

十字栅格与八边形贴片复合双层FSS吸波体研究

袁永哲¹, 徐成宇^{1,2}, 薄志伟¹, 王永华^{1*}

¹长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春

²长春理工大学重庆研究院, 重庆

收稿日期: 2026年5月16日; 录用日期: 2026年6月16日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

本文提出并设计一款融合十字形格栅与八角形金属贴片的复合单元双层频率选择表面(FSS)吸波结构。利用Comsol Multiphysics仿真软件, 深入探讨了单元结构尺寸、介质加载、层间距及入射角度对结构吸波性能的影响规律。仿真结果表明, 该双层对称结构在12.5 GHz至22 GHz频段内表现出优异的吸波特性, 在16.3 GHz和20.9 GHz处产生两个显著谐振点, 反射损耗峰值分别达-56.5 dB和-39.9 dB。-10 dB吸收带宽达7.7 GHz, 且在0°~30°入射角范围内具有良好的角度稳定性。最后, 通过印制电路板工艺制备了实物样品, 并利用弓形法进行了实验验证。实测曲线与仿真结果吻合良好, 证明了该结构在宽带隐身及电磁兼容领域的应用价值。

关键词

吸波超材料, 频率选择表面, 复合单元

Research on Double-Layer Frequency Selective Surface Absorber Based on Cross-Grid and Octagonal Patch Composite Unit

Yongzhe Yuan¹, Chengyu Xu^{1,2}, Zhiwei Bo¹, Yonghua Wang^{1*}

¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

²Chongqing Research Institute, Changchun University of Science and Technology, Chongqing

*通讯作者。

文章引用: 袁永哲, 徐成宇, 薄志伟, 王永华. 十字栅格与八边形贴片复合双层 FSS 吸波体研究[J]. 材料科学, 2026, 16(6): 107-115. DOI: 10.12677/ms.2026.166143

Abstract

This paper presents a novel double-layer Frequency Selective Surface (FSS) absorber based on a composite unit of a cross-shaped grid and an octagonal patch. Using Comsol Multiphysics simulation software, the effects of unit structure size, dielectric loading, layer spacing, and incident angle on the absorbing performance are investigated. The results show that the double-layer symmetrical structure exhibits two resonance points at 16.3 GHz and 20.9 GHz, with reflection loss peaks reaching -56.5 dB and -39.9 dB, respectively. The -10 dB absorption bandwidth reaches 7.7 GHz (13.5~21.2 GHz), and the structure maintains good angular stability within a $0^\circ\sim 30^\circ$ incident angle range. Finally, the physical sample was fabricated by PCB technology and verified by the arch method. The experimental results are in good agreement with the simulation, proving its potential in broadband stealth and electromagnetic compatibility.

Keywords

Wave-Absorbing Metamaterials, Frequency Selective Surface, Composite Unit

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电磁波在军事和民用领域的广泛应用，带来了日益严重的电磁辐射污染与电磁干扰问题[1]-[6]。电磁波吸收材料通过将电磁能转化为热能等其他形式能量，是解决电磁污染、实现隐身技术的根本途径[1] [5] [6]。其中，频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)作为一种典型的超材料表现形式，本质上是一种具有频率选择特性的空间滤波器，由周期性排列的金属贴片或孔径单元构成，能够在特定频段对电磁波呈现全反射或全传输特性[7]。当电磁波入射到其表面时，会诱发特定的电流分布，从而在空间阻抗匹配的基础上实现对电磁波的高效捕获与损耗。基于 FSS 的超材料吸波体通过将谐振单元与介质基板、金属底层结合，能够利用介质损耗与谐振损耗的协同作用，将入射电磁波的能量转化为热能。与体积庞大的传统吸波体相比，基于频率选择表面(FSS)的超材料吸波体具有厚度薄、重量轻及设计灵活等显著优势[8] [9]。

FSS 作为一种空间滤波器，其频率特性取决于单元形状、尺寸及介质参数等诸多因素。Munk [7]和 Mittra 等[8]在其经典著作中对 FSS 的基本理论和分析方法进行了系统阐述，为后续研究奠定了坚实基础。Wu 等[9] [10]利用等效电路法结合谱域法，对多频段 FSS 进行了深入研究，推动了 FSS 在卫星通信天线等领域的应用。然而，早期的单层 FSS 吸波体往往受限于其窄带谐振特性，吸收带宽难以覆盖复杂的雷达工作波段(如 Ku、K 波段)。传统的单层或单一几何形状单元的 FSS 面临吸收带宽窄、谐振点单一等局限。

为拓展工作带宽，研究者们提出了多种改进方案。多层级联结构是一种常用方法，通过增加 FSS 层数使不同谐振频率的单元相互耦合，从而形成连续的吸收带。李等[11]设计了多层十字缝隙耦合贴片型 FSS, 实现了宽带通特性并保持良好的角度稳定性。朱等[12]基于六边形环状单元构建了三层双频段 FSS, 其传输曲线在 C、X 波段实现了良好的带宽性能。此外，复合谐振单元结构也被广泛采用。李等[13]采用多尺寸十字单元复合结构实现双频谐振特性；韩等[14]提出了一种新型扇形环状 FSS, 实现了 Ka 波段带

通与 W 波段带阻；高等[15]通过方环与金属栅格结构层叠，实现了具有多个传输极点的双频带通响应。Yang 等[16]和 Abdollahvand 等[17]分别设计了紧凑型双通带和三波段 FSS，进一步拓宽了工作频段。这些研究均表明，通过合理的单元复合和层间耦合设计，能够有效增加谐振点数量并拓展带宽。

与此同时，有源器件的引入也为 FSS 的性能调控提供了新的自由度。黄等[18]在 FSS 中集成 PIN 二极管，实现了对谐振频率与工作带宽的主动调控。贾等[19]和 Phon 等[20]分别提出了加载 PIN 二极管的多功能有源 FSS，能够在高通滤波、极化分离以及多种功能模式之间切换，展现出极大的灵活性。

虽然多层结构和复合单元能够增加谐振点以拓宽带宽，但往往会导致总厚度大幅增加，且层间耦合关系的复杂性也给工程设计与加工带来挑战[14] [21]。如何在保持结构紧凑(小厚度)的前提下，实现宽频吸收并具备良好的入射角度稳定性，仍是该领域面临的主要挑战[22] [23]。

本文针对上述问题，提出并研究了一种由十字栅格与八边形贴片复合单元构成的双层对称级联 FSS 吸波体。文章首先深入探讨了设计参数对该频率选择表面(FSS)性能的影响规律；随后，对双层结构的物理尺寸、频率响应特性、电场能量及角度稳定性进行了系统的仿真分析；最后，阐述了样品的加工工艺与测试手段，并对实测与仿真结果的一致性进行了比对。通过多频谐振点的耦合作用实现了宽频吸收，文中对其背后的物理机制及工程应用价值进行了深入讨论。

2. 理论基础与结构设计

为实现高性能吸波，结构需满足强对称性以降低极化敏感度。在解决电磁场边界问题时，需遵循麦克斯韦方程组的基本准则。仿真过程中，基于 Floquet 定理将结构视作无限大的周期性阵列仿真过程中，依据 Floquet 定理的相关理论，该研究将结构等效为无限大规模的周期性阵列，并以此为前提开展了电磁特性分析，仅需对单个周期单元设置周期性边界条件即可推导出整个到整个频率选择表面的响应特性。其场分布函数 $\bar{\varphi}(x, y, z)$ 满足[7] [8]:

$$\bar{\varphi}(x, y, z) = \bar{\varphi}(x + D_x, y, z)e^{j\beta_0 D_x}$$

该方法极大地缩减了计算量，确保了复杂周期结构的计算精度。

为提高频率选择表面的工作带宽，本文提出一种复合 FSS 超材料吸收体，单元结构及单元尺寸如图 1 所示。该结构采用多层复合形式，采用了双层对称的设计方案，其纵向布局自顶向下，由金属频率选择表面(FSS)层、介质支撑层以及背部金属反射层依次叠加而成。顶层由十字形金属栅格与嵌套在其内部的八边形贴片组成，十字形枝节长度 $L = 2.75 \text{ mm}$ ，十字型枝节为 $L = 2.75 \text{ mm}$ ，八边形边长 $A = 2.5 \text{ mm}$ ，边缘宽度为 $W = 0.3 \text{ mm}$ ， $B = 1.8 \text{ mm}$ 。选用损耗角正切值稳定的 F4b 作为中间支撑介质，其相对介电常数 $\epsilon_r = 2.2$ ，厚度为 $H = 2 \text{ mm}$ 。为精确模拟实际材料的能量损耗，仿真中明确设置介质损耗角正切值 $\tan \delta = 0.001$ 。结构单元的周期大小为 $P \times P$ ，参数 $P = 10 \text{ mm}$ 。双层结构工作频段范围为 12.5~22 GHz。

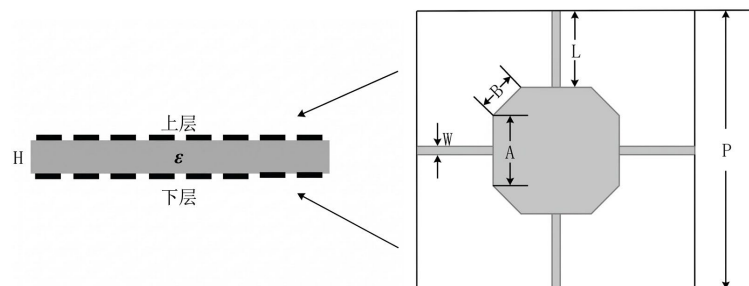


Figure 1. Schematic diagram of double-layer structure and unit structure diagram
图 1. 双层结构示意图和单元结构图

3. 结果分析与讨论

为了深入探究几何参数对双层 FSS 结构电磁响应的动态调控规律, 针对十字形枝节长度对结构电磁特性的动态调控作用, 进行了详尽的参数化分析。通过对不同枝节尺寸下双层频率选择表面的频率响应进行数值计算, 所得反射曲线对比情况如图 2 所示。分析结果表明, 当枝节长度 L 从 2.75 mm 逐步递增至 3.25 mm 时, 位于 16.3 GHz 频点附近的初级谐振位置表现出较强的稳定性, 未发生显著偏移, 而第二个谐振点则表现出明显的向高频方向移动的趋势。尽管 L 的增大使得结构在 -10 dB 处的吸收带宽从 7.7 GHz 拓宽至 10.1 GHz, 但在 -15 dB 以下的高强度吸收带宽却由 6.3 GHz 显著收缩至 4.3 GHz。这一规律表明, 枝节长度 L 主要通过调节结构的等效感抗来控制谐振频率及耦合强度, 在实际设计中需综合权衡吸收深度与带宽需求, 通过优化双层频率选择表面的单元尺寸、层间距、介质层厚度等相关参数, 本文最终选定 2.75 mm 作为最优枝节尺寸, 以确保在宽频带内维持优异的吸波性能。

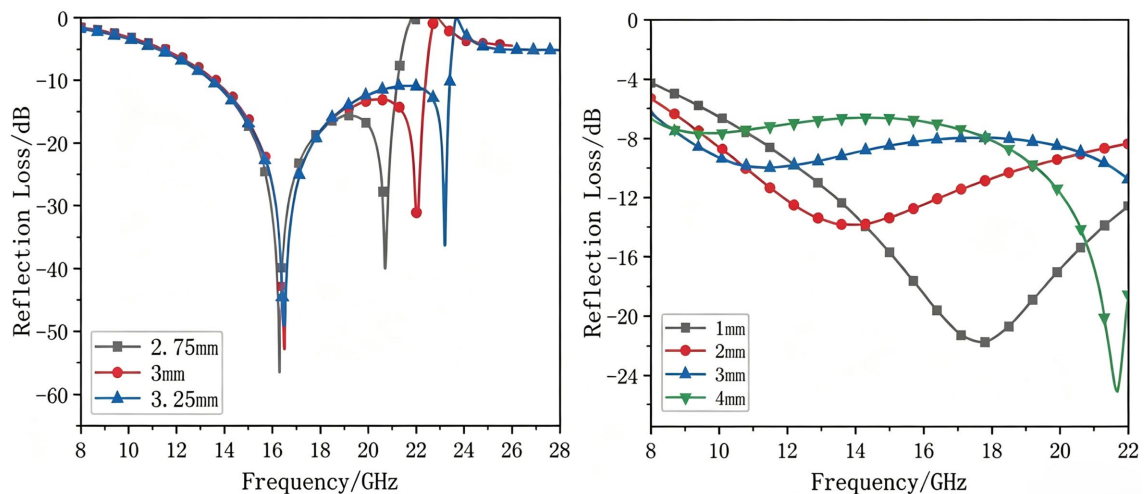


Figure 2. Reflection curves of double-layer structures with different branch lengths and thicknesses
图 2. 不同枝节长度与不同厚度的双层结构反射曲线

介质层厚度 H 是调节 FSS 吸波体空间阻抗匹配的关键参数。如图 2 所示, 对厚度 H 在 1 mm 至 4 mm 范围内进行扫描。分析表明, 随着 H 从 1 mm 增加到 3 mm, 谐振点表现出明显的低频漂移趋势, 且最小反射损耗值逐渐增大。当厚度 H 达到 4 mm 时, 结构在 8 GHz~17.5 GHz 范围内受厚度影响减小, 但在高频段会产生新的窄带谐振点。综合考量带宽与结构轻薄化的需求, 本文选定 $H = 2$ mm 作为最优厚度, 以平衡低频段的吸波深度与整体频带宽度。

八边形贴片的尺寸 A 主要通过改变单元间的等效电容来调节低频谐振点。仿真分析表明, 随着 A 从 2.1 mm 增加到 2.9 mm, 单元间的间隙减小, 等效电容增大, 使得第一谐振峰发生横移。与此同时, 单元周期 P 的变化会改变阵列的填充率及表面感抗。减小 P 虽然能增强单元间的电磁耦合并提升角度稳定性, 但也会导致吸波带向高频偏移。综合考虑加工精度与性能需求, 选定 $A = 2.5$ mm, $P = 10$ mm 以确保两个谐振点能够产生良好的覆盖, 从而获得 7.7 GHz 的宽吸收带宽。

为了深入探究材料损耗对吸波机制的贡献, 本文简要讨论了损耗角正切值的影响。损耗角正切 $\tan \delta$ 表征了介质将电磁能转化为热能的能力。仿真发现, 适度增加 $\tan \delta$ 可以进一步平滑反射损耗曲线并增加吸收深度; 但当 $\tan \delta$ 过大时, 过剩的损耗会破坏结构的谐振状态, 反而导致反射率回升。由于本文设计的复合结构主要依靠 FSS 图案的强电磁谐振产生能量耗散, 因此选用了低损耗的 F4b 介质 $\tan \delta = 0.001$,

以保证谐振的可控性和吸波频段的精准调节。

本文利用 Comsol Multiphysics 电磁全波仿真软件对所设计的双层 FSS 进行数值模拟，模型通过周期性边界条件模拟无限大阵列环境，并利用 Floquet 端口激励模拟电磁波沿 $-z$ 方向的垂直入射过程，结果如图 3 所示，从图中可以看出，该复合构型在 12.5~22 GHz 的频率区间内出现两个谐振峰，在 16.3 GHz 与 20.9 GHz 频点处，反射损耗分别下探至 -56.5 dB 和 -39.9 dB 的极小值。与传统的单层 FSS 相比，双层结构通过上下两层金属图案层之间的电磁耦合效应，在 12.5 GHz~22 GHz 范围内实现了高达 7.7 GHz 的有效吸收带宽 ($RL < -10$ dB)，充分证明了通过增加 FSS 层数并引入多重谐振机制，可以有效克服传统单层结构带宽受限的瓶颈，从而达成宽频带内的高效波能消耗散。此外，由传输特性曲线图可知，该双层 FSS 在 -4 dB 判定标准下的频带覆盖范围为 10.8 GHz~21.5 GHz，总带宽达 10.7 GHz。在该双层频率选择表面的有效工作带宽内，其传输系数曲线表现出较为平坦的顶部特征，且整体损耗始终维持在 -2 dB 以内的较低水平。

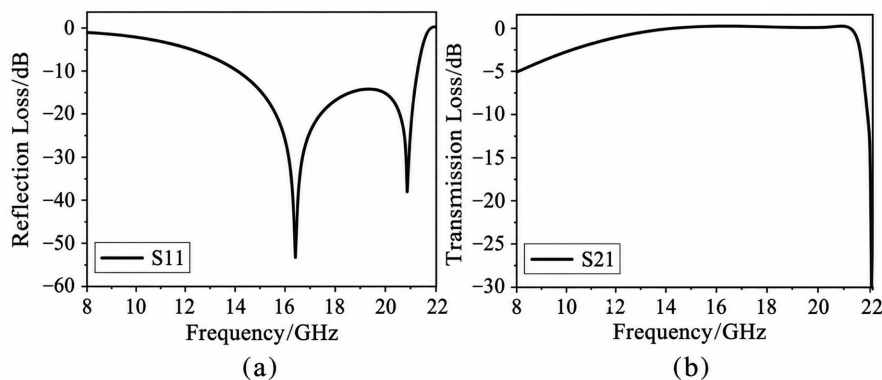


Figure 3. S-parameter curves: (a) reflection curve; (b) transmission curve

图 3. S 参数曲线: (a) 反射曲线; (b) 传输曲线

为从物理层面揭示双层复合结构的吸波机制，本文提取了谐振频率处的电场模分布图进行深入讨论。如图 4 所示，在 16.3 GHz 的低频谐振点处，强电场主要聚集在八边形贴片单元的边缘及其相邻单元间的缝隙中，表明此时结构的电磁响应由贴片产生的等效电容效应主导；而在 20.9 GHz 的高频谐振点处可以看到，虽然电场分布区域基本一致，但十字形枝节附近的场强明显增强，且整体能量值显著提升。通过分析可知，低频峰主要受贴片电容控制，而高频峰则由十字栅格产生的电感与贴片电容共同决定的 L 谐振回路激发产生。这种由不同几何拓扑单元协同作用构建的多重谐振机制，是该结构在 X 和 Ku 波段实现连续宽频、高效率吸收的根本机理。

针对复杂电磁环境的应用需求，本文重点评估了双层 FSS 结构在不同极化模式及斜入射角度下的性能稳健性。探讨了双层 FSS 结构在垂直入射 (0°) 至大角度斜入射 (45°) 范围内的反射损耗响应规律 (图 5)。结果显示，当电磁波以 0° 、 15° 和 30° 小角度入射时，反射损耗曲线表现出极高的一致性，两个谐振频率点的偏移量极小，其中第一个谐振点偏移了 0.5 GHz，第二个谐振点偏移量仅为 0.4 GHz，这表明该结构在 30° 入射角范围内具有优异的鲁棒性。然而，当入射角度进一步增加至 45° 时，由于自由空间与结构表面之间的阻抗匹配状态发生显著偏移，且波矢分量的变化引起了层间干涉相位的剧烈波动，导致反射曲线出现了明显的形变，吸收强度有所衰减。尽管如此，该结构在 45° 入射时依然能够在 X 波段和 Ku 波段维持较宽的吸收带宽，证明了十字形栅格与八边形贴片复合单元因其高度的中心对称性，能够有效抑制斜入射带来的谐振漂移。这种在宽角度范围内保持性能稳健的特性，为其在异形隐身表面及复杂电磁环

境下的工程化应用提供了坚实的实验数据支持。

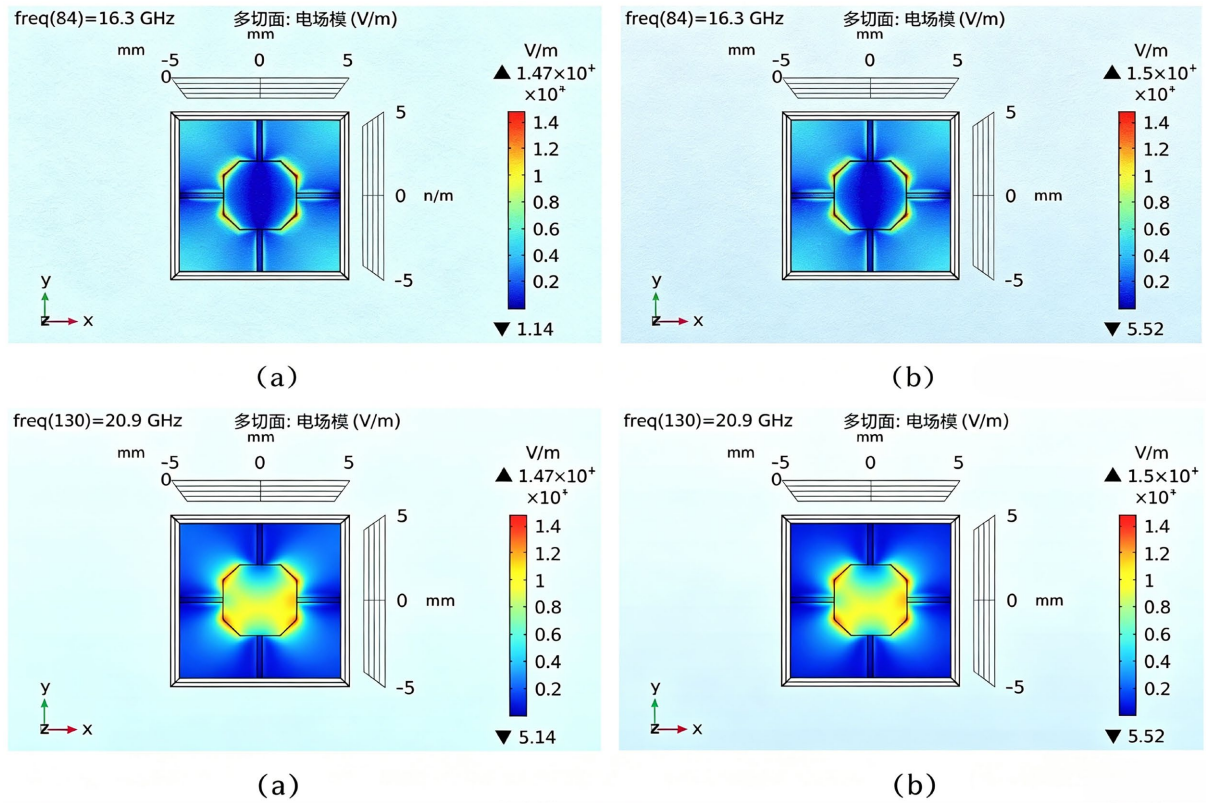


Figure 4. Electric field distribution of upper and lower layers at 16.3 GHz and 20.9 GHz: (a) upper layer; (b) lower layer
图 4. 16.3 GHz 与 20.9 GHz 处上下层的电场分布: (a) 上层; (b) 下层

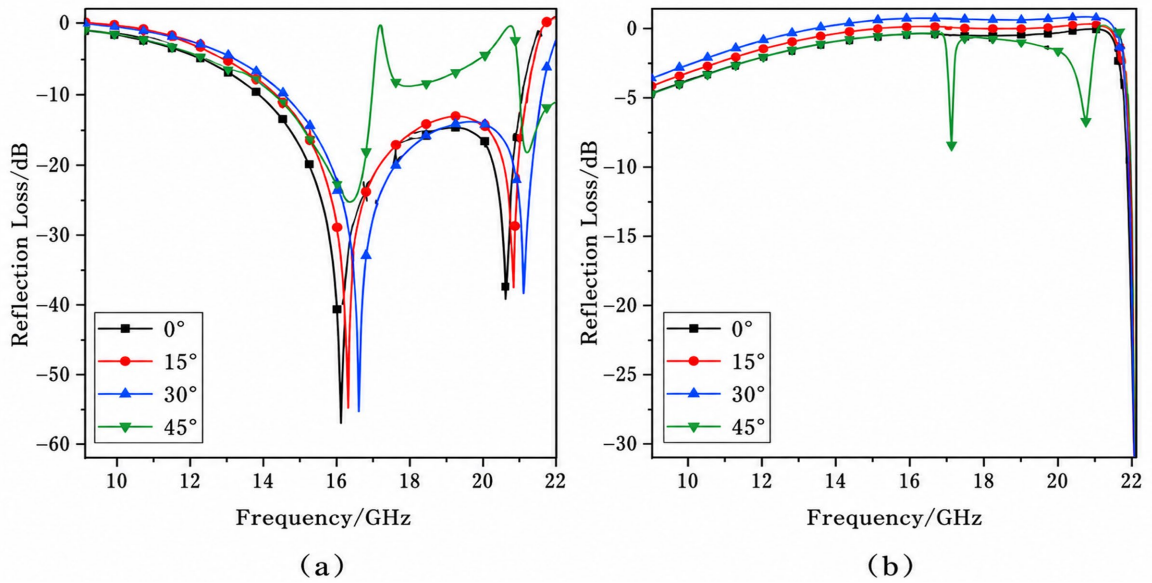


Figure 5. Frequency response characteristics of the structure under electromagnetic wave incidence at different angles: (a) Reflection curves of double-layer structure; (b) Transmission curves of double-layer structure
图 5. 电磁波以不同角度入射时结构的频率响应特性: (a) 双层结构的反射曲线; (b) 双层结构的传输曲线

为验证仿真设计的准确性, 本文采用印制电路板(PCB)工艺加工了尺寸为 $180\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ 的双层 FSS 实验样件, 并利用弓形法测试系统在吸波暗室环境下对其反射损耗性能进行了实测[24]-[27]。实验过程中, 通过一对标准增益喇叭天线作为收发单元, 并利用标准铝板进行反射基准校准[28] [29], 确保了测试数据的有效性。实验结果如图 6, 实测反射损耗曲线与仿真预测的演变趋势保持了良好的一致性, 在 9~15 GHz 频段范围内重合度较高。尽管受加工过程中金属图案的微小尺寸偏差、介质层厚度均匀性以及测试样件边缘绕射等实验误差的影响[30], 实测谐振峰位在高频段出现了约 0.2 GHz 的细微偏移, 且吸收强度在局部频段略有波动, 但整体实测带宽与仿真数据高度吻合。

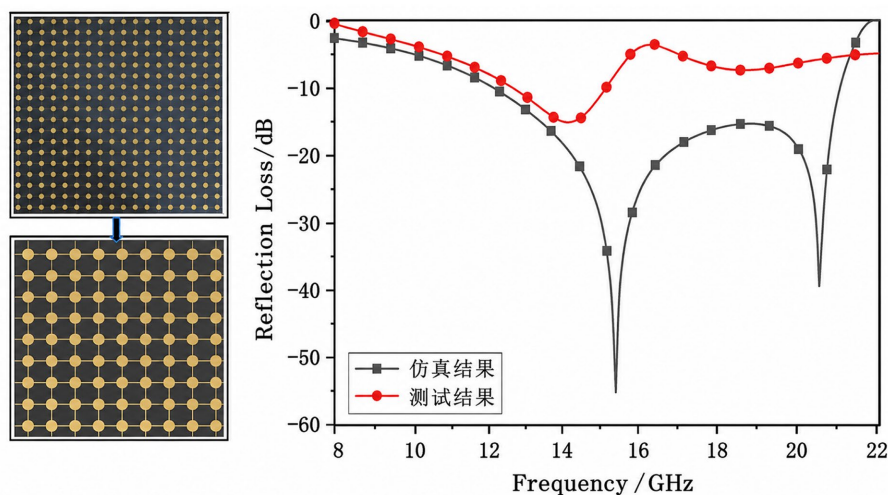


Figure 6. Physical diagram of frequency selective surface, front and back processed structures, comparison between simulation and test results

图 6. 频率选择表面实物图正(反)面加工结构与仿真结果与测试结果对比

4. 结论

本文提出并研究了一种由十字栅格与八边形贴片复合单元构成的双层对称级联频率选择表面(FSS)吸波体。通过电磁仿真与参数化分析, 系统揭示了单元尺寸、介质加载、层间距及入射角度对吸波性能的调控规律。基于上述规律, 优化设计了一种在 Ku/K 波段兼具宽频吸收与良好角度稳定性的双层 FSS 结构。仿真与实测结果表明: 该结构在 12.5~22 GHz 频段内呈现双谐振特性, 16.3 GHz 与 20.9 GHz 处反射损耗峰值分别达 -56.5 dB 和 -39.9 dB , -10 dB 吸收带宽达 7.7 GHz (相对带宽 44.4%), 且 $0^\circ\sim 30^\circ$ 入射角范围内性能稳定。

为进一步客观评估本文工作的综合性能, 将其与近年内报道的典型 FSS 吸波体[31]-[35]进行了多维度对比。如表 1 所示: 尽管采用多层电阻加载、石墨烯嵌入或特征模式分析优化的结构[33]-[35]可实现超过 100% 的相对带宽, 但其依赖集总电阻、特殊功能材料或复杂多层构型, 在制备工艺与成本方面存在一定局限性。与双层双频吸波器[32]相比, 本文结构虽相对带宽略窄, 但更聚焦于 Ku/K 波段特定应用场景, 设计灵活性与频率选择性更高。

综上, 本文所提出的十字栅格与八边形贴片复合双层 FSS 吸波体, 在完全依靠金属图案几何谐振实现宽频吸收的同时, 兼顾了结构简洁性、极化不敏感性和宽角响应稳定性, 在宽频隐身与电磁兼容领域展现出良好的工程应用潜力。后续工作可进一步探索该复合单元与有源器件或可调介质的集成, 以实现吸波频段的动态可重构。

Table 1. Multidimensional comparison between the proposed FSS absorber and typical reported counterparts in recent years
表 1. 本文与近年内报道的典型 FSS 吸波体进行多维度对比

文献来源	结构特点	-10 dB 吸收 带宽(GHz)	相对带宽(%)	厚度(电尺寸)	角度稳定性	极化不敏感性
本文工作	双层对称复合单元(十字栅格 + 八边形贴片)	13.5~21.2	44.4	0.115 λ_0	0°~30°	优(中心对称)
Dash <i>et al.</i> (2022) [31]	双层微型化 FSS 吸波体	4.8~10.2	72.0	—	0°~30°	对 TE/TM 稳定
Zhang <i>et al.</i> (2024) [32]	双层 FSS 双频吸波器	5.5~14.8 / 22.9~33.1	128	—	≤45°	—
Ghafourivayghan & Shabunin (2025) [33]	多层电阻型 FSS 电路模拟吸波器	5.2~20.09	117.75	0.068 λ_0	≤30°	不敏感
Zhang <i>et al.</i> (2025) [34]	八角环形 FSS 超材料吸波体(CMA 分析)	6.22~21.10	108.9	0.182 λ_0	—	不敏感
Wang <i>et al.</i> (2024) [35]	石墨烯嵌入磁性复合超材料	4.5~18	120	0.116 λ_0	不敏感	不敏感

基金项目

重庆市自然科学基金 CSTB2022NSCQ-MSX1643, 吉林省科技厅项目 YDZJ202301ZYTS490。

参考文献

- [1] 刘顺华, 刘军民, 董星龙, 等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [2] 刘伟. 片状铁硅铝/聚氨酯吸波涂层的电磁性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [3] 高少华. 片状铁硅铝/二氧化硅复合涂层的电磁波吸收性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [4] 杨平安. 面向磁控吸波涂层的 Fe 基复合材料制备及电磁性能研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [5] Middleton, D. (1977) Statistical-physical Models of Electromagnetic Interference. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **19**, 106-127. <https://doi.org/10.1109/temc.1977.303527>
- [6] 冯寒亮, 张平. 美国电磁脉冲威胁防御领域动态述评[J]. 军事文摘, 2017(15): 53-56.
- [7] Munk, B.A. (2000). Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471723770>
- [8] Mittra, R., Chan, C.H. and Cwik, T. (1988) Techniques for Analyzing Frequency Selective Surfaces—A Review. *Proceedings of the IEEE*, **76**, 1593-1615. <https://doi.org/10.1109/5.16352>
- [9] Wu, T.K. (1995) Frequency Selective Surfaces and Grid Arrays. Wiley.
- [10] Wu, T.K. and Lee, S.W. (1994) Multiband Frequency Selective Surface with Multiring Patch Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **42**, 1484-1490. <https://doi.org/10.1109/8.362790>
- [11] 李由, 刘梅林, 王文松, 等. 多层缝隙耦合贴片型频率选择表面研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(5): 656-661.
- [12] 朱佳成, 李旭东. 基于六边形环的双频频率选择表面设计与优化[J]. 甘肃科学学报, 2022, 34(4): 10-16+69.
- [13] 李小秋, 卢俊, 贾宏燕, 等. 具有双频段的十字形复合单元频率选择表面[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(2): 146-149.
- [14] 韩可, 葛俊祥, 盛夕琛. 一种新型扇形环状频率选择表面的设计[J]. 雷达科学与技术, 2018(3): 338-342.
- [15] 高春燕, 蒲红斌. 一种新型二阶双频带通频率选择表面的设计[J]. 科技创新与应用, 2020(32): 32-33, 36.
- [16] Yang, S., Chen, Q., Bai, J. and Fu, Y. (2017) Design of Ultra-Thin Closely Spaced Dual-band Bandpass Frequency Selective Surface. *Electronics Letters*, **53**, 1583-1585. <https://doi.org/10.1049/el.2017.2425>

- [17] Abdollahvand, M., Forooraghi, K., Encinar, J.A., Atlasbaf, Z. and Martinez-de-Rioja, E. (2020) Design and Demonstration of a Tri-Band Frequency Selective Surface for Space Applications in X, K, and Ka Bands. *Microwave and Optical Technology Letters*, **62**, 1742-1751. <https://doi.org/10.1002/mop.32225>
- [18] 黄小忠, 杨泽波, 杜作娟, 等. 一种双频段有源频率选择表面的设计[J]. 计算机仿真, 2014, 31(9): 195-199.
- [19] 贾宏燕, 李田泽, 杨淑连, 等. 多功能有源频率选择表面[J]. 雷达科学与技术, 2016(5): 537-540, 548.
- [20] Phon, R., Ghosh, S. and Lim, S. (2019) Novel Multifunctional Reconfigurable Active Frequency Selective Surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **67**, 1709-1718. <https://doi.org/10.1109/tap.2018.2889002>
- [21] 唐梓伟. 高选择性频率选择表面的设计和分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [22] 张磊, 李瑾希, 王建新, 等. 电磁信息泄漏及其防护技术研究[J]. 北京电子科技学院学报, 2018, 26(3): 32-38.
- [23] 黎昌金, 余洁. 电磁辐射污染在国内外研究综述[J]. 内江师范学院学报, 2019, 34(4): 59-64.
- [24] 李智. 微波反射率弓形法测试技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [25] 徐记伟, 时家明. 雷达吸波材料电磁参数的测量方法[J]. 舰船电子对抗, 2007, 30(6): 46-49.
- [26] 张娜, 王立春, 张国华. 自由空间法测试材料电磁参数的探讨[J]. 宇航计测技术, 2006, 26(3): 22-26.
- [27] 裴志斌, 顾超, 屈绍波, 等. 自由空间法测试超材料的电磁参数[J]. 空军工程大学学报, 2008, 9(5): 86-90.
- [28] 冯永宝, 丘泰. 传输反射法测量微波吸收材料电磁参数的研究[J]. 电波科学学报, 2006, 21(2): 293-297.
- [29] 程小兰, 胡军武. 电磁辐射的污染与防护[J]. 放射学实践, 2014, 29(6): 711-714.
- [30] 王诗涵. 论电磁辐射对环境的污染及防护措施[J]. 才智, 2017(28): 221.
- [31] Sivasamy, R., Abdulla Khan, L., Nahul, S., Nandhini, K. and Shahrukh, M. (2022) Design and Fabrication of a Miniaturized Microwave Absorber with Wide Band Absorption Characteristics. 2022 *IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS)*, Rourkela, 5-8 June 2022, 1-3. <https://doi.org/10.1109/WAMS54719.2022.9848123>
- [32] Zhang, W., Wang, X. and Yang, K. (2024) A Dual-Band Broadband Absorber Using Frequency Selective Surface for Satellite Antenna. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 28311. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79804-2>
- [33] Ghafourivayghan, M. and Shabunin, S. (2025) Design and Analysis of a Multi-Layer Circuit Absorber with Ultra-Wideband and Polarization Insensitivity. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 34132. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99904-x>
- [34] Gao, J., Huang, X., Xue, Q., Gao, L., Ma, Y. and Guo, L. (2025) Broadband Metamaterial Absorber with Enhanced Angular Stability Using Characteristic Mode Analysis. *Results in Engineering*, **27**, Article ID: 105986. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105986>
- [35] Ding, Z., Zhang, J., Fu, R., Xu, M., Si, Y., Jin, W., et al. (2024) An Ultra-Wideband Magnetic Composite Metamaterial Microwave Absorber Embedded with Multilayered Graphene FSS. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **603**, Article ID: 172268. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172268>