

引用格式: 吴微微, 袁乃昌, 王少植, 等. 新型多功能电磁超材料天线罩研究综述 [J]. 电子科技大学学报, 2026, 55(1): 40-48.

WU W W, YUAN N C, WANG S Z, et al. Review of novel multi-functional EM metamaterial radome research[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2026, 55(1): 40-48.



新型多功能电磁超材料天线罩研究综述

吴微微, 袁乃昌*, 王少植, 郑滋浩, 史桐桐, 许逸轩

(国防科技大学电子科学学院, 长沙 410073)

摘要: 现代无线通信和雷达系统前端的天线是整个系统中不可或缺的部件。常年暴露在各种天气或环境下的天线饱受雨雪风霜的侵蚀, 介质天线罩为其提供物理保护。近年来, 新型多功能电磁超材料天线罩成为新的研究热点, 可对被罩天线同时提供物理和电磁保护。在天线罩的透波频段内, 被罩天线发射的电磁波能无损耗地透过该天线罩, 实现自由通信; 在天线罩的吸波频段内, 该天线罩吸收入射电磁波, 降低被罩天线的雷达散射截面 (radar cross section, RCS), 从而使被罩天线难以被探测。进一步地, 利用电磁超材料的电控特性, 使该类天线罩实现智能调控电磁波的功能。该文主要介绍了两类电磁超材料天线罩。第 1 类为吸透一体低散射天线罩, 典型代表为吸透一体圆锥形低散射天线罩等。第 2 类为智能调控低散射天线罩, 包括吸透一体智能自适应低散射天线罩和高效率透射式波束可调控低散射天线罩等。

关键词: 天线罩; 电磁超材料; 智能调控; 吸透一体; 雷达散射截面; 低散射

中图分类号: TN82 文献标志码: A DOI: 10.12178/1001-0548.2025186

Review of novel multi-functional EM metamaterial radome research

WU Weiwei, YUAN Naichang*, WANG Shaozhi, ZHENG Zihao, SHI Tongtong, and XU Yixuan

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Antennas at the front end of modern wireless communication and radar systems are indispensable components of the entire system. Antennas exposed to various weather conditions or environments year-round are subject to erosion from rain, snow, wind, and frost, etc. Dielectric radomes provide physical protection for them. In recent years, new-type multifunctional electromagnetic metamaterial radomes, which can provide both physical and electromagnetic protection for the enclosed antennas simultaneously, have become a new research hotspot. Within the wave-transparent frequency band of the radome, the electromagnetic waves emitted by the enclosed antenna can pass through the radome without loss, enabling free communication; within the wave-absorbing frequency band of the radome, the radome absorbs incident electromagnetic waves and reduces the Radar Cross Section (RCS for short) of the enclosed antenna, thereby making the enclosed antenna difficult to detect. Furthermore, by utilizing the electrically controlled properties of electromagnetic metamaterials, such radomes can achieve the function of intelligently regulating electromagnetic waves. This paper mainly introduces two types of electromagnetic metamaterial radomes developed. The first type is integrated absorption-transmission low-scattering radomes, including dual-band low-scattering radomes based on a double-helix structure and integrated absorption-transmission conical low-scattering radomes, etc. The second type is intelligently adjustable low-scattering radomes, including band-tunable low-scattering radomes based on a serpentine surface, reconfigurable 3D binary low-scattering radomes, integrated absorption-transmission intelligent adaptive low-scattering radomes, and high-efficiency transmissive beam-adjustable low-scattering radomes, etc.

Key words: radome; EM metamaterial; intelligent regulation; transmission-absorbing; radar cross section; low scattering

低可探测的隐身天线罩从纯介质天线罩发展而来。人们发现在频选周期结构中加入吸波机制, 如

将集总电阻或电阻薄膜等损耗性元器件加载到金属周期单元上, 就能在一些频段实现吸波和在另一些

收稿日期: 2025-09-19

作者简介: 吴微微, 博士, 副教授, 主要从事智能电磁超材料隐身与对抗技术方面的研究。

*通信作者 E-mail: yuannaichang@hotmail.com

频段实现透波的效果。因此, 同时具有透波和吸波的吸透一体化电磁超材料天线罩成为研究热点。这类电磁超材料设计的核心思想是利用金属周期结构构成等效为电容和电感并联的谐振电路, 让该谐振频段的入射电磁波顺利通过超材料的周期结构^[1-4]; 利用金属周期结构加损耗性元器件构成等效为电阻、电容和电感串联的谐振电路, 感应入射电磁波, 形成谐振并将谐振的电磁能量转化成欧姆损耗。通过这种吸波机制, 入射电磁波不会沿原方向反射, 也不会反射到其他方向^[5-7], 最大程度减小了被罩天线的单站和双站雷达散射截面 (rader cross section, RCS)。接着, 人们开始尝试利用变容二极管、开关二极管和石墨烯等可控的元器件或材料在时域、频域、空域、极化域和能量域等对电磁超材料进行调控, 使电磁超材料逐渐具有感知、调控和对抗等功能, 并将这些电磁超材料应用在天线罩领域^[8-10]。

1 吸透一体低散射天线罩

毋庸置疑, 天线罩最基本的功能就是透波, 即天线罩对于被罩天线来说是电磁透明的。同理, 天线罩对于入射电磁波也是电磁透明的。此时, 若用电磁超材料研制天线罩, 需要研究电磁超材料的透射系数。另一方面, 入射电磁波穿过天线罩, 经被罩天线的金属结构反射后, 电磁能量向四面散射, RCS 很大, 散射的能量易被其他探测雷达捕捉接收。此刻, 对于探测雷达来说, 被罩天线像极了暗夜里的汽车尾灯, “耀眼又辉煌”。利用吸透一体的电磁超材料可将入射来波吸收, 转化成欧姆损耗, 减小散射能量, 从而实现低散射天线罩, 降低被其他雷达成功探测的概率。因此, 需要研究电磁超材料的反射系数。在吸波频段, 电磁超材料的透射系数和反射系数均很小。说明电磁波既没有透过电磁超材料天线罩, 也没有被该天线罩反射。在透波频段, 电磁超材料的透射系数接近 0 dB, 反射系数 ≤ -10 dB。表明电磁波顺利通过该天线罩。

吸透一体圆锥形低散射天线罩^[11]的结构单元及其等效电路如图 1 所示。

图中 $C0=0.02$ pF, $C1=0.17$ pF, $C2=0.12$ pF, $C3=0.32$ pF, $C4=0.17$ pF, $L01=1.11$ nH, $L02=1.21$ nH, $L1=0.62$ nH, $L2=2.07$ nH, $L3=0.64$ nH, $L4=0.79$ nH, $R1=680$ Ω , $R2=680$ Ω 。

在微波暗室中对其进行测试, 其透射/反射系数测试场景和测试结果如图 2 所示。

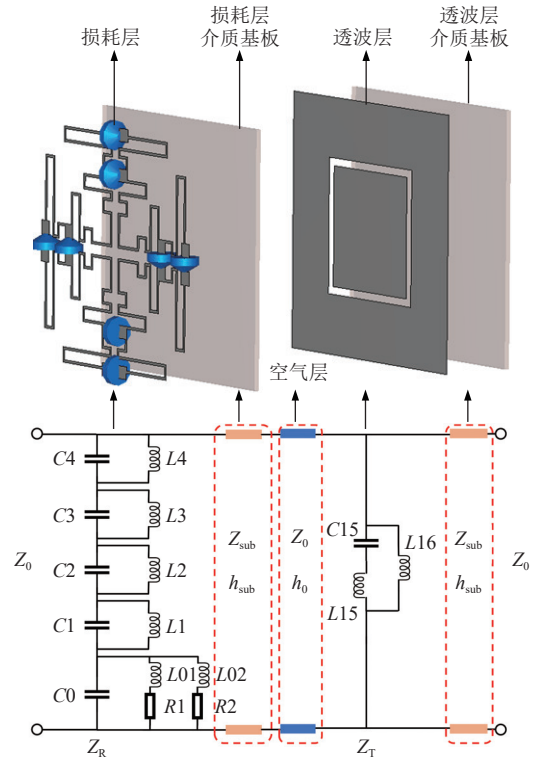
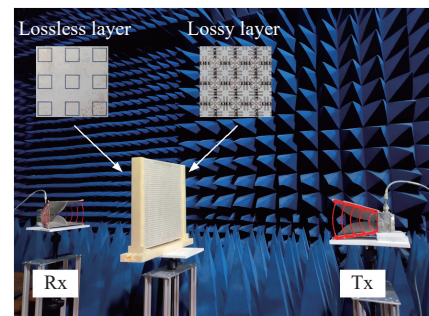
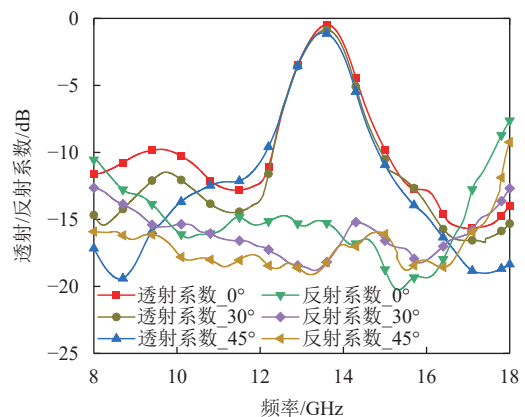


图 1 吸透一体低散射天线罩结构单元及其等效电路



a. 透射/反射系数的测试场景



b. TE波入射时的透射/反射系数测试结果

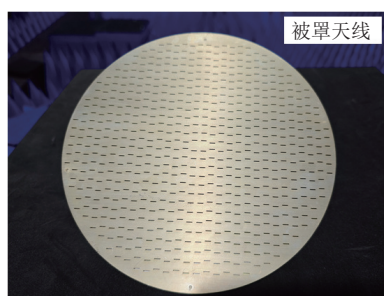
图 2 透射/反射系数的测试场景及其结果

实测结果表明, 该电磁超构表面的透波频带为 12.9~14.3 GHz; 透波频带两侧均有一个吸波频

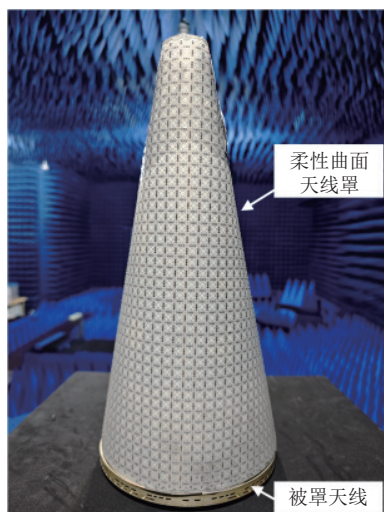
带, 分别为 8.0~12.3 GHz 和 15.1~18.0 GHz。吸波频带具有抑制电磁散射的作用。将该平面原理样品进行赋形, 制成柔性曲面天线罩, 并将其置于波导缝隙阵列天线辐射前端, 对该“蛇形”超构表面柔性曲面天线罩-波导缝隙阵列天线一体化结构的散射特性进行研究测试。

将不带罩的波导缝隙阵列天线置于暗室转台上, 测试其单站 RCS, 测试场景如图 3 所示。

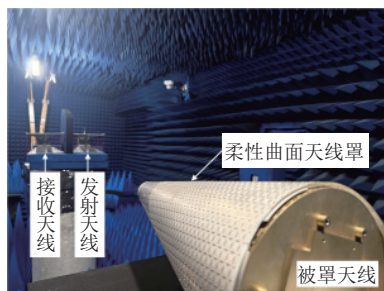
图 3a 为被罩的波导缝隙阵列天线, 图 3b 为柔性曲面天线罩-阵列天线一体化结构, 图 3c 为该一体化结构在暗室进行测试时的试验场景。



a. 波导缝隙阵列天线



b. 柔性曲面天线罩-阵列天线一体化结构



c. 暗室中一体化结构的测试场景

图 3 吸透一体圆锥形低散射天线罩测试场景

在微波暗室中对不带罩的波导缝隙阵列天线和

带罩的一体化结构进行了单站 RCS 性能测试。单站 RCS 性能可有效地表征该天线罩对被罩天线散射特性的改善效果。空域测试范围为头罩轴向两侧 $\pm 60^\circ$ 的范围, 不同频率处空域单站 RCS 的测试结果如图 4 所示。

由实测结果可以看到, “蛇形”超构表面柔性曲面天线罩通过赋形和吸波功能在 2~12 GHz 频带内使被罩波导缝隙阵列天线实现了低散射特性。单站 RCS 值在整个带内缩减达到 20 dB 以上。根据雷达方程, RCS 减缩能缩短雷达探测距离, 如若某目标的原始被探测距离为 100 km, 当其 RCS 降低 -20 dB 时, 其被探测距离缩短至约 31.6 km。

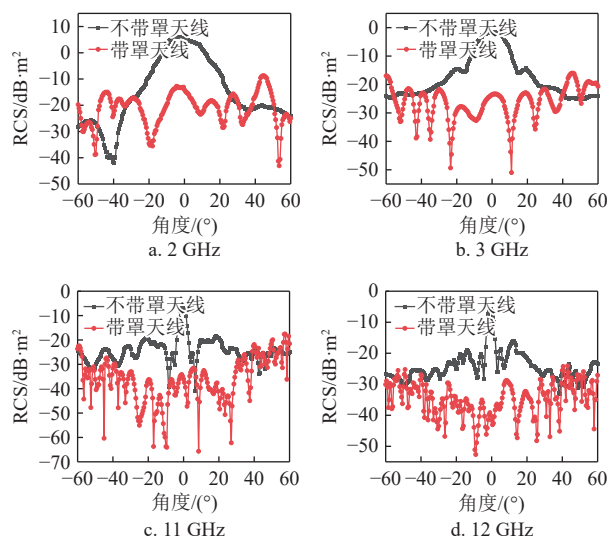


图 4 不同频率处的空域单站 RCS 测试结果

2 智能调控低散射天线罩

2.1 吸透一体智能自适应低散射天线罩

在低散射天线罩应用中, 当天线不工作时, 如果能关闭吸透一体超材料的透波窗口, 将其转变为吸波带, 即可提升带内低散射隐身能力, 如通过 PIN 二极管或石墨烯薄膜等元件控制透波窗口的开启与关闭。然而, 目前利用开关调控吸透功能的材料均为窄带透波材料。由于吸透一体材料的隐身效果会随着透波带宽的拓展而进一步降低, 所以研究宽带可开关调控的吸透一体材料更具实用意义。本节首先研究可开关调控的吸透一体材料的工作原理, 总结其设计要点。从高阶频率选择表面出发, 分析其通带的形成原理, 进而提出使频率选择表面在带通和全反射状态下切换的方法。在阻抗层中加载 PIN 二极管, 设计出具有谐振频率可切换的并联谐振结构。最后, 利用可开关频率选择表面和可切

换阻抗层设计一款透波窗口较宽的可开关调控吸透一体材料。

可开关调控吸透一体材料的单元结构如图 5a 所示, 阻抗层的结构如图 5b 所示, 其中电容由平行线结构实现, 该平行线横向延伸至单元结构边缘, 相邻单元的平行线相互连接, 充当 PIN-1 二极管的馈电网络。这样设计的优点在于将馈电网络融合进功能结构中, 避免了额外馈电结构对材料性能的影响, 缺点在于该方法无法拓展至双极化设计。电感由矩形金属线实现, 电阻由集总电阻实现。并联谐振由交指谐振器实现, PIN-1 二极管焊接在交指谐振器中间的电感带线上, 以切换谐振器谐振频率。

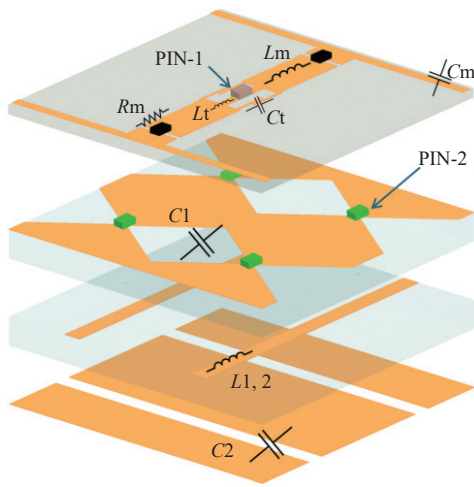
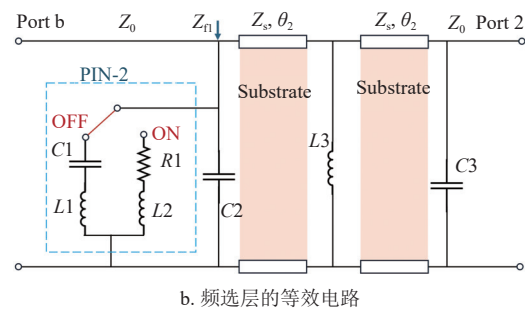
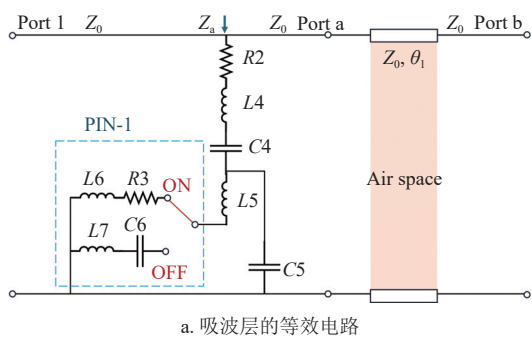


图 5 等效电路模型

吸波层的等效电路如图 5a 所示, 频选层的等

效电路如图 5b 所示, 该电磁结构与等效元件的对应关系如图 5c 所示。

加工的可开关调控吸透一体材料样品如图 6 所示。在相控阵贴片上方 9 mm 处安装加工好的天线罩, 组成天线-天线罩一体化结构, 如图 7 所示放置样品, 通过接线进行测试: 将被测试天线端口与矢网相连, 其他端口接匹配负载, 以减小其他单元耦合的影响。测试过程需要保证天线前方不被物体遮挡, 保证天线的辐射条件。对每个端口依次测试。根据矢网测试结果, 得到天线驻波比在 8.06~10.95 GHz 时小于 -10 dB, 相对带宽为 20%, 如图 8 所示。

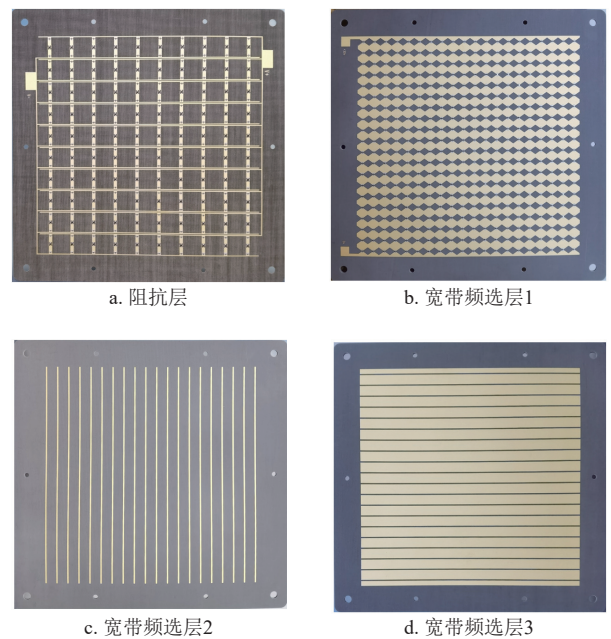


图 6 加工的实物样品

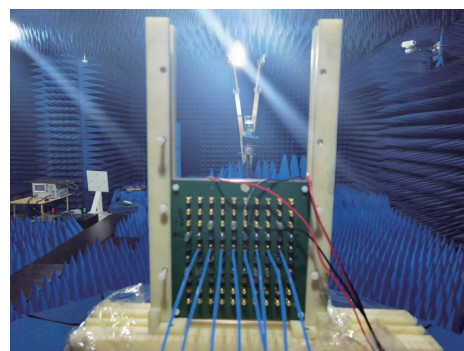


图 7 天线驻波比测试图

对单独相控阵天线样品与组装完成的一体化结构样品进行方向图测试, 结果如图 9 和图 10 所示。

经过对 E 面 H 面方向图测试, 基本确定一体化结构在透波频带内的辐射特性具有稳定性。进一

步地，对一体化结构样品的垂直入射单站 RCS 减缩性能开展了测试。测试环境如图 11 所示。

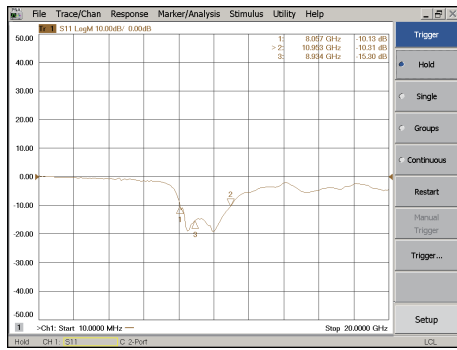


图 8 阵列天线样品驻波比测试结果

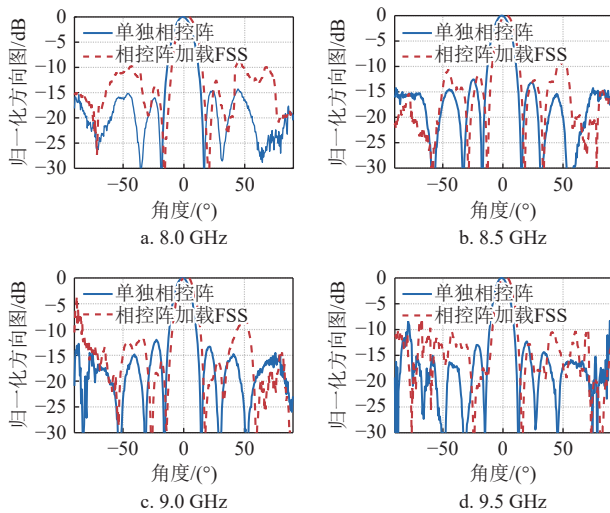


图 9 8 单元阵列的 E 面归一化方向图

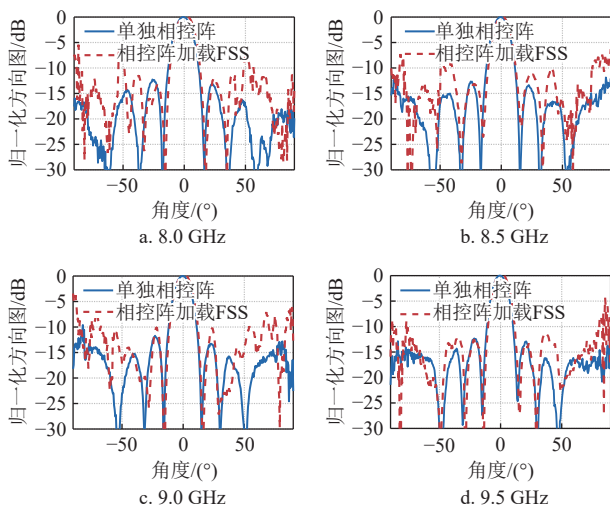


图 10 8 单元阵列的 H 面归一化方向图

发射 (Tx) 天线与接收 (Rx) 天线并排放置，朝向处于远场距离的样品，二者分别通过同轴线电缆连接至矢量网；Tx 天线与 Rx 天线均为线极化，且

极化方向与样品的极化方向保持一致。测试初期，首先用全金属球进行参数归零校准，如图 11a 所示；随后，将金属球替换为相控阵天线，获取一组 S_{21} 参数作为参考值；测试完成后再用金属球校准，再替换为一体化结构测试样品，测得另外一组 S_{21} 参数作为测量值，如图 11b 所示。通过将测量值与参考值进行归一化处理，即可推导得到单站 RCS 减缩量，测试场景如图 11c 所示。在测试过程中，采用时域选通技术抑制两天线间的互耦，并减弱周围物体电磁反射所产生的多径干扰。最终得到 RCS 减缩的测试结果如图 12 所示，结果显示在频段 3.23~10.58 GHz 样品的 RCS 减缩效果大于 10 dB，相对带宽达到 106.4%，验证了测试样品在吸波工作模式下具备宽带吸波隐身效果。

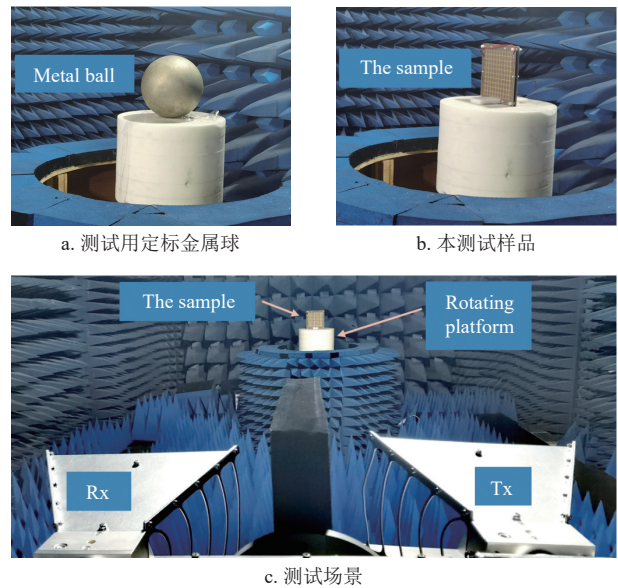


图 11 测试环境

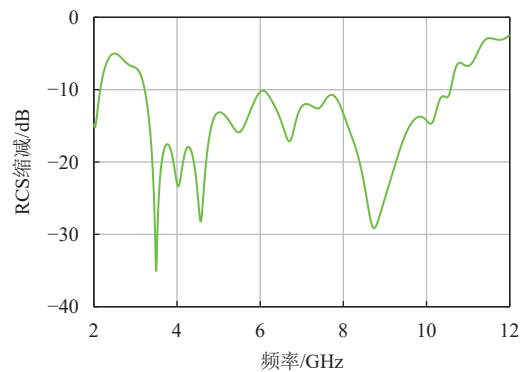


图 12 测试样品的 RCS 减缩效果

进一步地，开展了天线罩-天线一体化结构的射频脉冲检测宽度测试，如图 13 所示。实验所用仪器包括：信号源、任意波形生成器、发射与接收

天线、混频器、放大器、检波器及示波器。信号源产生脉宽为 20 ns 的脉冲信号, 馈入一体化结构作为发射天线, 经空间传播后由接收天线接收。该信号依次经放大器放大与检波器输出, 最终在示波器上显示测试波形与结果。

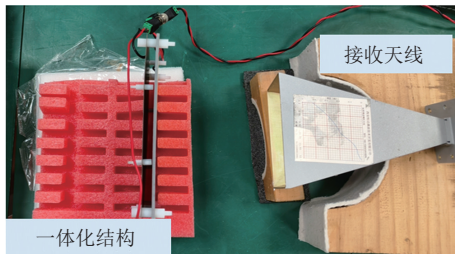


图 13 实验测试场景图

信号源生成频率为 8 GHz, 脉宽为 20 ns, 周期为 500 ns 的脉冲信号, 信号馈入发射天线。接收天线获取信号后, 经放大器与检波器处理, 最终在示波器上显示脉冲波形。测试结果如图 14 所示, 脉冲检测宽度为 19.248 02 ns, 说明加天线罩后波形一致性好, 天线罩对电磁波波形影响小。

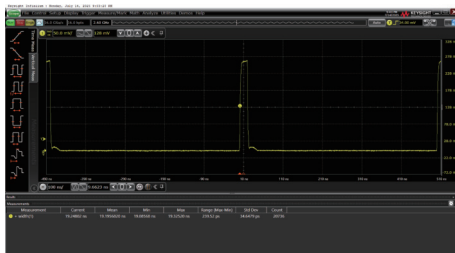


图 14 检测脉宽测试结果

进一步地, 开展了一体化结构系统响应时间的测试, 如图 15 所示。实验所使用的仪器包括: 信号源、任意波形发生器、发射天线、接收天线、混频器、放大器、检波器以及示波器。测试中, 在天线罩两侧分别布置发射天线与接收天线。任意波形发生器产生的矩形波控制信号经放大器后, 用于驱动天线罩: 低电平 (0 V) 时天线罩处于导通状态, 高电平 (+28 V) 时则处于非导通状态。发射天线的信号由频率源产生。接收天线所接收的信号经过混频、放大及检波处理后, 将其波形与驱动天线罩的矩形波控制信号在示波器中进行比较, 通过测量两者之间的延时, 即可得到系统的响应时间。

测试结果如下: 信号源产生频率为 8 GHz、周期为 1 ms 的脉冲信号, 并馈入发射天线。接收天线获取的信号经混频、放大及检波处理后, 将其波形与驱动天线罩的矩形波控制信号在示波器中进行对比。结果如图 15 所示, 图中绿色波形为任意波

形发生器所产生的驱动天线罩的矩形波控制信号, 黄色波形为接收天线接收并经混频、放大和检波处理后的信号, 测得系统的响应时间为 20.540 6 ns, 说明天线罩加载对整个天线系统的响应时间的影响小到可以忽略不计。

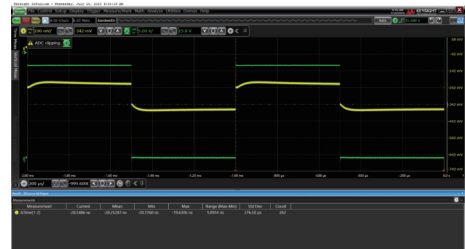


图 15 系统响应时间测试

2.2 高效率透射式波束可调控低散射天线罩^[2]

本节提出一款高效率透射式波束可调控低散射电磁超材料天线罩。该天线罩使被罩喇叭天线实现 21.2 dB 增益, 对应的最大口径效率为 33.3%, 并且实现 60°波束扫描。高低频段 -8 dB 的 RCS 减缩的相对带宽分别为 32.1% 和 10.0%。

图 16 示出该电磁超材料天线罩与喇叭天线的工作场景。

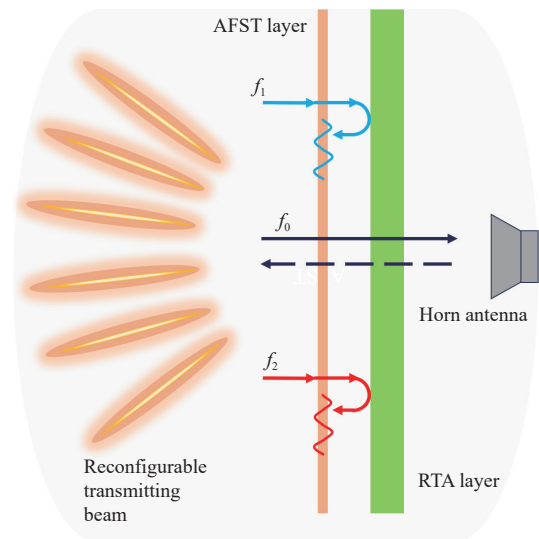


图 16 天线罩与喇叭天线一体化结构示意图

通过控制该电磁超材料天线罩上各个单元的相位, 使被罩喇叭天线辐射的波束在空域扫描。该天线罩的结构单元如图 17 所示。

控制二极管通断可以实现 4 种状态, 不同状态对应的二极管通断状态和移相量如表 1 所示。从表 1 可以看出, 状态 1、状态 2、状态 3 分别实现了与状态 0 的 90°、180°、270°的相位差, 实现了 2-bit 的相位控制。

E 面 60°时, 增益相差较大, 是由于单元的 E 面和 H 面方向图不一样, 以及馈线的影响。有无吸波层的一体化结构的扫描特性和增益特性差异很小。

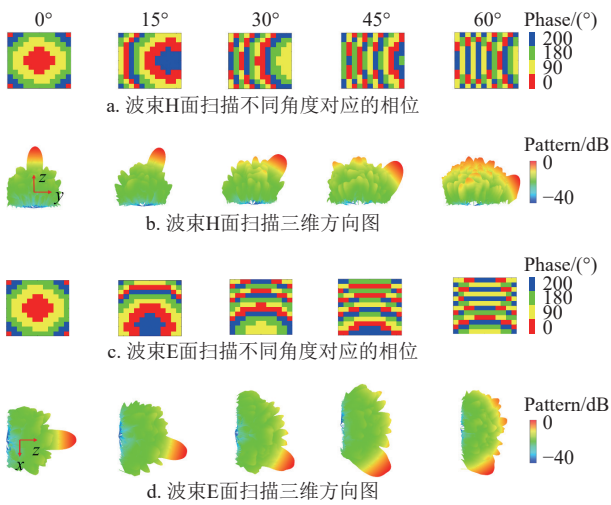


图 20 相位分布和测试的 5.8 GHz 波束扫描结果

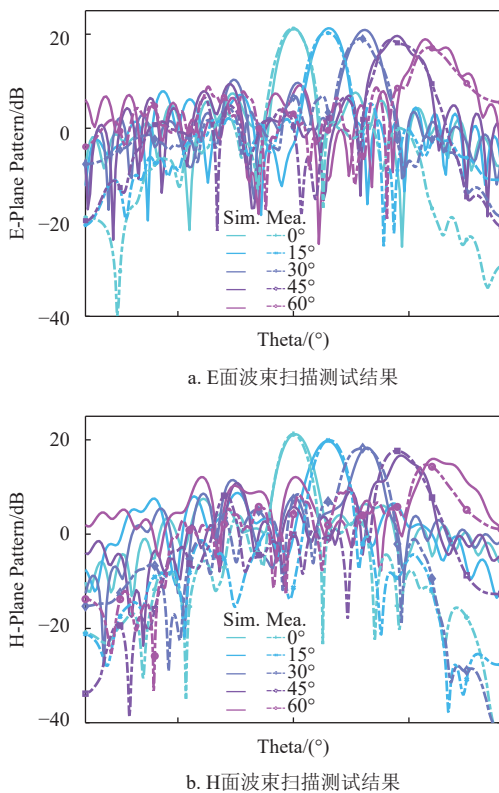
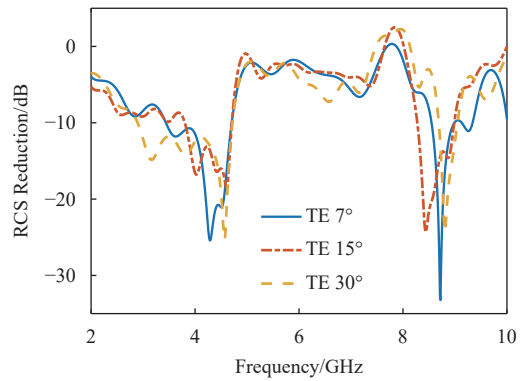
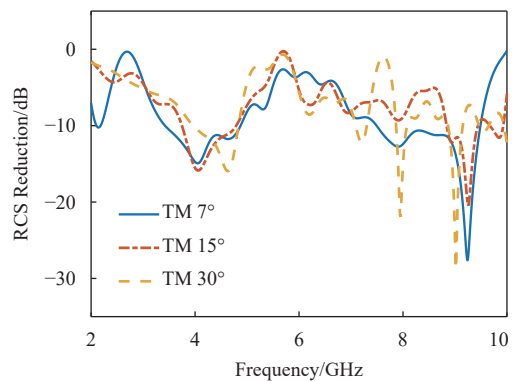


图 21 一体化结构波束扫描的仿真与测试结果

图 22 为一体化结构的单站 RCS 测试结果。在测试单站 RCS 时, 理论上收发天线应该置于同一位置。但由于喇叭天线具有一定的体积以及系统为了防止两个喇叭天线相撞, 两个喇叭天线之间的夹角最小为 14°。即发射喇叭天线辐射出来的电磁波与两个天线之间对称轴的夹角为 7°, 也即可以测试的最小角度为 7°。



a. TE 波入射时的单站 RCS 测试结果



b. TM 波入射时的单站 RCS 测试结果

图 22 一体化结构的单站 RCS 测试结果

在 7°情形下, TE 极化波入射时的-8 dB 的 RCS 频率缩减范围为 3.4~4.7 GHz 和 8.5~9.4 GHz, 同时, TM 极化波入射时的-8 dB 的 RCS 减缩频率范围为 3.2~5 GHz 和 7.0~9.5 GHz。与 0°方向的仿真结果相比, 主要是测试角度的误差。因此, 在 3.4~4.7 GHz 和 8.5~9.4 GHz 时, 对应的相对带宽分别为 32.1% 和 10.0%, 可以实现-8 dB 的 RCS 减缩。为了研究不同角度 RCS 减缩性能, 分别测试了 TE 极化波和 TM 极化波在 15°和 30°斜入射的 RCS 减缩结果。在 30°入射角的情况下, 样品依然保持良好的 RCS 减缩特性。

3 结束语

本文主要以时间为脉络, 介绍了近年来利用电磁超材料研究与设计的新型吸透一体低散射隐身天线罩。主要涉及两类天线罩: 第 1 类为吸透一体低散射天线罩。这类天线罩一旦设计完成, 电磁性能不可调控。所介绍的两种这类典型天线罩为基于双螺旋结构的双通带低散射天线罩和吸透一体圆锥形低散射天线罩。前者为平面结构, 后者为圆锥结构。第 2 类为智能调控低散射天线罩。主要介绍了 5 种具体的该类天线罩, 包括吸透一体智能自适

应低散射天线罩和高效率透射式波束可调控低散射天线罩。文中展示了这些天线罩的周期结构单元、等效电路和测试结果等。这些新型的电磁超材料天线罩极大地丰富了天线罩的功能,能为被罩天线提供良好的物理与电磁保护,能智能调控电磁波,实现隐身、干扰与抗干扰等功能。在雷达与通信领域有广泛的应用价值。

表 2 梳理总结了本文中各种天线罩的特性及其潜在的应用场景。随着技术的飞速发展,在未来,多功能电磁超材料天线罩将面临更多的应用需求和核心挑战。在多频段兼容方面,因不同频段电磁响

应相互冲突,曲面构型对电磁性能影响较大。可朝着多尺度融合与曲面共形设计方向突破;在动态宽频调控方面,传统超材料结构固定,带宽有限,缺乏快速有效的动态调控手段,可开发智能可重构超表面与软件定义功能技术;在集成化设计方面,电磁、热、力等多物理场需求耦合,难以协同优化,可采用多物理场逆设计框架与结构-功能一体化理念;在新原理与新架构方面,依赖谐振的单元尺寸难以小型化,且高温等极端环境适应性不足。可探索无谐振单元设计范式与先进材料体系,如高熵合金等。

表 2 各种电磁超材料天线罩的特性及适用场景

名称	频段	RCS减缩功能/dB	调控方式	适用场景
基于双螺旋结构的双通带低散射天线罩	C/X频段	-10~-25	不可调	主被动探测隐身雷达
吸透一体圆锥形低散射天线罩	X/Ku频段	-10~-30	不可调	主被动探测隐身雷达
基于蛇形表面的通带可调谐低散射天线罩	X/Ku频段	>-10	可调(变容二极管)	频率捷变的电子对抗射频系统
可重构型3D二元低散射天线罩	C频段	>-10	可调(PIN二极管)	频率捷变的电子对抗射频系统
吸透一体智能自适应低散射天线罩	S/C/X频段	>-10	可调(PIN二极管)	频率捷变的电子对抗射频系统
高效率透射式波束可调控低散射天线罩	S/C/X频段	>-8	可调(PIN二极管)	频率捷变的电子对抗射频系统

参考文献

- [1] AMEEN M, MALLICK P, CHOWDHURY R, et al. Wideband low-RCS step-type cavity-backed stacked dielectric resonator antenna for unmanned aerial vehicle communications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023, 22(9): 2170-2174.
- [2] ZHANG L M, DING X, SHAO W. A multifunctional active frequency selective surface with scattering diffusivity and transmission passband tunability[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(1): 229-233.
- [3] LI M Y, SHEN Z X. Integrated diffusive antenna array of low backscattering[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter*, 2024, 23(2): 573-577.
- [4] XU L, LIU Y F, ZHANG W M. Wideband RCS reduction of dual-band fabry-perot cavity antenna using pancharatnam-berry phase coding metasurface and amc surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagations*, 2025, 73(6): 4158-4163.
- [5] GUO H C, DING X, SHAO W. Integrated conformal design of nonelement frequency-selective radome based on topology optimization[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagations*, 2025, 73(9): 1.
- [6] GOUDA A, GHOSH S. Double-curved conformal bandpass frequency selective surface for radome applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagations*, 2025, 73(7): 4488-4497.
- [7] SHENG X J, WANG H W, LIU N, et al. A conformal miniaturized bandpass frequency-selective surface with stable frequency response for radome applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagations*, 2024, 72(3): 2423-2433.
- [8] METTES S, HOWARD C T, ROPER J, et al. 3-D-printed doubly-curved multilayer tri-band frequency selective surface[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, 2025, 73(9): 5864-5875.
- [9] WANG H W, LIU N, SHENG X J. A miniaturized conical bandpass frequency selective surface with frequency response stability[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2025, 24(7): 1734-1738.
- [10] GOVINDARAJAN G, MOHAMMED G N A, PREMANAND A, et al. Design of miniaturized conformal rasorber using machine learning for precision intrusion mitigation[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2025, 24(9): 2849-2853.
- [11] SHI T T, XU Y X, YAN X, et al. A highly selective dual polarization frequency selective rasorber[C]//International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Beijing: IEEE, 2024: 1548-1550.
- [12] 吴微微, 王少植, 颜雨晨, 等. 新型频率选择表面加载双极化超宽带紧耦合阵列天线[J]. *国防科技大学学报*, 2023, 45(4): 37-44.
WU W W, WANG S Z, YAN Y C, et al. A novel dual-polarized and ultra-wideband compact antenna array loaded with frequency selective surface[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2023, 45(4): 37-44.

责任编辑 刘飞阳