

# 人工磁导体在低RCS天线设计中的应用

何万禄<sup>1,2</sup>, 郭海清<sup>1,2</sup>, 赵 晔<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>延安大学物理与电子信息学院, 陕西 延安

<sup>2</sup>先进光电材料与器件陕西省高等学校重点实验室, 陕西 延安

收稿日期: 2026年5月26日; 录用日期: 2026年6月19日; 发布日期: 2026年6月26日

## 摘 要

本文基于人工磁导体结构与缝隙天线理论设计了一款低RCS天线。首先基于人工磁道体理论设计出人工磁导体单元, 两个单元之间满足 $(180^\circ \pm 30^\circ)$ 相位差, 将两种天线单元按棋盘结构交叉排列构建天线阵列, 天线阵列在平面波的激励下实现了12.7~29.3 GHz内10 dB以上的单站RCS缩减, 天线阵列的双站RCS也得到了缩减, 入射波在不同方向上被分成6个波瓣; 其次, 设计一款缝隙天线来代替天线阵列的中心单元组成新的天线阵列, 加载人工磁导体后缝隙天线的性能得到了一定的优化, 同时新天线阵列可实现12.2~33.4 GHz范围内6 dB以上的单站RCS缩减和一定角度范围的双站RCS缩减。

## 关键词

人工磁导体, RCS, 天线阵列, 缝隙天线

# Application of Artificial Magnetic Conductors in Low RCS Antenna Design

Wanlu He<sup>1,2</sup>, Haiqing Guo<sup>1,2</sup>, Ye Zhao<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an Shaanxi

<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Optoelectronic Materials and Devices of Higher Education Institutions in Shaanxi, Yan'an Shaanxi

Received: May 26, 2026; accepted: June 19, 2026; published: June 26, 2026

## Abstract

In this paper, a low-RCS antenna is designed based on the artificial magnetic conductor (AMC) structure and slot antenna theory. First, an AMC unit cell is designed according to the artificial magnetic conductor theory, with a phase difference of  $(180^\circ \pm 30^\circ)$  between the two unit cells. The two types

\*通讯作者。

of AMC unit cells are arranged alternately in a chessboard configuration to construct an antenna array. Under plane-wave excitation, the antenna array achieves monostatic RCS reduction of more than 10 dB within 12.7~29.3 GHz, and its bistatic RCS is also reduced, with the incident wave split into six lobes in different directions. Next, a slot antenna is designed to replace the central element of the antenna array, forming a new array. After loading the AMC structure, the performance of the slot antenna is improved to a certain extent. Meanwhile, the new antenna array realizes monostatic RCS reduction of more than 6 dB in the range of 12.2~33.4 GHz and bistatic RCS reduction within a certain angular range.

## Keywords

AMC, RCS, Antenna Array, Slot Antenna

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

在现代信息化战争中,电磁隐身技术作为提高作战平台生存能力和突防能力的重要技术,受到世界各国军事领域的高度重视[1]。隐身技术的核心目标是有效减小特定目标的 RCS,使其不易被敌方探测系统发现[2]。随着目标检测技术的发展,隐身技术面临着巨大的挑战,更宽的隐身频段和更低 RCS 成为学者们的研究热点[3][4]。传统的天线 RCS 减缩的方法包括天线形状改变[5]、加载吸波材料[6]、加载频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)、加载人工磁导体[7]等方法,通过改变天线结构,可去除部分金属结构以降低天线 RCS,但该方法会导致天线增益下降、辐射方向图畸变等问题[8][9]。采用吸波材料作为天线的介质基板,虽然会吸收入射雷达波来实现天线的 RCS 减缩,但会对天线的自身性能产生不利影响[10]-[12]。加载电磁带隙结构可以较好的实现天线 RCS 减缩,但会限制 RCS 减缩的带宽[13][14],使用 FSS (Frequency Selective Surface, FSS)作为天线罩或地板时,可以将雷达入射波反射到其他方向已实现天线 RCS 减缩,但只能满足天线工作频带之外的 RCS 减缩[15]-[17]。因此,开展新型 RCS 缩减结构研究及宽带天线的 RCS 缩减技术,具有重要的学术研究价值与工程应用前景。

超材料的快速发展为 RCS 缩减提供了新思路,超表面作为超材料的二维形式,可以有效地调控电磁波的相位来实现天线 RCS 缩减,并且对天线辐射性能影响较小[18]。AMC 作为一种广泛的超表面,通过同相反射特性,与 PEC 形成反射波对消,有效降低天线 RCS。相比传统吸波材料,AMC 结构低剖面、轻量化,易于集成到天线或载体表面。

2015 年, Zheng 等人[19]将两个不同的 AMC 单元按棋盘结构排列来实现 RCS 缩减,天线阵列实现了 8~20 GHz 范围内 RCS 缩减;在[20]中,使用形状相同但尺寸不同的 AMC 组合来构建棋盘结构,实现了 14.9~16.3 GHz 内 10 dB 以上的 RCS 缩减。文献[21]中,采用了两种不同 AMC 单元来减小 RCS。文献将两种不同的 AMC 单元构成 8 \* 8 天线阵列来实现 25~37.8 GHz 范围内 10 dB 以上的单站 RCS 缩减。

本文基于人工磁导体理论两种不同 AMC 单元并按棋盘结构组成天线阵列,AMC 天线阵列实现了 12.7~29.3 GHz 范围内 10 dB 以上的单站 RCS 缩减;随后设计一款缝隙天线来代替天线阵列的中心单元组成新的天线阵列,加载人工磁导体后缝隙天线的性能得到了一定的优化,同时新天线阵列可实现 12.2~33.4 GHz 范围内 6 dB 以上的单站 RCS 缩减和一定角度范围的双站 RCS 缩减。

## 2. 天线结构的分析与设计

### 2.1. AMC 单元

如图 1 所示设计了两种 AMC 单元结构，一种是加载槽结构的菱形结构，一种是“米字型”结构。两种 AMC 单元结构金属贴片、金属地板及介质基板构成，介质基板采用 Rogers RT5880 ( $\epsilon_r = 2.2, \tan \delta = 0.0009$ )，基板厚度 2 mm。天线单元的具体参数如表 1 所列：

Table 1. Antenna dimensions of AMC unit (mm)

表 1. AMC 单元的天线结构尺寸(mm)

参数	a	b	c	d	e	w
数值	3	1	1.7	5.9	0.31	8

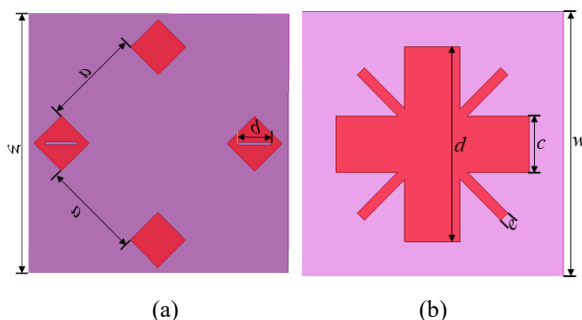


Figure 1. Structure of AMC unit cells: (a) AMC1; (b) AMC2

图 1. AMC 单元：(a) AMC1；(b) AMC2

### 2.2. RCS 缩减原理

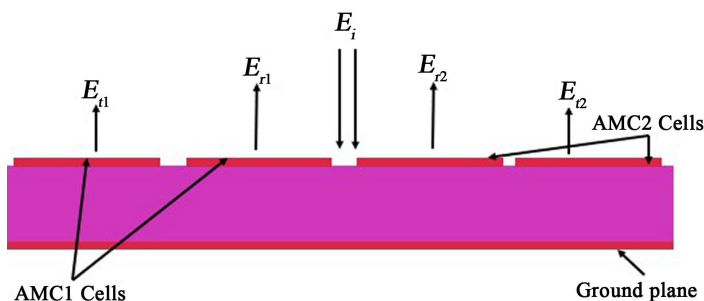


Figure 2. Schematic diagram of RCS reduction principle

图 2. RCS 缩减原理图

AMC 缩减 RCS 的原理如图 2 所示。当电磁波照射到 AMC 上，部分电磁波被 AMC 反射，部分电磁波( $E_i$ )穿过介质基板被地板反射，如图 2 所示。自由空间中，反射的总电场( $E$ )用以下等式表示：

$$E = E_r + E_t \tag{1}$$

$$E_r = E_{r1}e^{j\varphi_{r1}} + E_{r2}e^{j\varphi_{r2}} \tag{2}$$

其中， $E_{r1}$ 和 $E_{r2}$ 是 AMC1 和 AMC2 反射波的电场。 $\varphi_{r1}$ 、 $E_{r1}$ 、 $\varphi_{r2}$ 和 $E_{r2}$ 分别是 AMC1 和 AMC2 反射波的相位和幅度。为了使 AMC 1 和 AMC 2 反射波之间产生相消干涉，给出了 RCS 缩减的表达式：

$$RCS \text{ Reduction} = 10 \log_{10} \left[ \frac{E_{r1} e^{j\varphi_{r1}} + E_{r2} e^{j\varphi_{r2}}}{2} \right] \quad (3)$$

由上式知, 当 AMC 单元之间满足  $(\varphi_{r1} - \varphi_{r2} = 180^\circ \pm 37^\circ)$  时, 可以获得 10 dB 的 RCS 缩减。

### 2.3. AMC 相位

为了验证 AMC 单元是否满足 RCS 缩减的原理, 对 AMC 天线单元相位进行分析如图 3 所示。由图知, AMC 单元在 12.7~29.3 GHz 内满足相位相消干涉原理, 为后续构建棋盘结构奠定了基础。

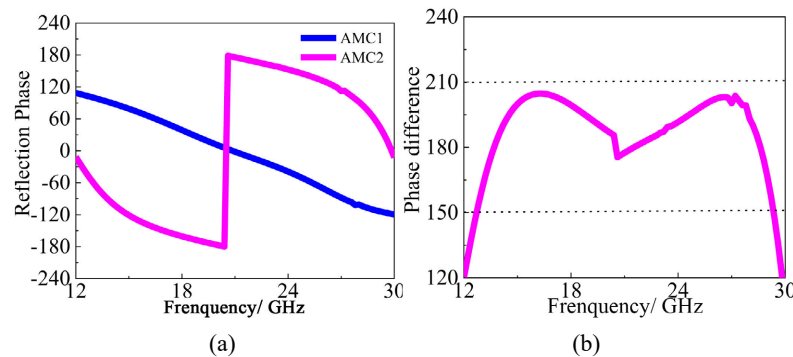


Figure 3. Phase characteristics of unit cells: (a) Reflection phase; (b) Phase difference  
图 3. 单元相位: (a) 天线相位; (b) 相位差

### 3. 宽带低 RCS 阵列设计与分析

将 AMC1 与 AMC2 组成  $2 \times 2$  阵列如图 4 所示, 将  $2 \times 2$  阵列按照棋盘分布组成  $8 \times 8$  天线阵列如图 4 所示。该棋盘结构由 64 个天线单元排列在介电常数为 2.2、介质损耗为 0.0009 的 Rogers RT5880 基板上, 低 RCS 阵列的具体尺寸为  $64 \text{ mm} \times 64 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。

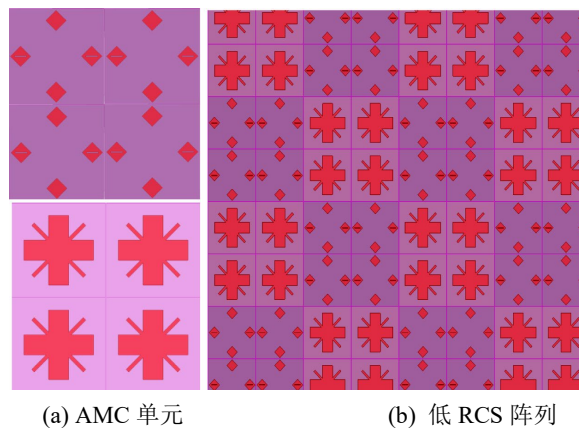


Figure 4. Low-RCS antenna array: (a) AMC unit; (b) Low RCS array  
图 4. 天线阵列: (a) AMC 单元; (b) 低 RCS 阵列

为了验证天线阵列的 RCS 缩减性能, 如图 5 所示为单站 RCS 在平面波照射下随频率变化的变化图。由图知, 天线阵列的单站 RCS 在工作频段内低于同尺寸 PEC 板的单站 RCS, 其中在 12.7~29.3 GHz 频段内实现了 10 dB 以上缩减, 可用于 Ku 波段的天线 RCS 缩减。

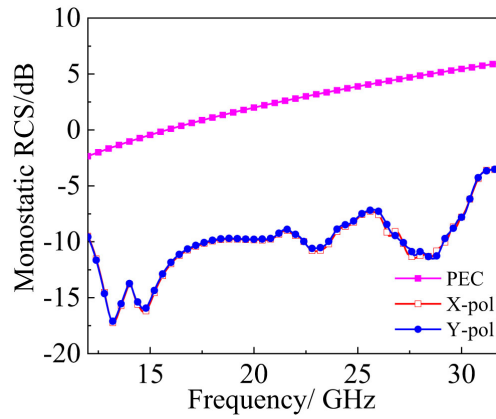
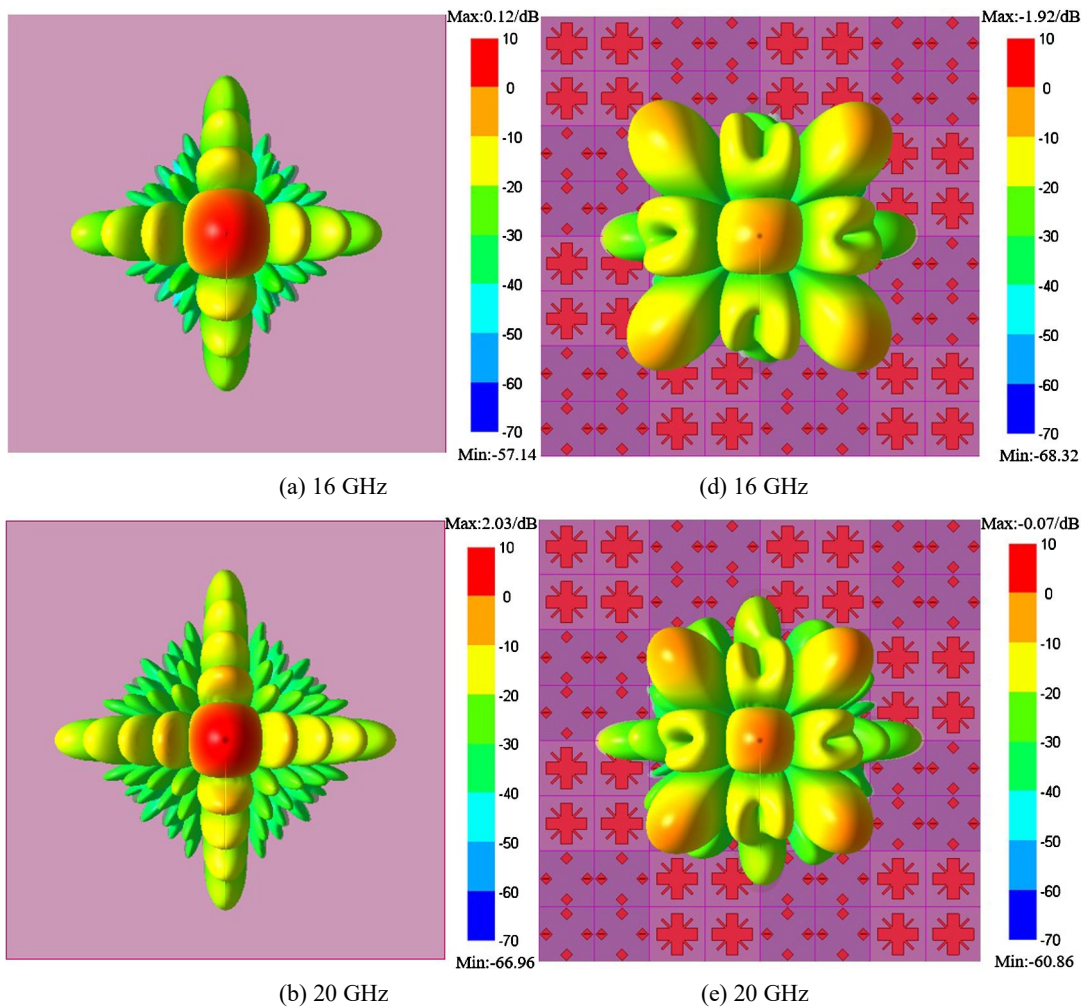


Figure 5. Monostatic RCS  
图 5. 单站 RCS

进而分析天线阵列的 3-D 双站 RCS (Theta: 0~180°; Phi: 0~360°), 图 6 为不同频率(16、20 和 24 GHz)下, 天线阵列与同尺寸 PEC 板的双站 RCS。当平面波垂直入射在 PEC 表面上时, PEC 表面具有强烈的反射如图 6(a)~(c)所示; 对于天线阵列, 入射平面波在不同方向上散射成六个波瓣, 如图 6(d)~(f)所示。



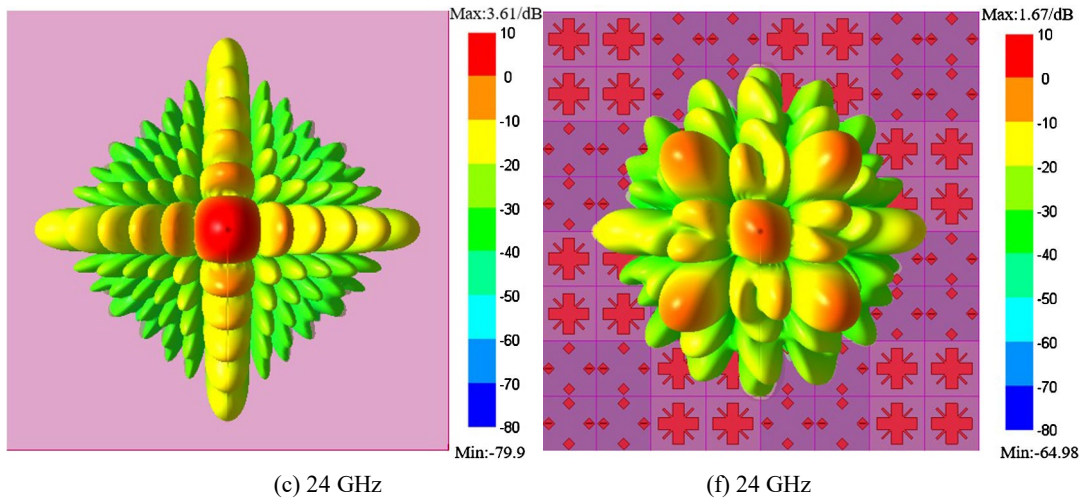


Figure 6. 3-D bistatic RCS patterns: (a)~(c) PEC plate; (d)~(f) Proposed array  
 图 6. 3-D 双站 RCS: (a)~(c) PEC; (d)~(f) 天线阵列

## 4. 加载缝隙天线的人工磁导体结构低 RCS 阵列设计与分析

### 4.1. 缝隙天线单元

缝隙天线单元结构如图 7 所示, 缝隙天线由矩形贴片、两层介质基板、加载槽结构的金属地板及底部馈线组成, 其介质基板选用 Rogers RT5880 基板 ( $\epsilon_r = 2.2, \tan \delta = 0.0009$ ), 矩形贴片采用覆铜结构。缝隙天线基于缝隙耦合馈电的方式进行激励。在软件中结合辐射边界与离散端口馈线来实现天线的建模优化。缝隙天线单元结构的具体参数尺寸如表 2 所列:

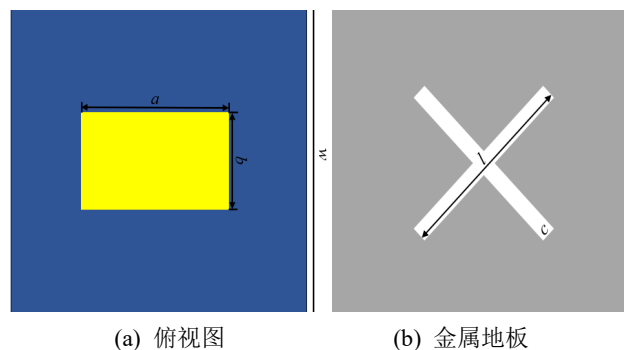
Table 2. Dimensions of slot antenna (mm)

表 2. 缝隙天线的结构尺寸(mm)

参数	a	b	w	l	c	d	e	h1	h2
数值	10	6	24	16	5	9	0.55	1.9	0.1

### 4.2. 加载缝隙天线的人工磁导体结构低 RCS 阵列

将 AMC1 与 AMC2 组成  $3 \times 3$  阵列, 将  $3 \times 3$  阵列按照棋盘交叉分布组成  $9 \times 9$  天线阵列。用同尺寸的缝隙天线代替  $9 \times 9$  阵列正中心  $3 \times 3$  天线单元构成新的低 RCS 阵列如图 8 所示, 天线单元排列在介电常数为 2.2、介质损耗为 0.0009 的 Rogers RT5880 基板上, 棋盘结构的整体尺寸为  $72 \text{ mm} \times 72 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。



(a) 俯视图

(b) 金属地板

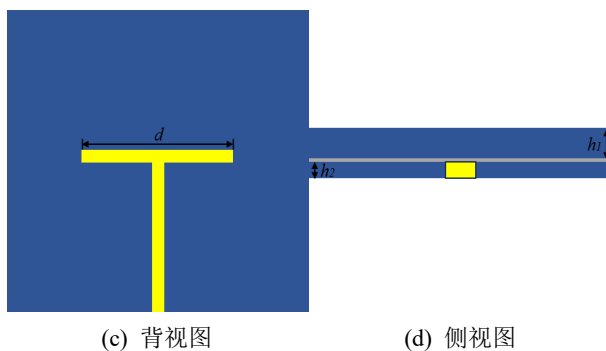


Figure 7. Structure of slot antenna  
图 7. 缝隙天线结构图

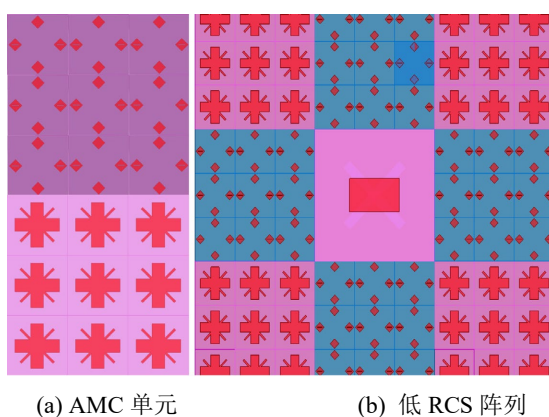


Figure 8. Low-RCS array loaded with slot antenna  
图 8. 天线阵列

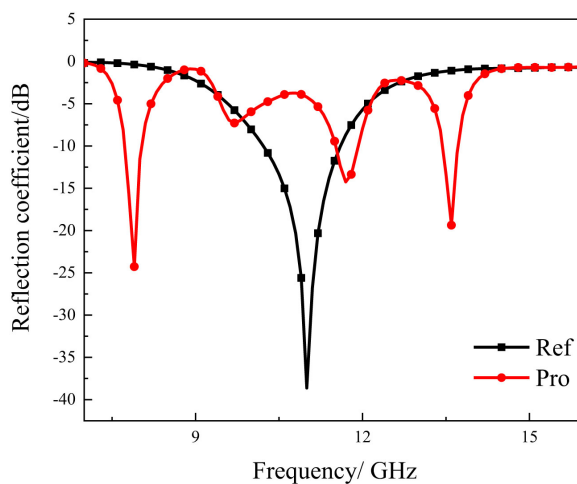
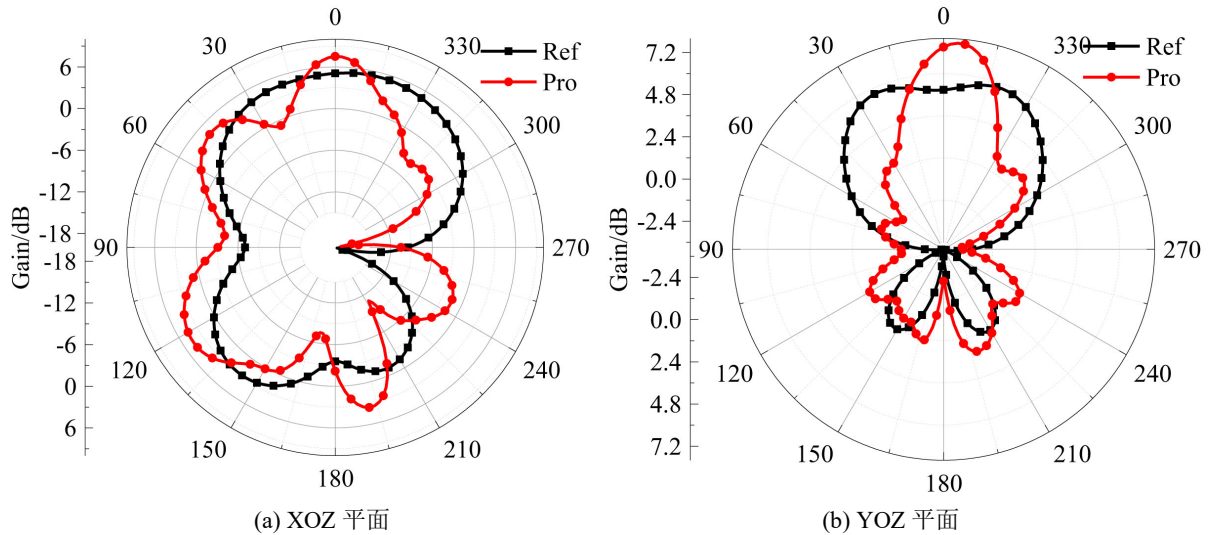


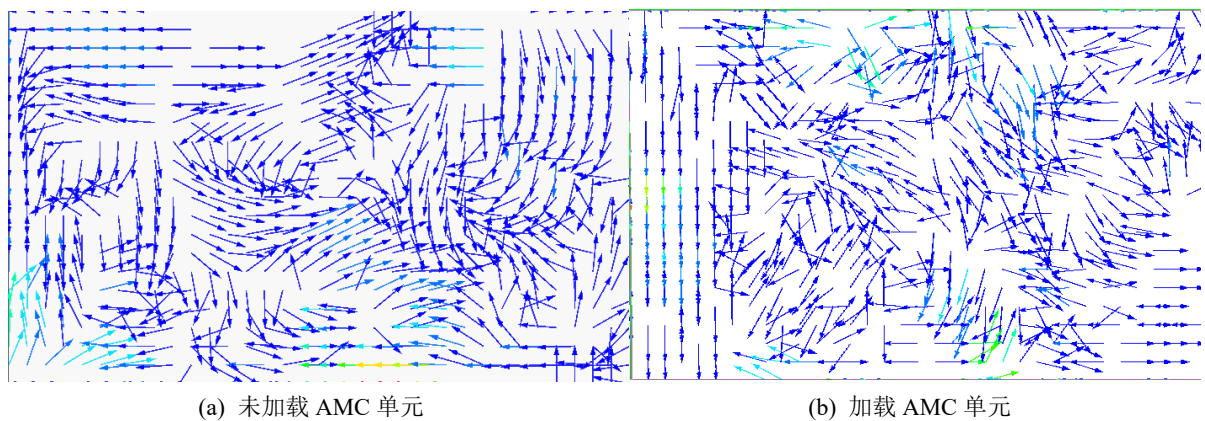
Figure 9. Reflection coefficient  
图 9. 反射系数

利用软件分析加载 AMC 天线单元前后缝隙天线辐射特性的变化，天线的反射系数如图 9 所示。由图知，加入 AMC 单元显著改变了缝隙天线的谐振特性，拓宽了工作带宽，并在多个频段改善了阻抗匹配，降低了回波损耗，加载后，缝隙天线产生多个谐振点。



**Figure 10.** Antenna gain patterns  
**图 10.** 天线增益图

加载 AMC 天线单元后, AMC 对缝隙天线 XOZ 平面增益影响显著, 优化了缝隙天线的增益, 提升了 1.1 dB; 提升了天线的全向性; 在 YOZ 平面, AMC 显著改变缝隙天线增益, 增益提升了 1.2 dB, 天线在法向方向的能量辐射更加集中, 天线增益图如图 10 所示; 图 11 所示为缝隙天线加载 AMC 单元前后的贴片电流图, 由图可知, 加载 AMC 单元后表面波电流被抑制, 反向电流减少, 辐射效率得到提高, 增益实现了显著提升。



**Figure 11.** Patch current distribution  
**图 11.** 缝隙天线贴片电流图

在 X、Y 极化波垂直入射下, 天线阵列的单站 RCS 随频率的变化如图 12 所示, 由图知, 设计天线在 10~34 GHz 范围内有明显的 RCS 缩减, 其中, 单站 RCS 减缩量超过 6 dB 的频带范围为 12.2 GHz 至 33.4 GHz, 该天线具有良好的 RCS 缩减性能。

在 X、Y 极化波垂直入射下, 天线阵列的双站 RCS 随入射角  $\Theta$  变化的趋势图如图 13 所示。由图知, 天线阵列的双站 RCS 在  $(-20^\circ, 20^\circ)$  范围内较 PEC 板较低, 其中当入射角  $\Theta = 46^\circ$  时, X 极化波下双站 RCS 最大缩减量为 27.6 dB。

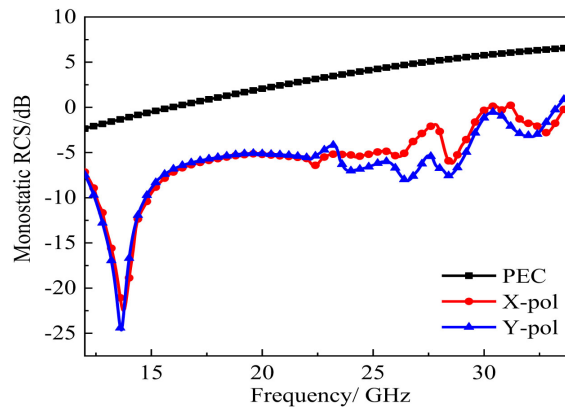


Figure 12. Monostatic RCS

图 12. 单站 RCS

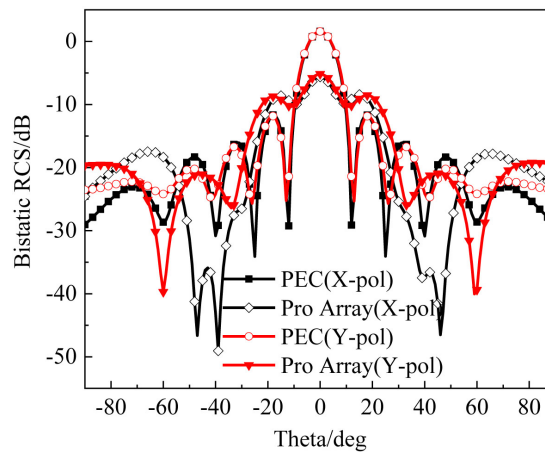


Figure 13. Bistatic RCS

图 13. 双站 RCS

Table 3. Performance comparison between existing antennas and the designed AMC

表 3. 现有天线与所设计的 AMC 性能对比

序号	RCS 缩减带宽	带宽比	带宽/基板厚度	双站 RCS (波瓣)
[22]	0.13 $\lambda_0$	2.04:1	64/ $\lambda_0$	4
[23]	0.14 $\lambda_0$	2.2:1	77.1/ $\lambda_0$	5
[24]	0.11 $\lambda_0$	1.51:1	37.2/ $\lambda_0$	6
[25]	0.15 $\lambda_0$	2.67:1	41.67/ $\lambda_0$	6
[8]	0.08 $\lambda_0$	1.51:1	160/ $\lambda_0$	6
This Work	0.14 $\lambda_0$	2.3:1	118/ $\lambda_0$	6

表 3 所列展示了本文设计的天线与现有天线的性能对比情况。现有天线和本文所设计天线均运用了人工磁导体超表面来实现 RCS 缩减。本文设计的天线在阻抗带宽方面，表现优于现有天线；在基板厚度方面上，本设计虽逊于文献[22] [25]中的天线，但 RCS 缩减带宽优于现有天线；而在带宽比方面，本文设计的天线则低于文献[22] [23] [25]中的天线，但其在双站 RCS 波瓣优于或持平于现有天线。总体而言，

本文设计的天线在阻抗带宽、增益提升以及 RCS 缩减等方面, 综合呈现出较为出色的性能。

## 5. 结论

本文提出了两个 AMC 超表面单元来实现天线的单站、双站 RCS 缩减。两个 AMC 单元交叉排列在厚度为 2 mm 的 Rogers RT5880 介质基板上, AMC 单元之间满足相位相消原理来实现 RCS 缩减。天线阵列实现了 12.7~29.3 GHz 范围内 10 dB 以上的单站 RCS 缩减; 天线阵列的双站 RCS 也实现了缩减, 入射平面波在不同方向上散射成五个波瓣, 但是双站 RCS 缩减的角度范围过窄, 后续可以优化 AMC 单元与缝隙天线的组合方式(将 AMC 单元置于缝隙天线正上方等排列方式)或将 RCS 缩减频段拓宽至毫米波或者更高频段。

## 基金项目

大学生创新创业训练计划项目(S202510719124), 延安大学科研计划项目(GXYQ001)。

## 参考文献

- [1] 孟浩轩. 基于电磁超材料的 RCS 减缩技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [2] Li, Y., Cao, Q. and Wang, Y. (2018) Radar Cross Section Reduction Metasurfaces Based on Phase Gradient and Chessboard Structure. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, **28**, e21457. <https://doi.org/10.1002/mmce.21457>
- [3] Xi, Y., Jiang, W., Hong, T., Wei, K. and Gong, S. (2021) Wideband and Wide-Angle Radar Cross Section Reduction Using a Hybrid Mechanism Metasurface. *Optics Express*, **29**, 22427-22441. <https://doi.org/10.1364/oe.429972>
- [4] Fu, C., Han, L., Liu, C., Sun, Z. and Lu, X. (2021) Dual-Band Polarization Conversion Metasurface for RCS Reduction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **69**, 3044-3049. <https://doi.org/10.1109/tap.2020.3028148>
- [5] Xu, W., Wang, J., Chen, M., Zhang, Z. and Li, Z. (2015) A Novel Microstrip Antenna with Composite Patch Structure for Reduction of In-Band RCS. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **14**, 139-142. <https://doi.org/10.1109/lawp.2014.2357017>
- [6] Liu, Y. and Zhao, X. (2014) Perfect Absorber Metamaterial for Designing Low-RCS Patch Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **13**, 1473-1476. <https://doi.org/10.1109/lawp.2014.2341299>
- [7] El-Sewedy, M.F. and Abdalla, M.A. (2023) A Monostatic and Bistatic RCS Reduction Using Artificial Magnetic Conductor Metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **71**, 1988-1992. <https://doi.org/10.1109/tap.2022.3225597>
- [8] Dikmen, C.M., Cimen, S. and Cakir, G. (2014) Planar Octagonal-Shaped UWB Antenna with Reduced Radar Cross Section. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **62**, 2946-2953. <https://doi.org/10.1109/tap.2014.2313855>
- [9] Jiang, W., Liu, Y., Gong, S.X. and Hong, T. (2009) Application of Bionics in Antenna Radar Cross Section Reduction. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **8**, 1275-1278. <https://doi.org/10.1109/lawp.2009.2037168>
- [10] Zhang, P. and Li, J. (2017) Compact UWB and Low-RCS Vivaldi Antenna Using Ultrathin Microwave-Absorbing Materials. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **16**, 1965-1968. <https://doi.org/10.1109/lawp.2017.2690670>
- [11] Pozar, D.M. (1992) RCS Reduction for a Microstrip Antenna Using a Normally Biased Ferrite Substrate. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, **2**, 196-198. <https://doi.org/10.1109/75.134353>
- [12] Liu, T., Cao, X., Gao, J., Zheng, Q., Li, W. and Yang, H. (2013) RCS Reduction of Waveguide Slot Antenna with Metamaterial Absorber. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **61**, 1479-1484. <https://doi.org/10.1109/tap.2012.2231922>
- [13] Li, Y.Q., Zhang, H., Fu, Y.Q. and Yuan, N.C. (2008) RCS Reduction of Ridged Waveguide Slot Antenna Array Using EBG Radar Absorbing Material. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **7**, 473-476. <https://doi.org/10.1109/lawp.2008.2001548>
- [14] Zheng, Q., Guo, C., Vandenbosch, G.A.E. and Ding, J. (2020) Low-Profile Circularly Polarized Array with Gain Enhancement and RCS Reduction Using Polarization Conversion EBG Structures. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **68**, 2440-2445. <https://doi.org/10.1109/tap.2019.2943693>
- [15] Pazokian, M., Komjani, N. and Karimipour, M. (2018) Broadband RCS Reduction of Microstrip Antenna Using Coding Frequency Selective Surface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **17**, 1382-1385.

- 
- <https://doi.org/10.1109/lawp.2018.2846613>
- [16] Sharma, A., Kanaujia, B.K., Dwari, S., Gangwar, D., Kumar, S., Choi, H.C., et al. (2019) Wideband High-Gain Circularly-Polarized Low RCS Dipole Antenna with a Frequency Selective Surface. *IEEE Access*, **7**, 156592-156602. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2948176>
- [17] Genovesi, S., Costa, F. and Monorchio, A. (2012) Low-Profile Array with Reduced Radar Cross Section by Using Hybrid Frequency Selective Surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **60**, 2327-2335. <https://doi.org/10.1109/tap.2012.2189701>
- [18] 梅中磊, 张黎, 崔铁军. 电磁超材料研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 27-39.
- [19] Zheng, Y., Gao, J., Cao, X., Yuan, Z. and Yang, H. (2015) Wideband RCS Reduction of a Microstrip Antenna Using Artificial Magnetic Conductor Structures. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **14**, 1582-1585. <https://doi.org/10.1109/lawp.2015.2413456>
- [20] Kim, S.H. and Yoon, Y.J. (2019) Wideband Radar Cross-Section Reduction on Checkerboard Metasurfaces with Surface Wave Suppression. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **18**, 896-900. <https://doi.org/10.1109/lawp.2019.2905012>
- [21] Chen, W., Balanis, C.A. and Birtcher, C.R. (2015) Checkerboard EBG Surfaces for Wideband Radar Cross Section Reduction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **63**, 2636-2645. <https://doi.org/10.1109/tap.2015.2414440>
- [22] Murugesan, A., Natarajan, D. and Selvan, K.T. (2021) Low-Cost, Wideband Checkerboard Metasurfaces for Monostatic RCS Reduction. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **20**, 493-497. <https://doi.org/10.1109/lawp.2021.3054863>
- [23] Khan, T.A., Li, J., Chen, J., Raza, M.U. and Zhang, A. (2019) Design of a Low Scattering Metasurface for Stealth Applications. *Materials*, **12**, Article 3031. <https://doi.org/10.3390/ma12183031>
- [24] Dawar, P. and Abdalla, M.A. (2021) Near-Zero-Refractive-Index Metasurface Antenna with Bandwidth, Directivity and Front-To-Back Radiation Ratio Enhancement. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **35**, 1863-1881. <https://doi.org/10.1080/09205071.2021.1923069>
- [25] Su, J., Lu, Y., Liu, J., Yang, Y., Li, Z. and Song, J. (2018) A Novel Checkerboard Metasurface Based on Optimized Multielement Phase Cancellation for Superwideband RCS Reduction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 7091-7099. <https://doi.org/10.1109/tap.2018.2870372>