

超宽带低 RCS 人工磁导体棋盘阵列设计

欧阳鑫¹ 陈 星¹

OU-YANG xin CHEN Xing

摘 要

随着现代雷达的高速发展,其探测频段愈来愈宽,为了实现超宽带 RCS (radar cross section) 缩减,文章设计了一种基于双层介质的人工磁导体 (artificial magnetic conductor, AMC) 超表面单元,在平面波垂直照射下,所设计的 AMC 单元在 3.99~12.5 GHz (相对带宽 103%) 与金属表面的反射相位差满足 $180^\circ \pm 37^\circ$ 。与金属板组成棋盘型阵列后,在 4.2~12 GHz (相对带宽 96.3%) 频带内与等面积金属板对比达到了 10 dB 的法向单站 RCS 缩减量,最终加工样品在 4.1~11.7 GHz (相对带宽 96.2%) 内 RCS 缩减量大于 8 dB,实现了超宽带的 RCS 缩减效果。

关键词

电磁超表面;人工磁导体;雷达散射截面;超宽带;轻量化

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.04.021

0 引言

现代战争形态正伴随科技的迅猛发展加速演变,雷达等先进军事探测技术更新迭代极为迅速。在此背景下,军事设施与装备面临的探测威胁显著增大,成为增强军事防御体系、保障作战优势的关键因素。对保障军事行动的隐蔽性与安全性而言,这不仅是应对新型探测技术挑战的必要手段,更是适应未来战争趋势的战略选择^[1]。雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 是衡量物体隐身能力的参数,物体实现电磁隐身即降低其 RCS^[2]。而人工电磁超表面具备天然材料没有的电磁特性,已被广泛应用于电磁隐身领域中^[3],其中,人工磁导体表面是主要的电磁超表面之一,具有设计灵活、结构轻薄、易于拓展、易于加工等优点,因此受到学者广泛关注^[4-6]。

本文从雷达散射截面和人工磁导体相位抵消原理出发,设计了一款超宽带双层介质 AMC (artificial magnetic conductor) 单元,利用分形理论^[7-8]设计的 AMC 表面结构配合相对介电常数较低的介质材料,使 AMC 单元的反射相位变化平缓,拓宽了 AMC 与金属面反射相位差满足 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的带宽。组成棋盘型阵列后,在 4.2~12 GHz 范围内法向单站 RCS 缩减量达到 10 dB (对比等面积金属板),实物样品经测试在 4.1~11.7 GHz 内法向单站 RCS 缩减量大于 8 dB。

1 雷达散射截面和人工磁导体相位抵消基本理论

1.1 雷达散射截面基本理论

雷达散射截面是用于定量描述目标对某一指定入射方向的电磁波的有效散射面积的物理量^[9],用 σ 表示为:

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|H_s|^2}{|H_i|^2} \quad (1)$$

式中: E_s 和 E_i 分别是散射电场强度和入射电场强度; H_s 和 H_i 分别是散射磁场强度和入射磁场强度; R 是雷达与目标之间的距离, R^2 决定了 RCS 的量纲为面积 m^2 ,且说明 RCS 是一个标量。工程中常用对数形式表示 RCS,单位为 dBsm:

$$\sigma_{\text{dBsm}} = 10 \lg \sigma \quad (2)$$

当发射天线与接收天线位置相同时测试得到的 RCS 称为单站 RCS,当发射天线与接收天线不在同一位置时测试得到的 RCS 称为双站 RCS。

1.2 人工磁导体表面相位抵消基本理论

人工磁导体表面是一种周期性的人工电磁超表面,被电磁波照射时,在工作频段内反射系数为 1,且反射相位为 0° ,可以等效为理想磁导体 (perfect magnetic conductor, PMC)^[10],而理想电导体 (perfect electric conductor, PEC) 的反射系数也是 1,反射相位为 180° 。所以,利用 AMC 与 PEC 反射相位差 180° 的性质,将两者组成棋盘型交错排列,就可以实现反射波的相位相消,实现 RCS 的缩减。

AMC 与 PEC 组成的棋盘型阵列示意图如图 1 所示,其

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610065

[基金项目] 中国电科 22 所稳定经费支持 (A132304345)

被平面电磁波法向入射时，产生的总散射场表达式为：

$$E_r = 2A_1 e^{j\varphi_1} + 2A_2 e^{j\varphi_2} \quad (3)$$

式中： A_1 和 A_2 分别是 AMC、PEC 的反射场的幅值； φ_1 和 φ_2 分别是 AMC、PEC 反射波的相位。

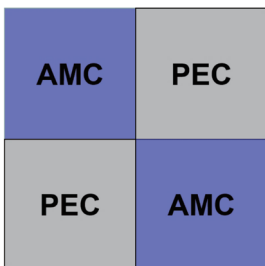


图1 棋盘型表面示意图

相较于与棋盘型表面面积相等的金属板，RCS 缩减量（RCS reduction, RCSR）可以表示为：

$$RCSR = 10 \lg \left| \frac{A_1 e^{j\varphi_1} + A_2 e^{j\varphi_2}}{2} \right|^2 \quad (4)$$

一般来说，AMC 和 PEC 均为全反射，即 A_1 、 A_2 都为 1，若要使 RCSR 的值大于 10 dB，则 AMC 和 PEC 的反射相位须满足以下条件：

$$143^\circ \leq |\varphi_1 - \varphi_2| \leq 271^\circ \quad (5)$$

当 AMC、PEC 表面的反射相位满足式（5）时，反射场发生干涉相消，法向反射场能量减少，转而增加了其他方向副瓣的能量，从而实现了降低单站 RCS 的目标。

2 人工磁导体单元设计及仿真

本章设计了一款基于分形理论的双层介质 AMC 超表面单元^[11]，结构如图 2 所示。AMC 单元由多层结构组成，从上到下分别是分形结构、上层介质基板、下层介质基板、金属面。上层介质基板厚度为 1.5 mm，相对介电常数 2.55，下层介质基板厚度为 5 mm，相对介电常数 1.05。AMC 的表面结构如图 2（b）所示，介质基板的宽度 L_6 为 7.5 mm，分形结构中 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 的参数分别为 4.6、1.8、0.8、7、1.4 mm。

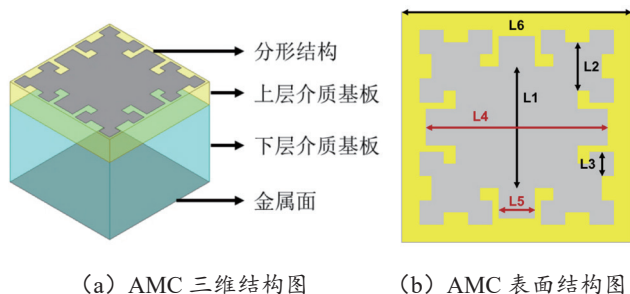


图2 AMC 单元结构图

本文所使用的仿真软件为 HFSS（high-frequency structure simulator），利用无限大周期边界条件仿真 AMC 和 PEC 单元^[12]，仿真示意图如图 3 所示，需要注意的是，AMC 和 PEC 单元的反射相位观察面都位于 AMC 单元的分形结构表面。

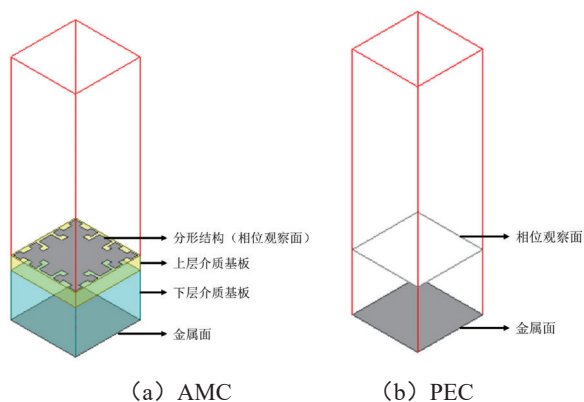


图3 AMC 和 PEC 仿真示意图

反射系数如图 4 所示，从图 4（a）中可以看到，AMC 的 0° 反射相位频点为 3.77 GHz，PEC 的 0° 反射相位频点为 11.6 GHz，由于 PEC 单元仿真时相位观察面在金属面上方 6.5 mm 处，所以 PEC 的反射相位会随频率变化。从图 4（b）中可以看到 PEC 的反射幅值为 0 dB，AMC 的反射幅值非常接近 0 dB，可看作全反射。

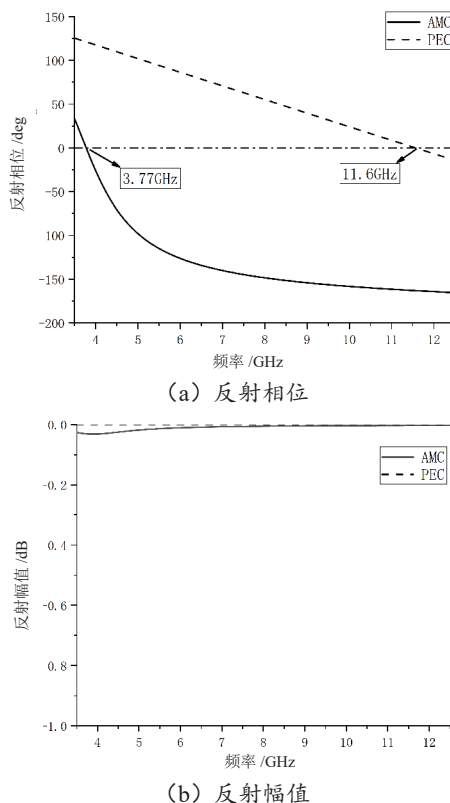


图4 AMC 和 PEC 的反射系数

图 5 中以 $180^\circ \pm 37^\circ$ 为标准画出了两条点划线, 两者的相位差满足该标准的带宽为 3.99~12.5 GHz。取 λ_0 最低工作频段对应的自由空间波长, AMC 周期的尺寸仅为 $0.1\lambda_0$, 剖面厚度 $0.087\lambda_0$, 满足小型化的设计需求。

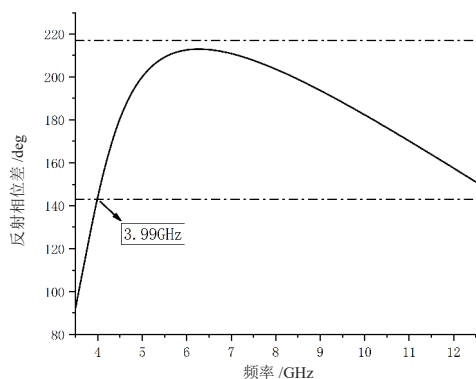


图 5 AMC 和 PEC 的反射相位差

3 人工磁导体棋盘阵列设计及仿真分析

将 AMC 单元与 PEC 单元分别组成 10×10 的大单元, 然后将两个大单元进行 2×2 棋盘型正交排列组成超宽带低 RCS 超表面如图 6 所示, 整体面积为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。仿真其法向单站 RCS, 结果如图 7 所示, 同时与相同条件下的金属板的单站 RCS 值对比。

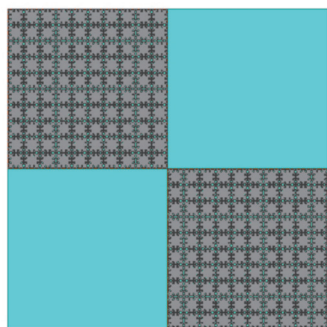


图 6 AMC 棋盘超表面结构图

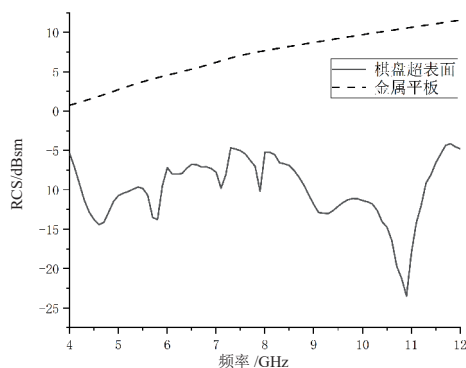


图 7 单站 RCS 仿真结果

为了更直观地观察 RCS 缩减效果, 将两者的 RCS 相减得到 RCS 缩减量, 如图 8 所示, 超表面阵列在 4~12 GHz 都具备 RCS 缩减能力, 在 4.2~12 GHz 内 RCS 缩减量大于

10 dB。说明本文设计的 AMC 棋盘型超表面阵列具备超宽带且优异的 RCS 缩减性能。

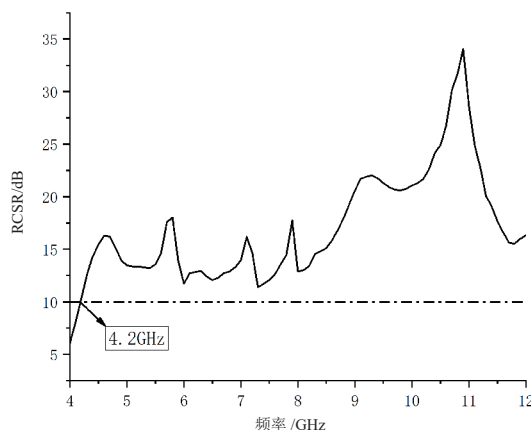


图 8 RCS 缩减量

低频段 RCS 缩减量不足 10 dB 的原因是: 在仿真 AMC、PEC 单元的反射相位时使用了无限大周期边界条件, 而在实际仿真 RCS 时所组成的棋盘阵列并非无限大表面, 所以在低频段, 电磁波的波长已经与 AMC 阵列的周期长度相当甚至前者大于后者, 此时 AMC 周期结构的反射相位不再是单元仿真时的结果, 所以 RCS 缩减量与理论值不符。

4 实物加工与测试

利用印刷电路板 (printed circuit board, PCB) 技术制作的棋盘型超表面实物如图 9 所示, 介质基板使用旺灵 F4BM255, 粘贴在白色的 PMI 泡沫上, 由于加工条件限制, 泡沫板中心有圆形开槽, 背面为粘贴在 PMI 泡沫上的铜箔。

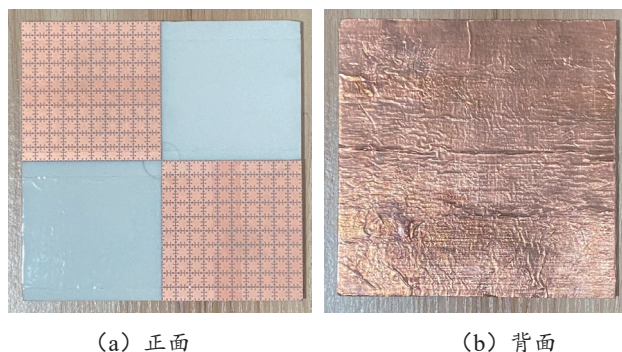


图 9 AMC 棋盘超表面样品

在微波暗室中测试加工样品, 测试系统如图 10 所示。将样品嵌入 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 的吸波材料中心位置, 发射天线和接收天线均使用喇叭天线, 置于样品的同一侧与样品的距离为 2 m, 且沿着样品的中心轴对称摆放, 天线口径面与超表面平行。此时满足远场测试条件, 发射天线的电磁波到达样品时为平面波, 且可以认为发射天线和接收天线对于样品来说位于同一位置, 满足法向单站 RCS 测

试条件。使用相同的方式测试与 AMC 等面积的 PEC 的准单站 RCS。

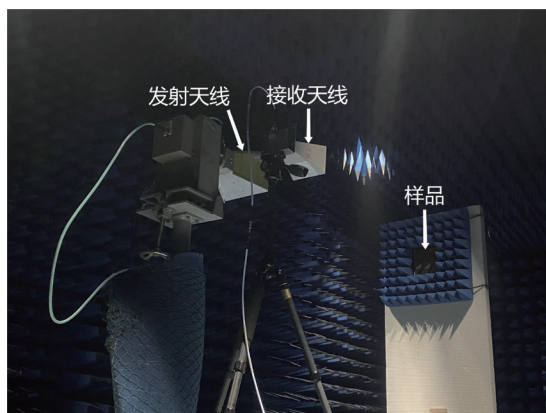


图 10 实验测试系统

样品的单站 RCS 缩减量测试结果如图 11 所示，与仿真结果走势比较吻合，在 4.1~11.7 GHz（相对带宽 96.2%）范围内 RCS 缩减量大于 8 dB，在 10.8 GHz 达到最大值 28.3 dB，说明样品具备超宽带低 RCS 性能。测试结果在 6~10.5 GHz 和 11~12 GHz 明显略低于仿真结果，最大差值为 5.6 dB（12 GHz），主要原因为加工样品的尺寸以及相对介电常数存在一定误差；系统搭建过程中的位置以及方位角存在人工误差；放置样品的支架尺寸有限，存在边缘衍射误差。

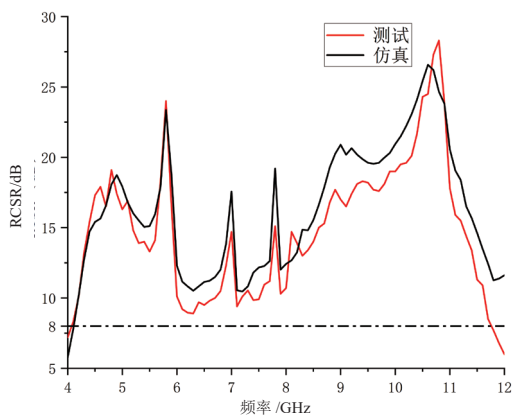


图 11 单站 RCS 缩减量仿真、测试结果

5 结论

本文基于人工磁导体缩减 RCS 的原理，设计了一款双层介质人工磁导体超表面单元，其反射相位在 3.99~12.5 GHz（相对带宽 103%）频段内能满足与 PEC 相位对消的条件，具有较小的电尺寸（周期尺寸 $0.1\lambda_0$ ，剖面厚度尺寸 $0.087\lambda_0$ ）。然后设计了一款棋盘型超表面阵列，在 4.2~12 GHz（相对带宽 96.3%）对比等面积金属板的 RCS 缩减量大于 10 dB。对所设计的棋盘型阵列进行加工测试，结果表明电磁波法向入射时在 4.1~11.7 GHz（相对带宽 96.2%）范围内 RCS 缩减量

大于 8 dB，具有超宽带 RCS 缩减能力，同时具备易于加工、成本低、结构紧凑、质量轻便的优点。

参考文献：

- [1] 邢志宇. 基于电磁超表面的天线分析及其隐身技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [2] 刘雨鑫. 基于电磁超表面的 RCS 缩减技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [3] 陈昊, 黄兴军, 陈志新. 基于超表面的电磁波调控隐身技术研究进展 [J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 19-24.
- [4] 张璇. 人工磁导体结构在天线设计及 RCS 缩减中的应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [5] XING Z Y, YANG F, YANG P, et al. A Low-RCS and wideband circularly polarized array antenna co-designed with a high-performance AMC-FSS radome[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2022, 21(8): 1659-1663.
- [6] EL-SEWEDY M F, ABDALLA M A. A monostatic and bistatic RCS reduction using artificial magnetic conductor metasurface[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2023, 71(2): 1988-1992.
- [7] 邓雯. 分形多频和宽带天线的研究与实现 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [8] DIPTIRANJAN S, SOMAK B. A gain-enhanced slotted patch antenna using metasurface as superstrate configuration[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 68(9), 6548-6556.
- [9] 苏琦梦. 基于超表面的 X 波段低 RCS 天线设计与研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [10] 李莹. 基于电磁超材料的低 RCS 天线技术 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [11] SUSHIL K, SHWETA R, SINGH A P. Triple band notch Microstrip patch antenna with fractal defected ground structure[J]. IETE journal of research, 2023, 69(4): 1868-1880.
- [12] 张文博. 人工电磁超表面在阵列天线雷达截面减缩中的应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.

【作者简介】

欧阳鑫（1999—），男，湖南郴州人，硕士研究生，研究方向：隐身电磁超表面设计。

陈星（1970—），男，四川巴中人，博士，教授、博士生导师，研究方向：电磁场理论与微波工程。

（收稿日期：2025-01-13）