

文章编号: 1671-7449(2026)05-0633-07

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(5): 633-639.

用于X波段宽带RCS缩减的蜂窝状棋盘阵列超表面设计

毛煜茹, 杨志良*, 侯聪敏, 姚金杰, 雷继达, 吴保昊

(中北大学 智能探测技术与装备山西省重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 基于相位干涉相消原理, 设计了一种基于蜂窝棋盘排列的超表面结构, 可用于X波段的宽带雷达散射截面(Radar Cross-Section, RCS)缩减。该超表面结构由两种人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)单元周期性交替排列构成, 两种AMC单元在7~12 GHz频段内可实现 $180^\circ \pm 37^\circ$ 的反射相位差。仿真结果表明, 在6~13 GHz频段内, 该超表面相较于同尺寸理想导电体表面可实现RCS缩减大于15 dB, X极化波和Y极化波的RCS在5~13 GHz频段内显著降低, 最大的RCS减小量分别约为44 dB和42 dB。加工实测结果与仿真趋势基本吻合, 验证了该结构在宽频段RCS减缩方面的有效性。

关键词: 超表面; 雷达散射截面; 人工磁导体; 蜂窝棋盘结构

中图分类号: TN82

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026075

引用格式: 毛煜茹, 杨志良, 侯聪敏, 等. 用于X波段宽带RCS缩减的蜂窝状棋盘阵列超表面设计[J]. 测试技术学报, 2026, 40(5): 633-639.

Mao Yuru, Yang Zhiliang, Hou Congmin, et al. A novel design of artificial electromagnetic material for X-band RCS reduction[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(5): 633-639.

A Novel Design of Artificial Electromagnetic Material for X-Band RCS Reduction

Mao Yuru, Yang Zhiliang*, Hou Congmin, Yao Jinjie, Lei Jida, Wu Yuhao

(Shanxi Province Key Laboratory of Intelligent Detection Technology and Equipment,

North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Based on the principle of destructive phase interference, a metasurface with a honeycomb checkboard configuration is proposed for broadband radar cross-section (RCS) reduction in the X-band. The metasurface is composed of two different artificial magnetic conductor (AMC) unit cells arranged periodically and alternately. The designed AMC unit cells were maintained a reflection phase difference of $180^\circ \pm 37^\circ$ within the frequency range of 7-12 GHz. Full-wave simulation results showed that the proposed metasurface achieves an RCS reduction of more than 15 dB in the 6-13 GHz band compared with a perfect electric conductor (PEC) reference surface of the same size. In addition, the RCS of both X- and Y-polarized incident waves across 5-13 GHz was significantly suppressed by the structure, with maximum

【收稿日期】2026-03-12

【修回日期】2026-04-21

【录用日期】2026-05-06

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(62571496); 山西省科技合作交流专项(202404041101020)

【作者简介】毛煜茹(1984—), 女, 讲师, 博士, 主要从事微波工程与天线、电磁超材料研究。E-mail: maoyuru218@126.com。

*【通信作者】杨志良(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事无线信号检测与识别、微波电路与测试研究。E-mail: yangzhiliang188@nuc.edu.cn。

reduction values of approximately 44 dB and 42 dB, respectively. Measured results obtained from the fabricated prototype are found to be in good agreement with the simulation trends, thus verifying the effectiveness of the proposed structure for broadband RCS reduction.

Key words: metasurface; radar cross-section (RCS); artificial magnetic conductor (AMC); honeycomb chessboard structure

0 引言

在现代隐身技术领域,降低装备目标的电磁散射特性已成为当下研究热点,雷达散射截面(Radar Cross-Section, RCS)缩减是隐身技术的核心关键,作为衡量装备隐身性能的重要指标,其缩减技术在军事隐身与民用电磁兼容领域均具有关键意义。传统RCS缩减方法中,修改被测目标的外形来散射入射波会导致气动性能变差,工程实现难度大,而使用吸波材料吸收入射电磁波则存在频带窄、成本高、环境适应性差等缺陷,难以满足复杂电磁环境下的宽频带隐身需求^[1]。

电磁超表面作为一种二维人工电磁材料,为突破上述局限提供了新的研究思路。其通过亚波长尺度的单元结构设计,能够灵活调控电磁波的相位、幅度与极化,具有剖面低、设计自由度大、易于共形集成等突出优势^[2-3]。在RCS缩减领域,基于相位干涉相消原理的棋盘阵列超表面已成为研究热点。其核心机制是利用两种人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)单元的反射相位在特定频带内互补,从而实现RCS缩减。

早期研究主要通过AMC单元与理想导体体(Perfect Electric Conductor, PEC)单元组合构成棋盘结构^[4-5]。尽管验证了相位干涉原理的可行性,但此类结构的工作带宽通常较窄。为拓展带宽,研究者提出采用两种不同谐振频率的AMC单元完全取代PEC单元。Paquay等^[4]指出当两种AMC单元的反射相位差满足 $180^\circ \pm 37^\circ$ 时,可在较宽频带内实现10 dB以上的RCS缩减,这一准则为此后大量研究奠定了基础。

近年来,为进一步提升性能,研究重点转向单元多样化与阵列排布优化。一方面,通过设计更复杂的AMC单元几何形状或引入更多种类的单元,以在更宽频带内实现相位补偿。例如,Zheng等^[6-7]利用两种AMC单元,在8~20 GHz频段实现了31.9 dB的峰值缩减;Kim等^[8]采用同形异尺单元在14.9~16.3 GHz频段获得10 dB减

缩;Su等^[9]更进一步提出基于4种AMC单元的棋盘结构,通过优化多单元相位抵消,在3.75~10 GHz频段实现了相对带宽达91%的RCS缩减,突破了传统相位差条件的严格限制。上述技术中,棋盘状组合是通过调整不同独立AMC组合单元所覆盖的整体面积比例来设计的,这种方式虽未增大加工原型的尺寸,却增加了设计的复杂性。

近年来,国内学者在RCS缩减方面也开展了大量研究并取得了显著进展。任高飞等^[10]将正交AMC棋盘结构应用于微带天线,在8.4~14.8 GHz频段实现了最大33.8 dB的RCS缩减,同时保持了天线辐射性能。孙瑜等^[11]将遗传算法应用于编码超表面的优化设计,通过对超表面编码序列的智能优化,实现了宽频带内的RCS显著降低,展现了智能化优化方法在低RCS超表面设计中的应用前景。

综上所述,现有研究在拓宽RCS缩减带宽方面已取得显著进展,但高性能设计往往伴随着结构复杂性与加工成本的提升。为实现超宽带RCS缩减,往往需要采用多种类AMC单元或非均匀介质层,这显著增加了设计与加工的复杂度^[12-19];而结构相对简单的两单元棋盘结构,则在绝对带宽或角度稳定性方面存在优化空间。因此,在保证宽频带、良好性能的同时,实现结构简洁、低剖面、易加工的超表面是工程应用的关键问题。

本文提出一种基于两种AMC单元的蜂窝状棋盘阵列超表面以实现宽带RCS缩减。仿真结果表明,该超表面在6~13 GHz频段内相较于同尺寸PEC的RCS缩减大于15 dB,在X波段内RCS减小量最高可达44 dB,15 dB的RCS带宽达到83%。相较于已有研究,本文所设计的蜂窝状棋盘超表面具有低成本、低剖面、易于加工等综合优势。

1 AMC棋盘结构实现RCS缩减原理

图1为棋盘状超表面的结构示意图,在介质基板的上表面为棋盘状超表面层,底部为接地层。

RCS的缩减原理是基于射线理论,在接收状态下,入射至棋盘状AMC表面的电磁波部分被反射,其余则透过超表面后,由接地平面再次反射。自由空间中的总反射电场 E 可表示为

$$E = E_r + E_t, \quad (1)$$

$$E_r = E_{r1}e^{j\varphi_{r1}} + E_{r2}e^{j\varphi_{r2}}, \quad (2)$$

式中: E_{r1} 和 E_{r2} 分别为由两种不同AMC1和AMC2反射波对应的电场分量幅值; φ_{r1} 和 φ_{r2} 分别为AMC1和AMC2反射波的相位。为实现AMC1与AMC2反射波之间的相消干涉,根据阵列理论,可以推导出AMC棋盘结构的总反射相位,进而得出相比于PEC板的AMC棋盘结构表面RCS缩减的表达式为

$$RCS_{\text{reduction}} = 10 \lg \left[\frac{E_{r1}e^{j\varphi_{r1}} + E_{r2}e^{j\varphi_{r2}}}{2} \right]. \quad (3)$$

根据式(3),当AMC1与AMC2的反射波相位差 $\Delta\varphi = 180^\circ \pm 37^\circ$,且 $E_{r1} = E_{r2}$ 时可实现10 dB的RCS缩减。

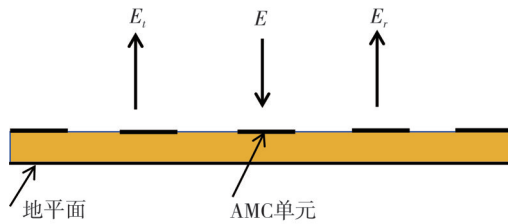


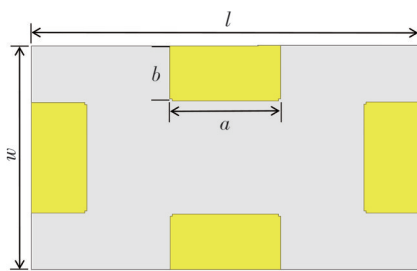
图1 棋盘超表面结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of chessboard metasurface structure

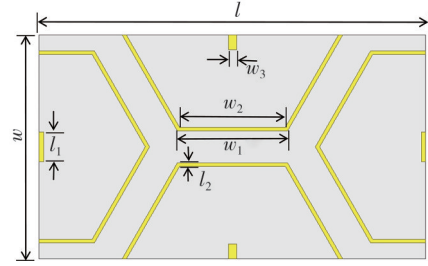
2 RCS缩减的新型棋盘超表面设计

2.1 AMC单元设计

设计两种不同结构的AMC单元(AMC1与AMC2),具体结构如图2所示。这两种贴片单元附在厚度为3 mm,相对介电常数为4.4的FR4介质材料上,介质材料地面为一层金属接地平面。两种不同尺寸单元工作在不同的谐振频率,满足宽频带范围内所需的相位变化要求。



(a) AMC1



(b) AMC2

图2 两种人工磁导体单元结构示意图

Fig. 2 Configurations of the two AMC's unit cells

利用电磁仿真软件HFSS,通过设置Floquet端口与主从边界条件对两种AMC单元进行全波仿真分析,电磁建模如图3所示。

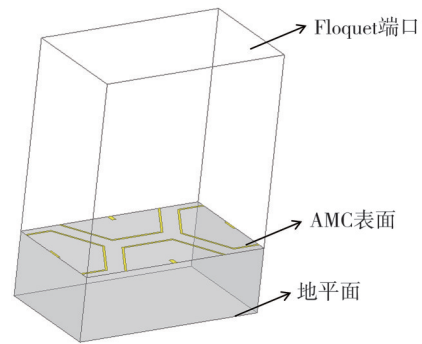


图3 AMC单元的仿真建模

Fig. 3 Simulation modeling of AMC unit cell

对两种AMC单元的几何参数进行了优化设计。其中,AMC1单元采用矩形贴片结构,其贴片边长 a 、 b 决定了该单元的谐振频率,通过调整 a 、 b 的取值可使AMC1单元的反射相位在目标频段内满足相位要求。对于AMC2单元,设计为嵌套式方形环结构,通过仿真结果得到, w_1 和 w_2 是影响AMC2单元反射相位特性的关键参数,通过对 w_1 和 w_2 的协同优化可实现AMC2在宽频带内与AMC1保持稳定相位差。

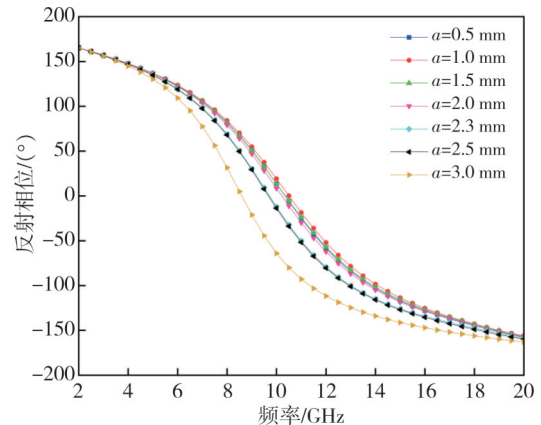


图4 AMC1单元随参数 a 变化的反射相位

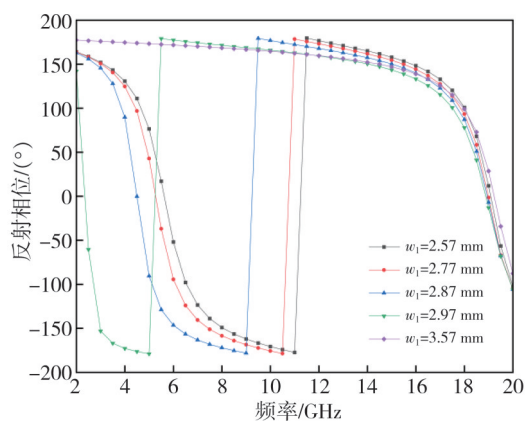
Fig. 4 Reflection phases of AMC1 unit cell with different a

AMC1与AMC2单元在垂直入射波照射下随参数 a 、 w_1 和 w_2 变化的反射相位分别如图4和图5所示,经优化最终确定两种AMC单元结构的尺寸参数如表1所示。

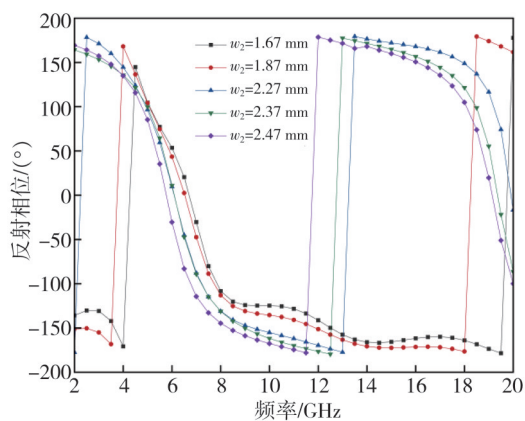
表1 两种人工磁导体单元结构的尺寸参数

Tab. 1 Dimensions of the AMC's unit cells for optimization

参数	值	参数	值
l/mm	108	w_1/mm	2.57
w/mm	61.20	w_2/mm	2.46
a/mm	2.30	w_3/mm	0.24
b/mm	1.10	l_1/mm	0.95
l_2/mm	0.48		



(a) AMC2单元随 w_1 变化的反射相位

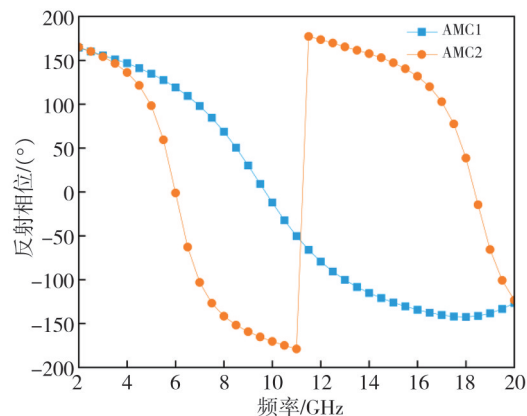


(b) AMC2单元随 w_2 变化的反射相位

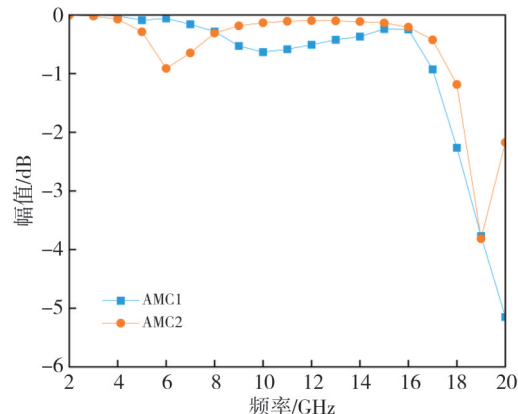
图5 AMC2单元随 w_1 及 w_2 变化的反射相位

Fig. 5 Reflection phases of AMC2 unit cell with w_1 and w_2

优化后的AMC1与AMC2单元在垂直入射波照射下的反射相位、反射系数幅值及两者的相位差分别如图6和图7所示。由图6可知,AMC1与AMC2单元在工作频带内具有相近且较高的反射系数幅值(接近为1),为相位干涉相消提供了幅值条件。由图7可知,满足 $180^\circ \pm 37^\circ$ 相位差条件的频段为7~12 GHz。



(a) 反射相位



(b) 反射系数幅值

图6 两种AMC单元结构的反射相位及幅值

Fig. 6 Reflection phase and amplitude of AMC's unit cells

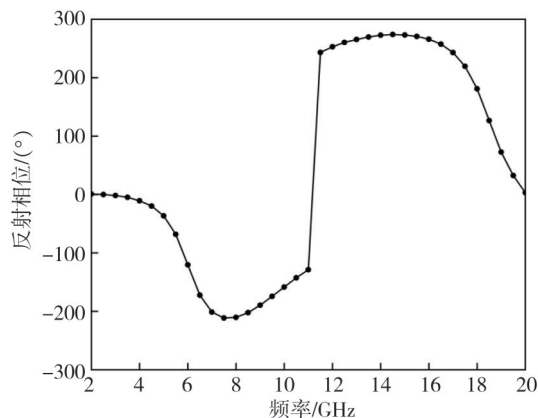


图7 两种AMC单元结构的反射相位差

Fig. 7 Phase difference of AMC's unit cells

2.2 蜂窝状棋盘结构设计

图8展示了蜂窝状棋盘超表面结构,该超表面由AMC1单元和AMC2单元构成的两种子棋盘结构经 3×3 的周期性阵列排布而成。其中,子棋盘结构1由 4×4 个AMC1单元交替排列组成,子棋盘结构2由 4×4 个AMC2单元交替排列组成。

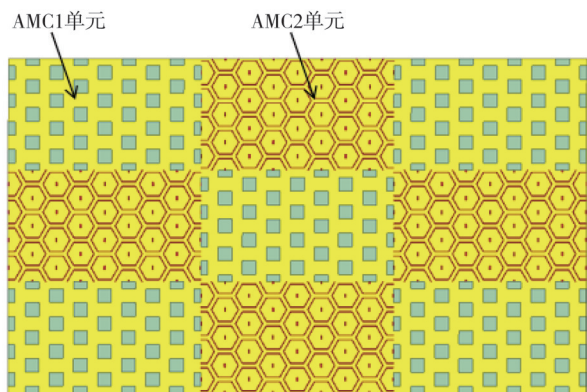


图 8 用于RCS缩减的AMC超表面棋盘结构

Fig. 8 3-D configuration for RCS reduction with AMCs layer

AMC1单元的尺寸为 $5.2\text{ mm} \times 9.0\text{ mm}$, AMC2单元的尺寸为 $5.2\text{ mm} \times 9.0\text{ mm}$ 。AMC1和AMC2经 4×4 的周期性阵列排布构成两个子棋盘结构,如图9所示。由于AMC2单元的特殊设计,两种AMC单元进行棋盘排列之后形成蜂窝状棋盘结构,整体超表面结构的总尺寸为 $108.0\text{ mm} \times 62.35\text{ mm}$ 。实际加工后的超表面结构如图10所示。

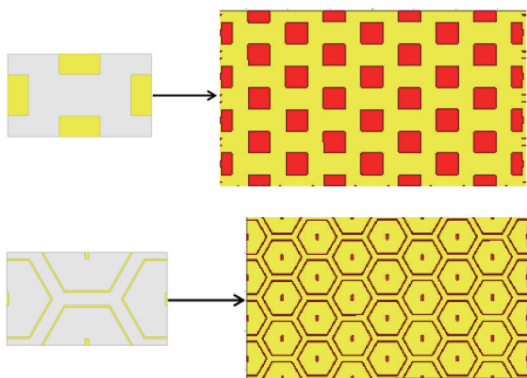


图 9 AMC1和AMC2构成的子棋盘结构

Fig. 9 Substructure of checkerboard formed by AMC1 and AMC2

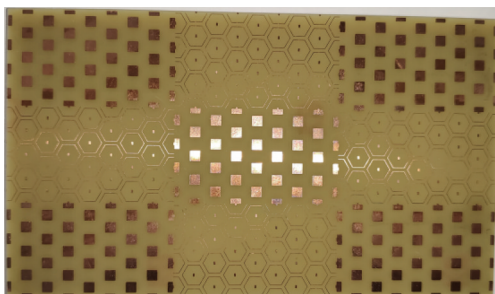


图 10 实际加工的超表面棋盘结构

Fig. 10 Fabricated checkerboard combination of AMC1 and AMC2

3 蜂窝状棋盘超表面 RCS 缩减结果分析

为了研究所提出的蜂窝状棋盘超表面的RCS缩减性能,对该超表面进行了电磁仿真,并与棋盘超

表面尺寸相同的PEC表面进行对比。在单站RCS的仿真分析中,使用HFSS电磁仿真软件进行仿真计算。测量系统的结构图如图11所示,采用工作频段为 $1 \sim 18\text{ GHz}$ 的标准喇叭天线,并连接至矢量网络分析仪测量棋盘超表面的传输系数。

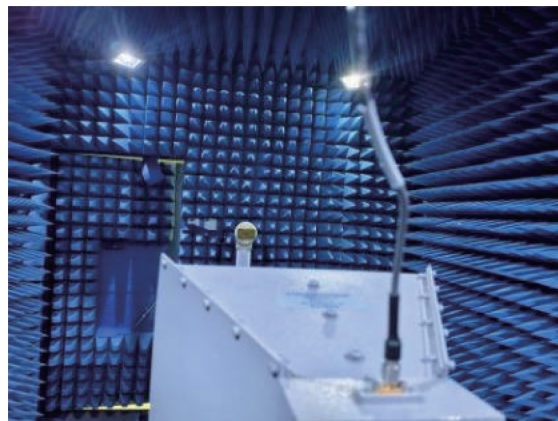


图 11 RCS测试示意图

Fig. 11 Schematic diagram of RCS measurement

图12展示了在X极化和Y极化平面波垂直入射的情况下,蜂窝状棋盘超表面的RCS随频率变化的仿真结果与测量结果。可以看到,在 $6 \sim 13\text{ GHz}$ 频段范围内,对比相同大小的PEC平面,该棋盘超表面RCS缩减大于 15 dB 。

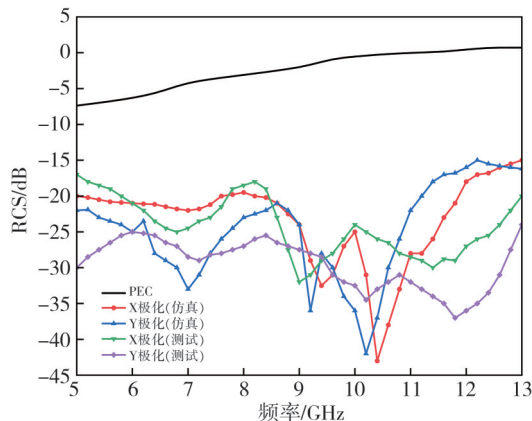


图 12 垂直入射下的单站RCS仿真结果与测试结果对比

Fig. 12 Simulated and measured monostatic RCS reduction performance of checkerboard

对于X极化的垂直入射平面波,所设计的蜂窝状棋盘超表面在 $5 \sim 13\text{ GHz}$ 频带内有效降低了RCS,最大减小量达到 44 dB ,相较于PEC缩减达到 43 dB ;对于Y极化的垂直入射平面波,所设计的蜂窝状棋盘超表面在 $5 \sim 13\text{ GHz}$ 频带内最大减小量达到 42 dB ,相较于PEC缩减达到 40 dB 。该棋盘超表面的RCS缩减频段与AMC1和AMC2满足 $\Delta\varphi = 180^\circ \pm 37^\circ$ 相位差的设计频段相吻合。

从图 12 可以看出,在 11~13 GHz 频段内测量误差显著增大,其中,Y 极化在 12 GHz 附近的误差最为突出,仿真与测试结果的最大偏差达到 20 dB。分析原因主要由以下因素导致:FR4 基板的介电常数与损耗角正切随频率升高而变化,仿真中使用的恒定参数无法完全反映这一趋势,尤其在 12 GHz 以上,介质损耗显著增加,降低了单元反射效率;PCB 加工误差对 AMC 单元中的一些细微结构有一定影响,高频条件下这些尺寸偏差引入的相位误差会增加,从而削弱相位干涉相消的效果;尽管采用了吸波材料,但在高频段及天线近场效应下,样品与天线间的多次反射难以完全消除,可能引入测量偏差。

尽管存在上述差异,实测结果仍复现了仿真预测的宽带 RCS 缩减趋势,验证了所设计超表面结构的有效性。未来工作中可通过使用更低损耗、参数更稳定的基板材料并结合更高精度的加工工艺,进一步提升高频性能。

图 13 展示了所提出的棋盘型超表面结构与同尺寸 PEC 在平面波垂直入射条件下,不同频率(8、10 和 11 GHz)的电场方向对比图。如图 13(a)~(c) 所示,当平面波法向入射时,同尺寸 PEC 表面在轴向(法线方向)产生强烈反射。而对于棋盘型超表面,入射平面波会被散射为多个不同方向的波瓣,从而缩减了电磁目标表面的

RCS。

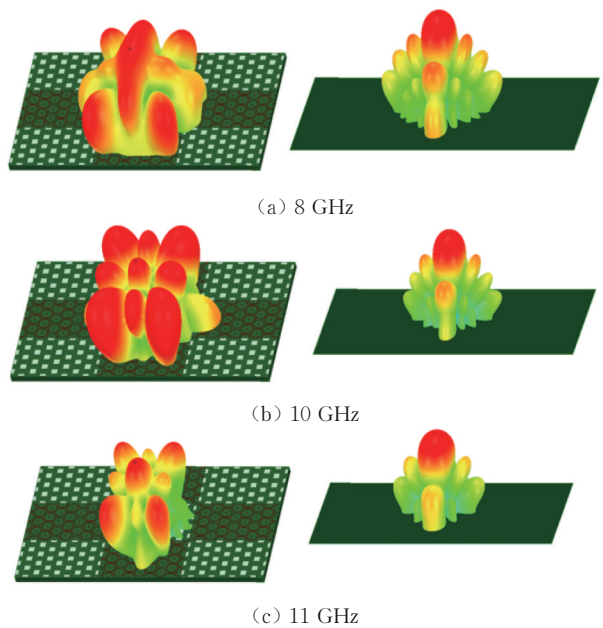


图 13 棋盘超表面与同尺寸 PEC 表面在不同频率下的远场散射方向图

Fig. 13 Far-field scattering pattern for proposed checkerboard metasurface compared with the same-size PEC surface at different frequency

表 2 为所提出的棋盘型超表面与已发表研究成果的性能对比,其中, λ 为中心频率所对应的波长。结果表明,蜂窝状超表面不仅实现了 RCS 缩减,还具有入射角度剖面低、加工成本低的综合优势。

表 2 与已发表文献对比

Tab. 2 Comparison with published literature

文献来源	超表面厚度	RCS 缩减带宽/GHz	相对带宽/%	尺寸/(mm×mm×mm)
[12]	0.15λ	3.75~10(10 dB)	91	$224\times280\times6.35$
[19]	0.13λ	4~8.6(10 dB)	73	$328\times328\times3$
本文	0.10λ	6~13(15 dB)	83	$108\times62.35\times3$

4 结 论

本文提出了一种采用两种 AMC 超表面单元实现 RCS 缩减的方法。两种 AMC 超表面单元以棋盘构型排列,采用厚度为 3 mm、相对介电常数 4.4 的 FR4 介质基板。通过两种不同 AMC 反射波之间的相消干涉实现 RCS 缩减。该棋盘型超表面展现出显著的 RCS 缩减效果,根据仿真及实测结果,所提出的棋盘表面在 6~13 GHz 频段均实现 RCS 缩减大于 15 dB。在后续的研究工作中,可以改变两种 AMC 的排列结构,利用优化算法实现棋盘结构的优化布局。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。
All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

[1] Fante R L, McCormack M T. Reflection properties of the salisbury screen[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988, 36(10): 1443-1454.
[2] Simms S, Fusco V. Chessboard reflector for RCS reduction [J]. Electronics Letters, 2008, 44 (4) : 316-317.
[3] Iriarte J C, Ederra I, Gonzalo R, et al. Dual band RCS reduction using planar technology by combining

- AMC structures [C]//3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany, 2009: 3708-3709.
- [4] Paquay M, Iriarte J C, Ederra I, et al. Thin AMC structure for radar cross-section reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55 (12): 3630-3638.
- [5] Iriarte Galarregui J C, Tellechea Pereda A, Martinez De Falcon J L, et al. Broadband radar cross-section reduction using AMC technology [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61 (12): 6136-6143.
- [6] Zheng Y, Gao J, Cao X, et al. Wideband RCS reduction of a microstrip antenna using artificial magnetic conductor structures [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1582-1585.
- [7] Zheng Y, Gao J, Xu L, et al. Ultrawideband and polarization-independent radar-cross-sectional reduction with composite artificial magnetic conductor surface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1651-1654.
- [8] Kim S H, Yoon Y J. Wideband radar cross-section reduction on checkerboard metasurfaces with surface wave suppression [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(5): 896-900.
- [9] Su J, Lu Y, Liu J, et al. A novel checkerboard metasurface based on optimized multielement phase cancellation for superwideband RCS reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66 (12): 7091-7099.
- [10] 任高飞, 徐勤. 基于人工磁导体的低 RCS 微带天线设计 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20 (9): 959-964.
Ren Gaofei, Xu Qin. Design of low RCS microstrip antenna based on artificial conductor [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(9): 959-964. (in Chinese)
- [11] 孙瑜, 杨茂, 陈新伟, 等. 基于遗传算法的低 RCS 编码超表面 [J]. 测试技术学报, 2026, 40(3): 308-316.
Sun Yu, Yang Mao, Chen Xinwei, et al. Genetic algorithm based low RCS coding metasurface [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40 (3): 308-316. (in Chinese)
- [12] Modi A Y, Balanis C A, Birtcher C R, et al. Novel design of ultrabroadband radar cross section reduction surfaces using artificial magnetic conductors [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65 (10): 5406-5417.
- [13] Chen W, Balanis C A, Birtcher C R. Checkerboard EBG surfaces for wideband radar cross section reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(6): 2636-2645.
- [14] Zhang J, Wang J, Chen M, et al. RCS reduction of patch array antenna by electromagnetic band-gap structure [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 1048-1051.
- [15] Liu Y, Li K, Jia Y, et al. Wideband RCS reduction of a slot array antenna using polarization conversion metasurfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(1): 326-331.
- [16] Liu Y, Hao Y, Li K, et al. Radar cross section reduction of a microstrip antenna based on polarization conversion metamaterial [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 80-83.
- [17] Li K, Liu Y, Jia Y, et al. A circularly polarized high-gain antenna with low RCS over a wideband using chessboard polarization conversion metasurfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(8): 4288-4292.
- [18] Modi A Y, Balanis C A, Birtcher C R, et al. New class of RCS-reduction metasurfaces based on scattering cancellation using array theory [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(1): 298-308.
- [19] Liu X, Gao J, Xu L, et al. A coding diffuse metasurface for RCS reduction [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 724-727.