranelli¹, Mauricio Ribeiro Baldan¹, Luís
Presley Serejo dos Santos², Sérgio Luiz Mineiro¹**

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

Aluno de Mestrado do curso de Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores - CMS.

²Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, SP, Brasil

³ Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil

⁴Instituto Federal de São Paulo, Campus São José dos Campos, SP, Brasil

felipe.yamamoto@inpe.br

Resumo. Este trabalho se refere a uma aplicação aeronáutica de materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) em aeronaves e seus efeitos na redução de sua seção reta radar (Radar Cross Section – RCS). As análises e testes foram realizados por meio da caracterização eletromagnética do MARE em guia de ondas retangular, seguido de simulações eletromagnéticas no software FEKO (Altair). O estudo viabiliza o desenvolvimento de um novo MARE, o qual foi comparado com outros absorvedores descritos na literatura que apresentaram resultados promissores para a banda X de frequências eletromagnéticas, apresentando atenuação em torno de 16 dB na RCS da aeronave, o que reduziria o alcance normal de um radar em cerca de 97% para uma incidência normal ao plano da aeronave.

Palavras-chave: Material absorvedor de radiações eletromagnéticas; Seção reta radar; Caracterização eletromagnética; FEKO; Banda X.

1. Introdução

Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (MARE) tem chamado atenção no cenário tecnológico atual devido a suas diversas aplicações, que podem variar desde seu uso em setores civis, como, por exemplo, em antenas de altíssimo desempenho no setor de telecomunicações (Itoh & Okano, 2022; Omoru & Srivastava, 2022), como materiais de recobrimento em câmaras anecoicas e laboratórios de caracterizações eletromagnéticas



(Ifeoma Orakwue et al., 2023; Stoica et al., 2022), no setor espacial é utilizado nos sistemas de comunicação via satélite (Qu et al., 2022) os quais, também, trabalham por meio do uso de antenas, e no setor militar, onde este tipo de material é utilizado principalmente para tornar objetos como mísseis e aeronaves indetectáveis por radares (Darzi & Ghadi, 2022). Com o uso de radares é possível se identificar objetos próximos que entram em seu alcance, esse reconhecimento é realizado através da seção reta radar (Radar Cross Section – RCS) (Liu et al., 2022; Qi et al., 2022; Taj et al., 2023; Zhang et al., 2023), que é obtido através do espalhamento de reflexão causado quando a onda eletromagnética sofre ao interagir com a estrutura do objeto alvo. Grande parte dos radares aeroembarcados e radares de satélites trabalham com frequências da banda X (8,2 – 12,4 GHz), especificamente com a frequência de 9,6 GHz (Gagliardi et al., 2022; Sharma, Gupta, & Sharma, 2023; Sharma, Gupta, Sharma, et al., 2023). Em função das informações apresentadas foi escolhida a aeronave Douglas A-4 Skyhawk da Boeing para analisar como esta aeronave é detectada por radar que trabalhe com 9,6 GHz quando este está em aeronaves atuando como radar aeroembarcado, e como essa RCS poderia ser afetada caso um material absorvedor de radiações eletromagnética fosse implementado a essa estrutura.

O objetivo deste trabalho é demonstrar que os MARE possuem grande relevância no cenário tecnológico atual, pois a sua implementação na estrutura de aeronaves pode acarretar uma na redução da RCS da mesma, sendo um método muito eficiente de tornar esta aeronave menos detectável. Além disso, será demonstrado que o MARE desenvolvido neste trabalho é capaz de influenciar de maneira significativa a RCS da aeronave selecionada, em comparação a outros materiais reportados na literatura.

2. Metodologia

Neste trabalho foi desenvolvido um MARE baseado em um compósito híbrido que utilizou como matriz a borracha de silicone branco dopada com ferrocarbonila como material magnético e grafite como material elétrico. Na confecção das amostras foi seguido a metodologia demonstrada na Figura 1.

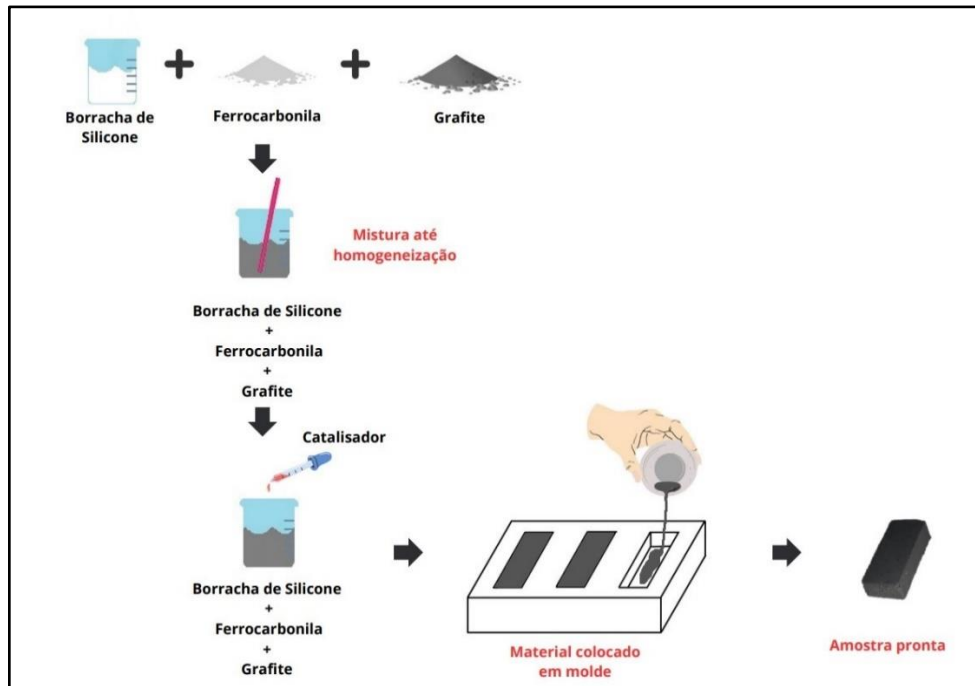


Figura 1. Metodologia de confecção de amostras.

As amostras preparadas tiveram suas propriedades eletromagnéticas medidas através do método do guia de ondas retangular da banda X, o qual foi acoplado a um analisador vetorial de redes (vector network analyzer – VNA). A Figura 2 demonstra o uso do guia de ondas neste trabalho.

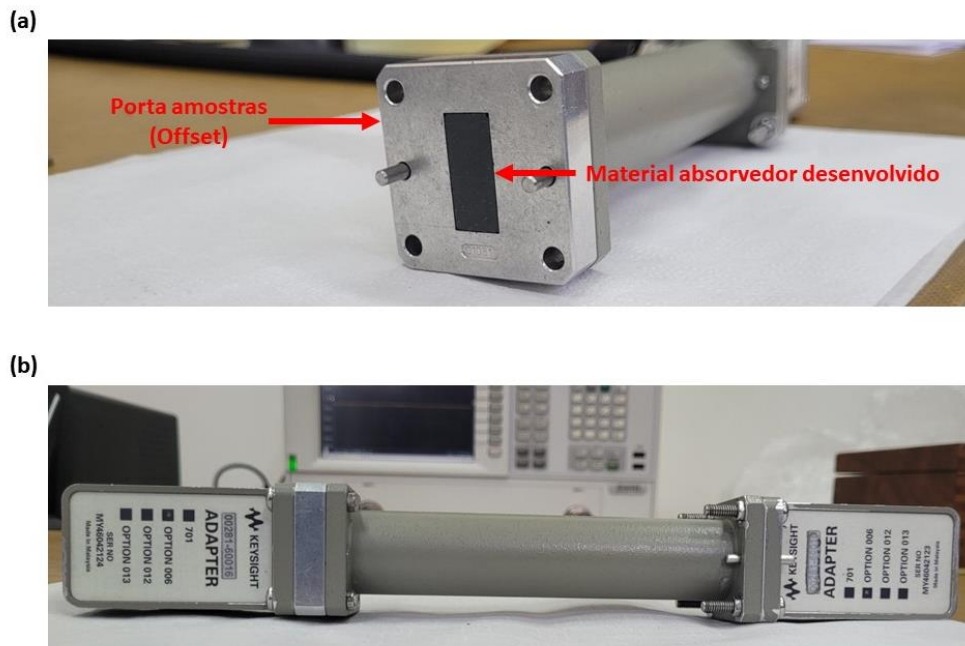


Figura 2. Guia de ondas utilizado para caracterização eletromagnética do material desenvolvido (a) posicionamento da amostra no guia de ondas (b) guia de ondas montado para a medição.



Com estes resultados adquiridos foi realizada uma análise computacional em busca dos melhores parâmetros geométricos para esse material apresentar uma boa performance como material absorvedor de radiações eletromagnéticas. Estas simulações foram realizadas baseadas em ensaios de refletividade. Nestes ensaios é posicionado um material condutor perfeito (Perfect Electric Conductor – PEC) que no caso deste trabalho faz sentido pois a estrutura da aeronave é feita com materiais que se enquadram nesta classe. No ensaio de refletividade uma onda eletromagnética incide sobre o material e a porção que não é nem atenuada nem refletida pelo material acaba sendo refletida pelo PEC, de maneira que é lido apenas os parâmetros de espalhamento de reflexão para se mensurar qual parcela da onda eletromagnética foi atenuada.

Os ensaios computacionais foram realizados com por meio do software FEKO de radiações eletromagnéticas (Altair), varrendo a banda X (8,2 – 12,4 GHz). No software utilizado foram carregadas as medidas experimentais realizadas por meio do método do guia de ondas, o que garante confiabilidade e fidelidade da simulação com as medidas realizadas. O sistema de refletividade criado em software é ilustrado na Figura 3, onde pode-se observar o material absorvedor desenvolvido e o PEC posicionado atrás da amostra.

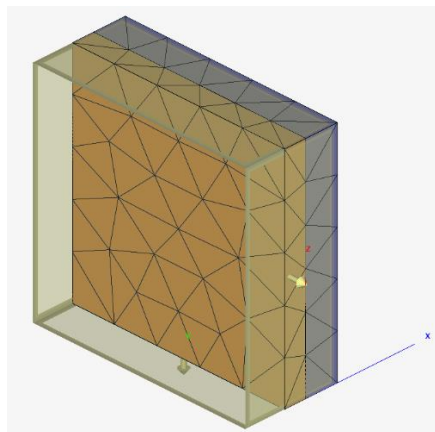


Figura 3. Sistema computacional criado no software FEKO para ensaio de refletividade.

Com o sistema criado em software a espessura da amostra foi variada de 1,5 – 2,1 mm e otimizada para a melhor espessura do material para atenuação na frequência de 9,6 GHz.

A aeronave Douglas A-4 Skyhawk foi analisada a partir de um modelo CAD obtido em um banco de dados gratuito de arquivos stl, o qual pode ser observado na Figura 4. No software de caracterizações eletromagnéticas FEKO, foi considerada que a aeronave toda era composta de metal, que pode ser considerado como um material condutor perfeito no software utilizado. Com este modelo em mãos foram realizadas simulações computacionais para ver como se daria a RCS desta aeronave para um radar que trabalhasse na frequência de 9,6 GHz. Após esta análise ser realizada foi visto como essa RCS se daria com o uso de outros tipos de materiais absorvedores desenvolvidos recobrando sua estrutura, entre eles foi utilizado o material desenvolvido neste trabalho, mas, também, foram utilizados MARE encontrados na literatura, sendo eles a polianilina (PANI) revestida por $Y_3Fe_5O_{12}/CoFe_2O_4$ desenvolvida por



Kivrak et al. (Kivrak et al., 2023), um aerogel de rGO/Ti₃C₂T_x MXene em forma de honeycomb por Bao et al. (Bao et al., 2022) e uma borracha contendo nanotubos de polipirrole Yang et al. (Yang et al., 2023), que demonstraram em seus respectivos trabalhos um bom desempenho como material absorvedor de radiações eletromagnéticas. Os resultados obtidos foram então comparados e analisados.

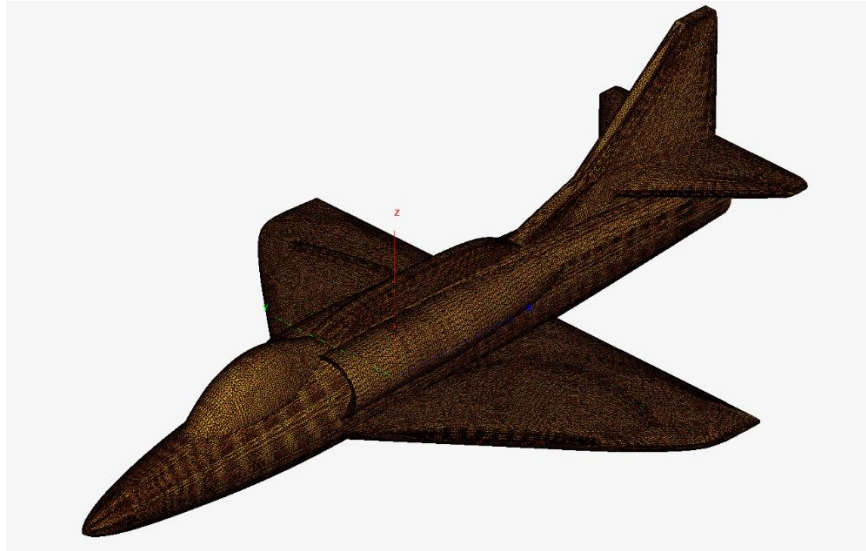


Figura 4. CAD da aeronave Douglas A-4 Skyhawk com sua malha criada.

3. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos no presente trabalho se dividem em duas partes principais. A primeira é o desenvolvimento de um MARE para a banda X (8,2 – 12,4) de frequências, otimizado para atuar na frequência de 9,6 GHz. Os resultados desta otimização podem ser observados na Figura 5.

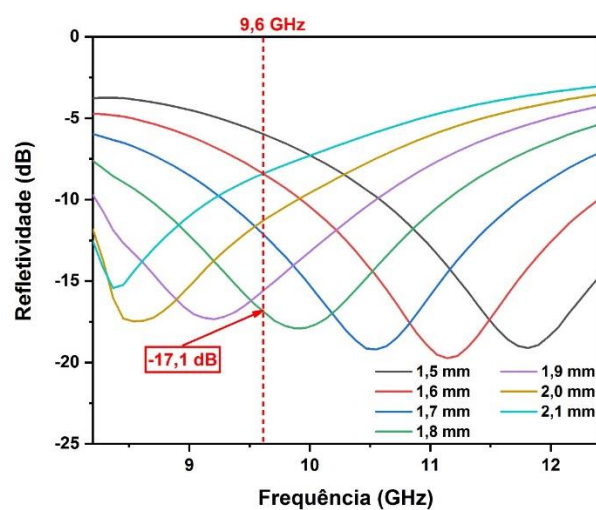


Figura 5. Resultado de atenuação para diferentes espessuras simulados no software FEKO.



Verificando-se os resultados obtidos é possível notar que para a frequência alvo, 9,6 GHz, a espessura que apresentou melhor desempenho como material absorvedor é de 1,8 mm, de maneira que esta foi definida como espessura padrão para o recobrimento da estrutura e teste das RCS com material absorvedor.

Após a otimização do MARE desenvolvido o modelo CAD da aeronave Douglas A-4 Skyhawk foi importado do banco de dados de arquivos stl. citado anteriormente. Este modelo 3D foi então escalonado para as dimensões reais da aeronave. Em seguida foi importado para o software Simlab (Altair), onde a malha foi criada. A malha criada foi então importada para o software FEKO (Altair), onde foi primeiro realizada uma RCS da aeronave considerando que ela fosse completamente composta de material condutor. Nessa simulação foi considerado um radar que irradiaria uma onda plana num plano completo ao redor da aeronave, conforme ilustra a Figura 6.

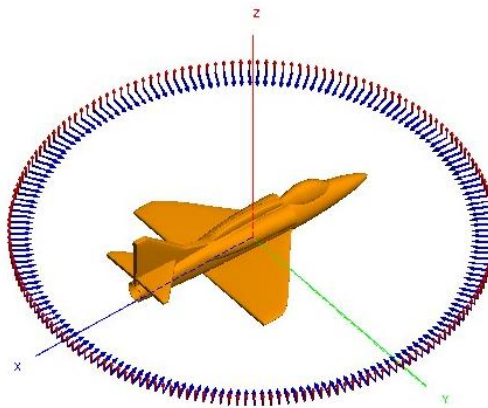


Figura 6. Sistema indicativo de como a onda eletromagnética pode incidir na aeronave para leitura da RCS.

Após essa primeira análise de RCS foi adicionada uma fina camada de 1,8 mm de 4 tipos de materiais absorvedores, sendo que 3 deles foram reportados na literatura como ótimos MARE e o quarto foi desenvolvido neste trabalho.

As propriedades dos MARE testados estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades eletromagnéticas dos MARE testados.

Autores	ϵ'	ϵ''	μ'	μ''
Bao	5	0,01	1	0
Kivrak	6,9	1,5	0,82	0,33
Yang	5,2	3,2	1	0
Yamamoto	18,9	2,9	0,9	0,2



No entanto, o software de simulações eletromagnéticas utilizado necessita dos valores de permissividade e permeabilidade relativas (ϵ_r e μ_r), e as tangentes de perda elétrica ($\tan\delta_\epsilon$) e magnética ($\tan\delta_\mu$), de modo que é necessário se fazer a conversão destes resultados através das seguintes equações:

$$\epsilon_r = \sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2}$$

$$\mu_r = \sqrt{\mu_r'^2 + \mu_r''^2}$$

$$\tan\delta_\epsilon = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$$

$$\tan\delta_\mu = \frac{\mu_r''}{\mu_r'}$$

Com esses valores foi calculado a permissividade e permeabilidade relativas e as tangentes de perda elétrica e magnética que podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2. Valores de permissividade elétrica e permeabilidade magnética relativas, e tangentes de perda elétrica e magnéticas dos materiais selecionados.

Autores	ϵ_r	$\tan\delta_\epsilon$	μ_r	$\tan\delta_\mu$
Bao	5	0,002	1	0
Kivrak	7,06	0,22	0,88	0,40
Yang	6,10	0,61	1	0
Yamamoto	19,11	0,15	0,95	0,23

Com estas propriedades calculadas a aeronave foi revestida com camadas de materiais que possuem estas propriedades eletromagnéticas, sendo equivalente a esses MARE citados, e então foi realizada uma nova simulação de RCS da aeronave com cada um deste materiais estudados. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 7.

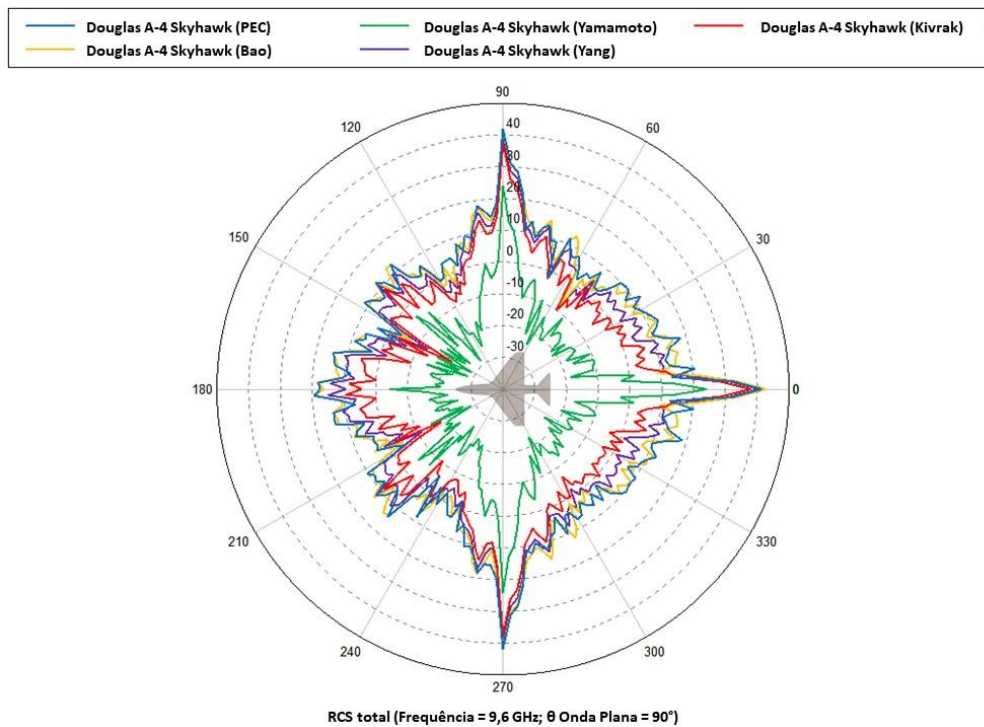


Figura 7. Resultados de RCS simulados para a aeronave Douglas A-4 Skyhawk com diferentes recobrimentos.

4. Conclusão

Analisando a diferença entre as RCS obtidas para aeronave sem material absorvedor e com os MARE selecionados foi possível notar que dentre todos os materiais analisados, o material desenvolvido neste trabalho foi o que apresentou melhor capacidade de atenuação, reduzindo significativamente a RCS da estrutura, além disso, verificou-se que é possível que o alcance de detecção do radar caia bastante com a implementação de MARE em sua estrutura, especialmente no caso do absorvedor desenvolvido neste trabalho, isso se dá devido a diminuição da potência do sinal refletido, sinal este que é utilizado para a detecção de objetos, sendo esta queda da potência do sinal refletido pode ocasionar numa leitura de sinal tão baixa que entre na zona de ruído do radar, a redução média da RCS do material desenvolvido é de 16 dB, o que significa que o alcance do radar seria reduzido em aproximadamente 97% sendo necessário uma maior aproximação do objeto em relação ao radar para que a detecção seja realizada com sucesso. Esta diferença de performance como material absorvedor pode estar relacionada a espessura utilizada, já que os materiais descritos na literatura podem necessitar de espessuras maiores para atuar de uma maneira mais efetiva, porém isto implicaria num aumento do peso que pode ser prejudicial para a aeronave. Um estudo futuro pode ser realizado analisando a efetiva aplicabilidade destes materiais em relação aos esforços estruturais que os mesmos sofreriam durante voo.

Agradecimentos: Agradecimentos à equipe de pós-graduação. Agradecimentos a Altair pela parceria através da disponibilização dos softwares utilizados neste trabalho. O presente



trabalho foi realizado com apoio da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP N° 01340.003985/2022-51).

Referências

- Bao, Y., Guo, S., Li, Y., Jia, Z., Guan, H., Lei, D., Chen, J., Zhong, B., & Li, Z. (2022). Lightweight Honeycomb rGO/Ti3C2T xMXene Aerogel without Magnetic Metals toward Efficient Electromagnetic Wave Absorption Performance. *ACS Applied Electronic Materials*. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c01271>
- Darzi, B., & Ghadi, A. (2022). Radar absorbing photonic-crystal structure containing magnetic Co_{0.9}Fe_{2.1}O₄ ferrite nanocomposite and dielectric materials. *Optik*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169814>
- Gagliardi, V., Bianchini Ciampoli, L., D'Amico, F., & Benedetto, A. (2022). *Integrated health monitoring of masonry arch bridges by remote sensing and ground penetrating radar technologies*. 15. <https://doi.org/10.1117/12.2638935>
- Ifeoma Orakwue, S., Praise, I., & Ifeoma, S. (2023). A Comparative Study on Different Absorbers used in the Design of Anechoic Chamber. In *European Journal of Advances in Engineering and Technology* (Vol. 2023, Issue 1).
- Itoh, T., & Okano, Y. (2022). *Study on accuracy improvement method for UHF-RFID system with the floor applicable microwave absorber*.
- Kıvrak, B., Şergun, A., Karaaslan, M., & Akyol, M. (2023). PANI-coated YIG/CFO hybrid composites as advanced electromagnetic wave absorber through X-band. *Journal of Alloys and Compounds*, 958. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170345>
- Liu, Z., Wang, S., Shao, J., Zhao, W., Yu, G., & Wu, L. (2022). 3D radar stealth composite hierarchical grid structure with extremely broadband absorption performance and effective load bearing. *Composites Part B: Engineering*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110316>
- Omoru, E. O., & Srivastava, V. M. (2022). Testing and Analysis of MOSFET-Based Absorber Integrated Antenna for 5G/WiMAX/WLAN Applications. *Nanomaterials*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/nano12172911>
- Qi, W., Yu, C., Du, J., & Zhao, Y. (2022). Broadband radar cross-section reduction using random chessboard coding metasurface. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 32(10). <https://doi.org/10.1002/mmce.23306>
- Qu, Z., Hao, J., Jing, H., Wei, Y., Duan, J., Wang, J., & Zhang, B. (2022). An ultra-thin ultra-broadband microwave absorber for radar stealth. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5(3), 1778–1785. <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00429-y>
- Sharma, A., Gupta, M., & Sharma, N. (2023). Glacier facies characterisation in transboundary West Sikkim Himalaya from TerraSAR-X; GLCM based classification approach. *Journal of Spatial Science*. <https://doi.org/10.1080/14498596.2022.2164085>
- Sharma, A., Gupta, M., Sharma, N., & Gupta, S. (2023). *Line-of-Sight Glacier Velocity Estimation of Transboundary Glaciers in the Eastern Himalayas Using High-Resolution TerraSAR-X Data*. 25. <https://doi.org/10.3390/iecg2022-13951>



- Stoica, D. S., Enache, M., & Monda, V. (2022). Experimental measurements of radar absorbing materials in semi anechoic chambers. *EPE 2022 - Proceedings of the 2022 12th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, 157–160. <https://doi.org/10.1109/EPE56121.2022.9959738>
- Taj, Z. U. D., Bilal, A., Awais, M., Salamat, S., Abbas, M., & Maqsood, A. (2023). Design exploration and optimization of aerodynamics and radar cross section for a fighter aircraft. *Aerospace Science and Technology*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108114>
- Yang, H., Wang, A., Feng, X., Dong, H., Zhuang, T., Sui, J., Zhao, S., & Sun, C. (2023). PPyNT/NR/NBR Composites with Excellent Microwave Absorbing Performance in X-Band. *Polymers*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/polym15081866>
- Zhang, Z., Jiang, J., Wu, J., & Zhu, X. (2023). Efficient and optimal penetration path planning for stealth unmanned aerial vehicle using minimal radar cross-section tactics and modified A-Star algorithm. *ISA Transactions*, 134, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.07.032>