

文章编号: 1671-7449(2026)03-0308-09

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(3): 308-316.

基于遗传算法的低RCS编码超表面

孙瑜^{1,2}, 杨茂^{1,2}, 陈新伟^{1,2}, 苏晋荣^{1,2*}

(1. 山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030006; 2. 无线通信与检测山西省重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要: 提出了一种基于遗传算法的低雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)编码超表面。首先, 设计了4种符合相位相消原理的人工磁导体(Artificial Magnetic Conductor, AMC)单元, 然后, 将其构成两组AMC复合阵列, 并利用遗传算法对该阵列的排列进行优化。该方法在提升超表面排列自由度的同时降低了设计复杂度, 提升了算法迭代速度。该超表面的三维远场方向图表明其散射模式呈多瓣化分布, 主瓣能量分散效果比传统棋盘排布有显著提升。测试结果表明, 该超表面在12.8~36.8 GHz的超宽频段内实现了超过10 dB的RCS缩减, 其相对带宽达到了97%。此外, 该超表面在X和Y极化波入射下均保持良好RCS缩减, 具有极化不敏感特性。凭借其尺寸小、剖面低以及出色的RCS缩减性能, 该超表面在隐匿通信系统领域具有重要应用价值。

关键词: 人工磁导体; 遗传算法; 宽带雷达散射截面缩减; 低剖面

中图分类号: O441.4

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026033

引用格式: 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.

Genetic Algorithm-Based Low-RCS Coding Metasurface

SUN Yu^{1,2}, YANG Mao^{1,2}, CHEN Xinwei^{1,2}, SU Jinrong^{1,2*}

(1. School of Physics and Electronics Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Wireless Communication and Detection, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A genetic algorithm-based low radar cross section (RCS) coding metasurface was proposed. Firstly, 4 kinds of artificial magnetic conductor (AMC) unit cells satisfying the phase cancellation principle were designed and assembled into two composite AMC arrays. The genetic algorithm was employed to optimize the array arrangement, enhancing the metasurface's overall degrees of freedom while reducing design complexity and accelerating iterative convergence. The three-dimensional far-field radiation pattern of the metasurface demonstrates a multi-lobe scattering energy distribution with significant dispersion of the main lobe energy. Compared to traditional checkerboard configurations, the proposed structure exhibits markedly improved RCS reduction performance. Experimental results demonstrate that the optimized metasurface achieves over 10 dB RCS reduction across an ultrawide bandwidth of 12.8—36.8 GHz, corresponding to a relative bandwidth of 97%. Additionally, the metasurface maintains stable RCS reduction under both X- and Y-polarized wave incidences, indicating polarization insensitivity. With its compact size, low profile, and excellent reduction

【收稿日期】2025-05-04

【基金项目】山西省基础研究计划资助项目(202203021211295)

【作者简介】孙瑜(1999—), 男, 硕士生, 主要从事编码超表面研究。E-mail: 17836213128@163.com。

*【通信作者】苏晋荣(1981—), 女, 副教授, 博士, 主要从事微波器件研究。E-mail: sujinrong@sxu.edu.cn。

performance, this metasurface serves as a promising candidate for stealth communication systems.

Key words: artificial magnetic conductor (AMC); genetic algorithm; broadband radar cross section reduction; low-profile

0 引言

在信息化战争背景下,如何提高武器装备的电磁隐身能力已成为全球军事科技研究的重点问题之一。雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)是衡量目标雷达波反射能力的核心指标,其有效缩减可使目标被探测概率降低。传统隐身技术主要依赖外形优化设计及吸波材料涂覆,但这类方法往往面临气动性能折损与高昂维护成本的双重制约,难以满足现代战争对隐身装备的严苛要求^[1]。在此背景下,电磁超表面技术凭借其独特的电磁波调控能力脱颖而出,通过对电磁波幅度、相位的灵活调控来缩减 RCS,具有灵活、高效、不影响气动性能等优势,成为近年来该领域的研究热点之一^[2]。当前,可用于 RCS 缩减的超表面主要有频率选择吸波器(Frequency Selective Absorber, FSA)、相位梯度超表面(Phase Gradient Metasurface, PGM)、人工磁导体超表面(Artificial Magnetic Conductor Metasurface, AMC Metasurface)、极化转换超表面(Polarization Converting Metasurface, PCM)等。例如, Huang 等^[3]提出了一种由三层结构组成的新型频率选择吸波器,实现了在 1.35~4.9 GHz 频段内的 10 dB 宽带 RCS 缩减; Singh 等^[4]设计了一款基于 8 种相位梯度单元的 PGM,在 16~22 GHz 频段内实现了 10 dB RCS 缩减; Iriarte 等^[5]提出了一种基于 AMC 单元的棋盘排布超表面,在单频点 15.32 GHz 处实现了良好的 RCS 缩减; Zhao 等^[6]设计了两组极化转换单元,采用棋盘格排布方式实现了 15.8~19.3 GHz 与 21.4~36.5 GHz 双频段内 10 dB RCS 缩减。尽管这些棋盘式排布的超表面能有效实现 RCS 缩减,但并非最优方案,其 RCS 缩减带宽、缩减量等方面仍有进一步提升的可能。因此,如何突破传统排布模式的性能,实现 RCS 的缩减量、缩减带宽同步提升,仍是该领域亟待解决的问题。

为此,学者们提出用算法优化单元的排列方式,包括离散水循环算法(Discrete Water Cycle Algorithm, DWCA)、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)等。如, Saifullah 等^[7]利用离散水循环法优化 16 种编码

超表面单元的排布,在(5~40 GHz 频段实验了 10 dB 以上的宽频 RCS 缩减^[7];同样,该作者等^[8]通过 DWCA 优化所设计的一组 AMC 单元的排布,在 15.5~40 GHz 频段内实现了 10 dB 以上的 RCS 缩减效果,该算法模拟水循环的动态、多层次优化机制,在处理高维编码问题时表现出了一定的优势; Fu 等^[9]利用 GA 的全局搜索能力优化所设计的一组极化转换单元的排布,在 9.26~12.87 GHz 和 14.84~19.35 GHz 双频段内实现了 10 dB 以上 RCS 缩减; Lu 等^[10]通过 PSO 迭代搜寻个体与全局最优解,有效引导搜索方向,在 7.5~22.5 GHz 频段内实现了 10 dB 以上的 RCS 缩减; Taher 等^[11]通过随机编码优化其设计的极化转换单元的排布,实现了在 13~22 GHz 频段内 10 dB RCS 缩减。Shan 等^[12]则利用粒子群算法开展单元设计,通过二进制粒子群算法优化像素化棋盘格超表面的 AMC 图案,并采用交错三角形布局优化单元排布,在 3.6~10.4 GHz 频段内实现了 10 dB 以上的 RCS 缩减。上述成果利用算法均取得了比棋盘排列方式更优良的缩减性能。在各类算法中,GA 凭借其独特的选择、交叉与变异等机制,在迭代过程中能够进行高效的全局搜索,并能有效避免陷入局部最优解。然而,上述报道中超表面的 RCS 缩减量、缩减带宽以及频谱整体稳定性方面仍然有提升的空间。

综上,本文提出了一种基于 4 种 AMC 单元的 1 bit 编码超表面设计方法。将频段互补的两组 AMC 单元分别组成小阵列“1”与“2”,进而将这两种小阵列作为一阶基础单元,利用 GA 优化其排布,该方法在提升超表面编码自由度的同时,有效加速了算法的收敛进程。在优化算法设计方面,通过构建具有时变惩罚因子的复合适应度函数,实现了超表面 RCS 缩减性能的显著提升。

1 AMC 单元设计

本文设计了 4 种基于三层结构的 AMC 基础单元。各单元中间介质层均选用 F4B 材料(相对介电常数 $\epsilon_r=2.14$, 损耗角正切 $\tan \delta=0.0008$),其周期尺寸(P)为 6 mm、厚度(h)为 2 mm;除单元 4 上层没有贴片,其余单元上表面均为中心为圆形

槽的正方形贴片,其贴片长度及中心圆槽半径各不相同,所有单元底层均为完整金属背板,其三维结构如图1所示,优化后的尺寸如表1所示。

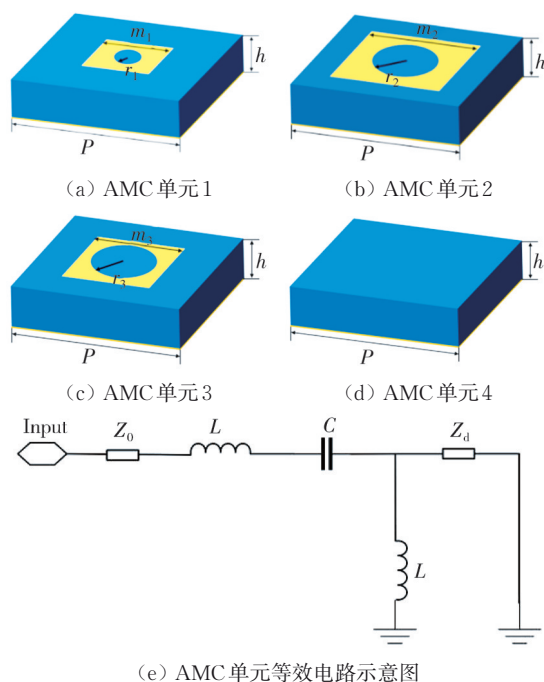


图1 AMC单元3D结构与等效电路示意图

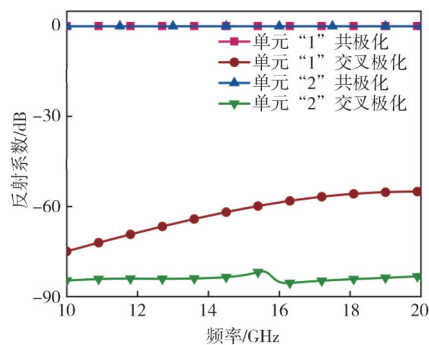
Fig. 1 Schematic diagram of 3D structure and equivalent circuit of AMC unit

表1 AMC单元几何参数

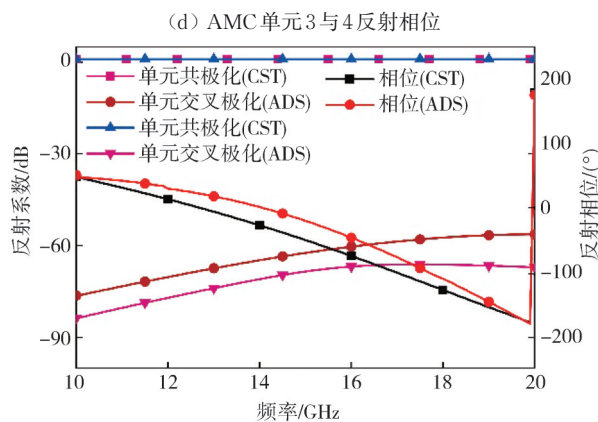
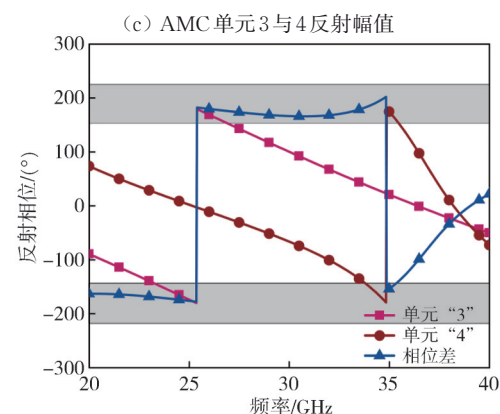
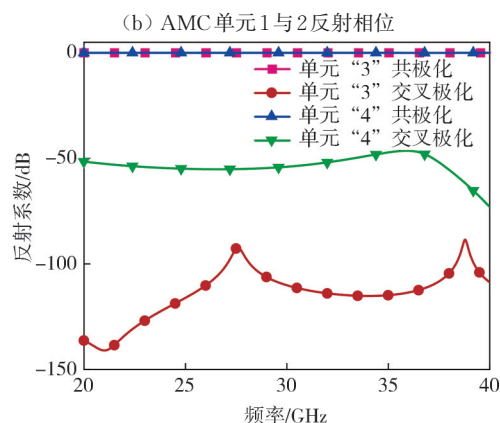
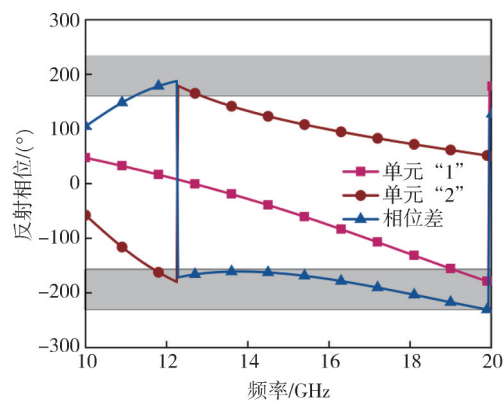
Tab. 1 Geometric parameters of AMC units

参数	r_1	r_2	r_3	m_1	m_2	m_3
取值/mm	0.5	1.5	1.5	3	5	4

图2展示了4种AMC单元的反反射幅值与相位随频率变化曲线。可以看出,单元1与2在10~18 GHz频段内呈现出优异的共极化反射特性,且二者反射相位差稳定在 $180^\circ \pm 37^\circ$ 范围内。此外,单元3与4在15~35 GHz超宽带范围内同样维持了高共极化反射特性与低交叉极化反射特性,其反射相位差同样维持在 $180^\circ \pm 37^\circ$ 范围内。这种特性为后续实现宽带RCS缩减提供了可靠的相位调控基础。



(a) AMC单元1与2反射幅值



(e) AMC单元1的等效电路计算结果同CST仿真的反射幅值与相位对比图

图2 AMC单元的反射系数

Fig. 2 Reflection coefficient of AMC units

该单元结构等效电路如图 1(e) 所示。其中, 电容 C 为方形贴片中间缝隙的等效电容, L 为金属贴片电感, Z_d 为介质基板等效成的特征阻抗, Z_0 为空气阻抗。分析对照结果如图 2(e) 所示, 可以看出, 在 10~20 GHz 频段内, 等效电路端口处的反射幅值与反射相位和 CST 仿真结果相近。

上述幅相特性表明, 两组 AMC 单元均在各自目标频段内满足相位相消条件。

如图 3 所示, 将单元 1 与 2 的 2×2 子阵列按棋盘格排布方式构成 AMC 阵列 A1, 以同样的方式排列单元 3 与 4 构成 AMC 阵列 A2。将这两组小阵列作为 1 阶基础阵列, 采用 GA 对其单元排布进行优化, 以实现宽带 RCS 缩减。

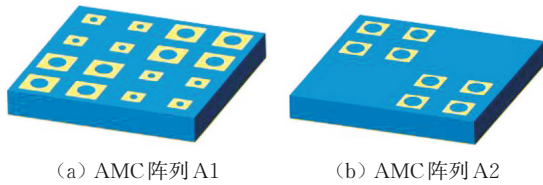


图 3 AMC 阵列 A1 与 A2 的 3D 结构示意图

Fig. 3 3D structural schematic of AMC array A1 and A2

2 GA 优化超表面排列

2.1 GA 优化

将上述阵列 A1 与 A2 分别作为二进制变量“0”和“1”, 通过 GA 优化其排布, 优化流程如图 4 所示。

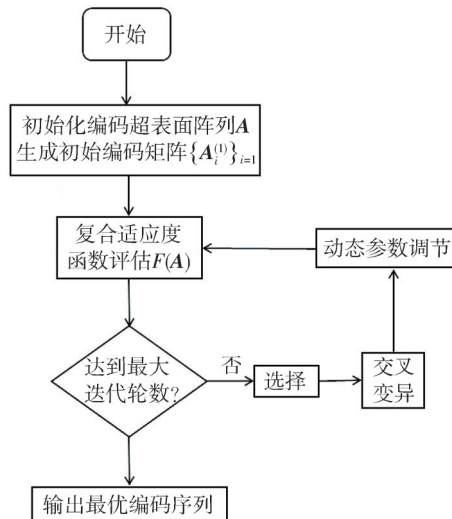


图 4 GA 优化超表面排列流程图

Fig. 4 Flowchart of GA for metasurface arrangement

首先, 随机生成二进制变量“0”与“1”的排列, 对应 6×6 的初始编码矩阵 A_0 , 初始种群由 $T=8$ 个编码矩阵构成。在每一代迭代中, 首先评

估所有个体的适应度, 选择适应度函数最高的个体作为父代个体。在下一轮迭代中, 将随机生成编码矩阵个体与该父代个体进行交叉, 以保留种群优势基因, 同时生成 6 个新个体以确保种群多样化。此外, 每个个体有 30% 的概率执行变异, 进而增加种群多样性, 扩展解空间搜索范围。

适应度函数的数学表达式为

$$F(A) = \frac{1}{\omega_1 \bar{\Delta}_{\text{RCS}} - \omega_2 \sigma_{\Delta} - \omega_3 R_{\Delta} - \lambda^{(t)} P(f)}, \quad (1)$$

式中: A 为二进制编码矩阵; 权重系数 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 取值分别为 1、0.5 和 0.5; $\bar{\Delta}_{\text{RCS}}$ 为频段内 RCS 缩减均值, 其计算公式为

$$\bar{\Delta}_{\text{RCS}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (RCS_{\text{PEC}}(f_i) - RCS_A(f_i)), \quad (2)$$

式中: M 为选取频率点的总个数; f_i 为选取的第 i 个频率点; $RCS_A(f_i)$ 为编码阵列 A 在第 i 个频率点处的 RCS 值; $RCS_{\text{PEC}}(f_i)$ 为理想导体 (Perfect Electric Conductor, PEC) 在第 i 个频率点处的 RCS 值。 σ_{Δ} 表示为频段内 RCS 缩减值的标准差, 其计算公式为

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (RCS_{\text{PEC}}(f_i) - RCS_A(f_i) - \bar{\Delta}_{\text{RCS}})^2}. \quad (3)$$

R_{Δ} 为目标频段内最大缩减值频率点与最小缩减值频率点的极差, 其计算公式为

$$R_{\Delta} = \max(RCS_{\text{PEC}}(f_i) - RCS_A(f_i)) - \min(RCS_{\text{PEC}}(f_i) - RCS_A(f_i)). \quad (4)$$

$\lambda^{(t)} P(f)$ 为动态惩罚项, 通过统计 10~40 GHz 频段内未达到 10 dB RCS 缩减要求的频点个数, 对适应度函数施加时变惩罚。其计算公式为

$$\lambda^{(t)} = \lambda_0 e^{\partial(t-1)}, \quad (5)$$

$$P(f) =$$

$$\sum_{i=1}^M \max[0, 10 - (RCS_{\text{PEC}}(f_i) - RCS_A(f_i))], \quad (6)$$

式中: λ_0 为初始权重, 取值为 1; ∂ 为增长系数, 取值为 0.3。根据上述搜索策略及适应度函数评估方法, 当编码阵列 A 同时满足 10~40 GHz 频段内 RCS 缩减算数平均值尽可能大, 整体频段内 RCS 缩减值的标准差尽可能小, 最大与最小缩减值的极差较小时, $F(A)$ 取得全局最小值, 表明该阵列为最优。

2.2 优化结果

图 5 为采用上述优化策略优化迭代后得到的最优编码超表面。

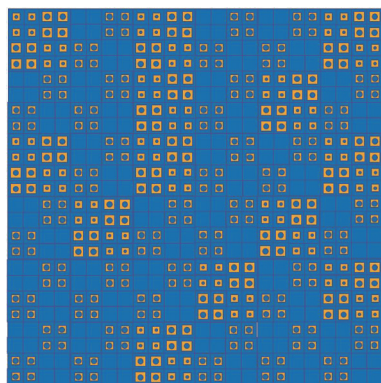
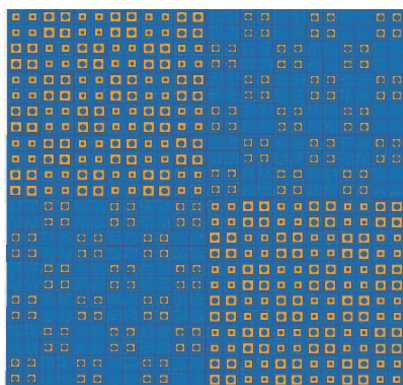


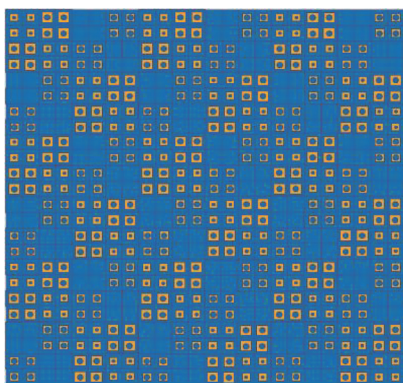
图5 优化后的编码超表面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of optimized coded metasurface

可以看出,阵列A1与A2的个数分别为13个与23个,并且其分布呈现随机特性。此外,为了验证优化排列的有效性,将AMC阵列A1与A2分别按规则排布与交错排布得到两款棋盘格超表面C1与C2,如图6所示,将其与同尺寸PEC共同作为对照组来验证该编码超表面的缩减性能。



(a) 棋盘阵列C1

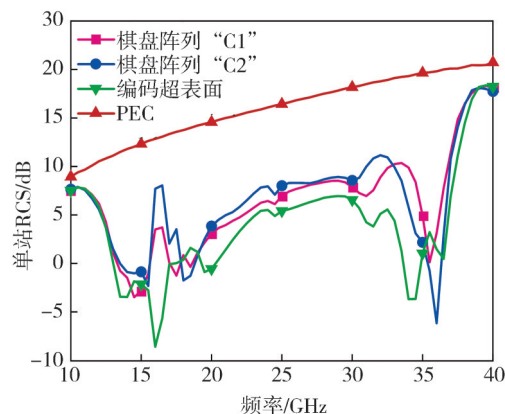


(b) 棋盘阵列C2

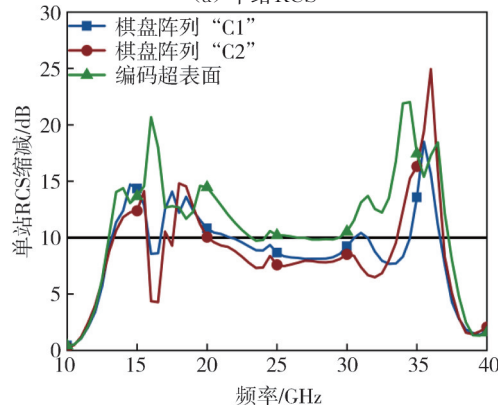
图6 棋盘阵列C1与C2的结构示意图

Fig. 6 Structural schematic diagrams of checkerboard arrays C1 and C2

利用CST仿真软件仿真得到该编码超表面的单站RCS缩减值,并将其与C1、C2的RCS缩减值进行比较,结果如图7所示。



(a) 单站RCS



(b) 单站RCS缩减

图7 编码超表面与棋盘阵列超表面的单站RCS及其缩减性能比较

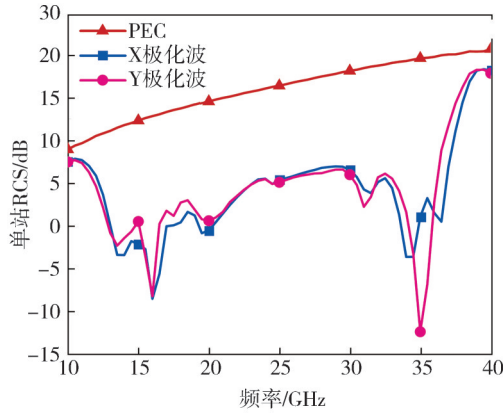
Fig. 7 Comparison of monostatic RCS and reduction between coded and checkerboard array metasurfaces

可以看出,优化的编码超表面在12.8~36.8 GHz频段具有超过10 dB的RCS缩减,相对带宽达到97%。与棋盘排列超表面相比,该编码超表面的RCS缩减带宽与缩减量均得到了大幅度提升,验证了该编码策略的有效性。

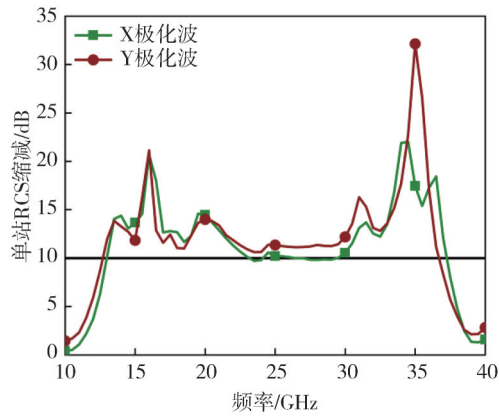
由于所设计的编码超表面基本单元均采用对称结构,理论上可以对不同极化状态的电磁波保持一致的相位响应特性。为了验证该特性,通过仿真得到了该编码超表面在X极化波与Y极化波垂直入射下的RCS缩减性能,结果如图8所示。可以看出,无论在X极化波还是Y极化波垂直入射下,该编码超表面均在12.8~36.8 GHz频段内实现超过10 dB RCS缩减,证实了其具有极化不敏感特性。

为进一步说明其RCS缩减性能,仿真了16 GHz频点处,同尺寸PEC、棋盘阵列超表面C1、棋盘阵列超表面C2以及编码超表面的三维远场方向图,如图9所示。仿真结果表明:PEC的三维散射场的主瓣能量集中,表明对入射的电磁波发生了镜面反射;棋盘阵列超表面C1与C2虽

然在一定程度上打破了 PEC 的强镜面反射模式,但其散射场内仍存在能量相对集中的区域。相比之下,算法优化后的编码超表面主瓣分散效果显著,表明编码优化序列实现了对电磁波散射能量的有效调控。

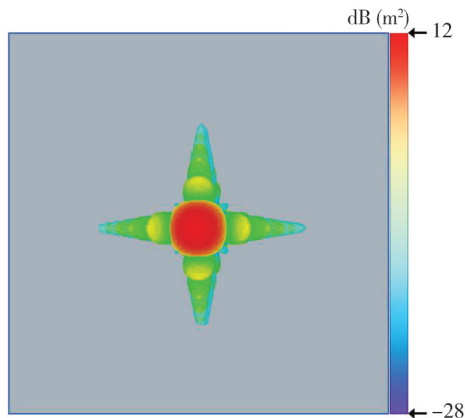


(a) 单站 RCS

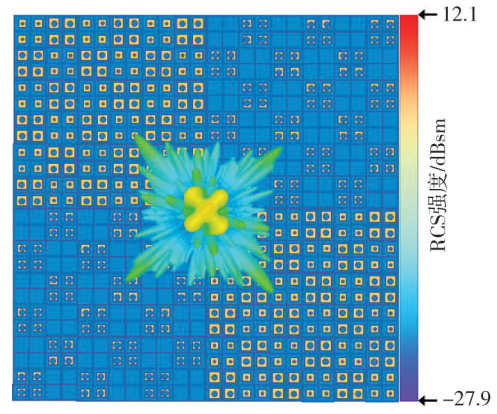


(b) 单站 RCS 缩减

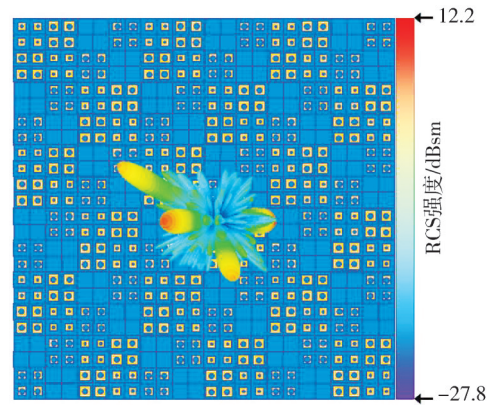
图 8 编码超表面在 X、Y 极化波垂直入射下的单站 RCS 缩减值
Fig. 8 Monostatic RCS reduction of coded metasurface under normal incidence of X- and Y-polarized waves



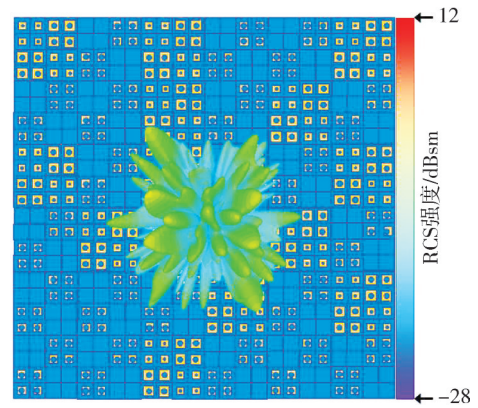
(a) PEC



(b) 棋盘阵列超表面 C1



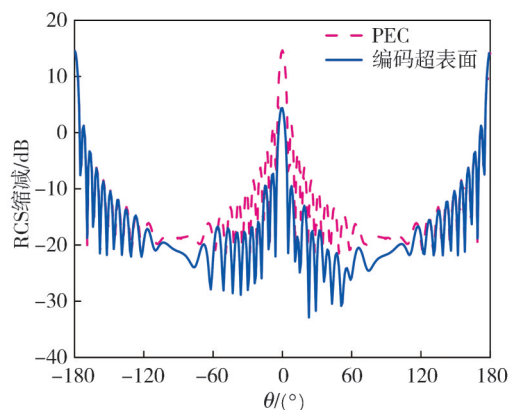
(c) 棋盘阵列超表面 C2



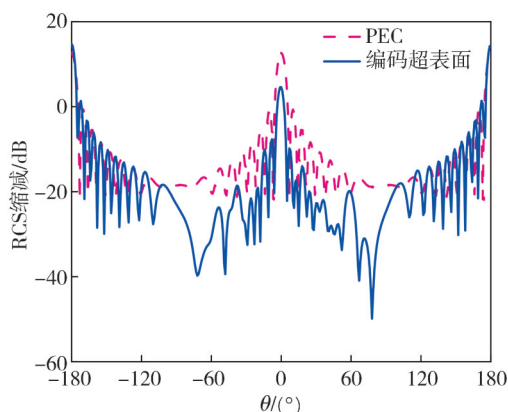
(d) 编码超表面

图 9 PEC 与棋盘阵列超表面以及编码超表面在 16 GHz 的三维远场方向图
Fig. 9 3-D far-field radiation patterns of PEC, checkerboard array metasurface, and coded metasurface at 16 GHz

图 10 为编码超表面与同尺寸 PEC 在 22 GHz 频点处在 X 极化波与 Y 极化波不同入射角下的二维散射曲线图。可以看出,编码超表面在 45° 入射角范围内均保持 10 dB 以上 RCS 缩减,具有角度不敏感特性。



(a) X极化波入射下



(b) Y极化波入射下

图 10 22 GHz处在X极化波与Y极化波斜入射时二维散射曲线图

Fig. 10 2D scattering curves of X-polarized and Y-polarized waves under oblique incidence at 22 GHz

3 结果与讨论

为验证该编码超表面设计的可行性与仿真结果的可靠性,采用平面印刷电路板技术加工所设计的编码超表面,实物如图 11 所示。

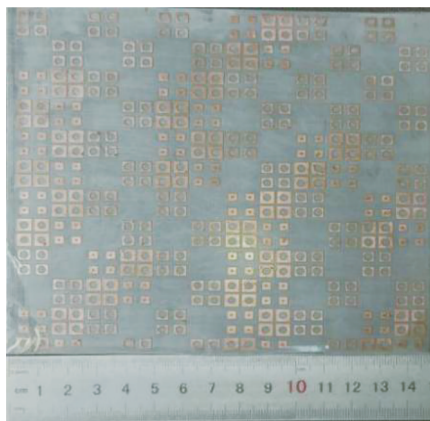


图 11 设计超表面样本图

Fig. 11 Designed metasurface sample figure

在微波暗室环境下,利用扫频步长为1 MHz的Keysight N5230A 矢量网络分析仪,以及型号为LB-20180-SF、LB-51-15-C-SF、LB-34-15-C-SF 3种测试频段互补的喇叭天线测试了超表面的RCS,测试环境如图 12 所示,结果如图 13 所示。可以看出,该超表面的仿真与实测结果吻合较好,在12~37 GHz内实现了10 dB以上 RCS缩减,验证了设计方法的可行性与该超表面结构的有效性。需要说明的是,在高频段处观察到的偏差主要源于加工公差以及全开放测试环境中的噪声与反射。针对这些问题,可以通过以下两个方向进行优化改进:在制备工艺方面,采用更高精度的印制电路板加工技术以严格控制超表面图案尺寸;在测试环境方面,适当增加吸波材料的覆盖范围,从而有效抑制环境反射带来的测试误差。

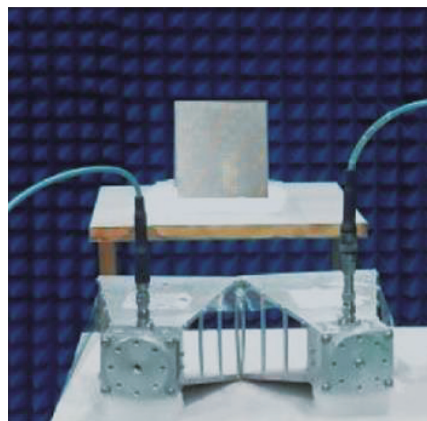


图 12 测试环境

Fig. 12 Testing environment

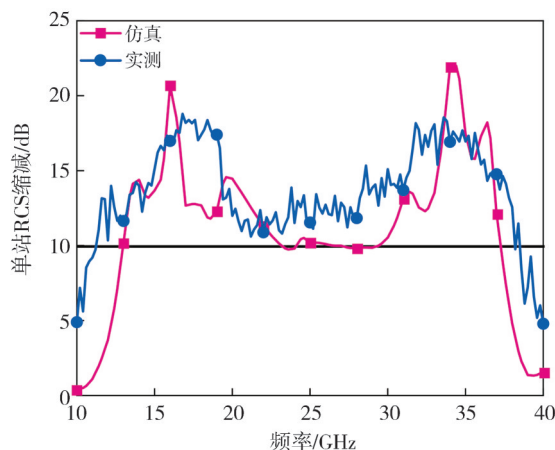


图 13 仿真与实测单站 RCS 缩减对比

Fig. 13 Simulation and measurement comparison of RCS reduction

将本文提出的编码超表面与参考文献中的超表面性能进行比较,如表 2 所示,其中, λ_0 为中心频率处对应的波长。

表 2 超表面性能对比

Tab. 2 Metasurface performance comparison

来源文献	单元	厚度/ λ_0	中心频率/GHz	排布方式	10 dB 缩减带宽/GHz	相对带宽/%	极化不敏感	角度稳定性/(°)
[8]	AMC	0.13	28	WCA	15.5~26.5; 30.5~40.5	80	是	无
[9]	PCM	0.13	14.3	GA	9.26~12.87; 14.84~19.35	54	是	无
[11]	PCM	0.12	17.5	Random	13~22	51.4	否	无
[13]	AMC	0.075	15	SA	10.5~19.5	60	是	45
[14]	PCM	0.08	16	GA	9.37~22.79	83.5	是	45
[15]	Plasma	0.11	13.2	GA	5.5~20.8	116	是	45
[16]	AMC	0.187	18.7	BPSO	6.4~31	132	是	45
[17]	AMC	0.078	12	APS-PSO	5.8~18.3	107.8	是	无
本文	AMC	0.15	24.8	GA	12.8~36.8	97	是	45

可以看出,与文献[8]、[9]、[11]、[13]、[14]、[17]中超表面相比,本文所设计的超表面在缩减带宽、极化不敏感性与角度稳定性上兼具优势;与文献[15-16]相比,本文所设计的超表面在缩减带宽上虽然略有不足,但文献[15]中提出的基于等离子体的超表面并无实测验证,文献[16]中提出的超表面因其基本单元厚度不同,从而大大增加了其加工的复杂程度。

与文献[8]中所采用的DWCA、文献[14-15]的传统GA、文献[16]的PSO相比,本文方法在传统GA的基础上引入动态惩罚因子,并设置复合适应度函数,能更精细地引导搜索方向,有效避免了过早陷入局部最优解,算法收敛速度更快。

综上可得,本文所设计的超表面与现有研究相比,提升了缩减带宽,设计与加工相对简单,较低的剖面使得超表面具备了轻量化、易于集成的优势,制作成本较低,扩展了其应用范围。

4 结 论

本文提出了一种基于GA的低RCS编码超表面。通过设计4种AMC基础单元,将其两两组合形成目标频段互补的两组复合阵列,采用GA优化阵列排布,实现了超宽带宽角度RCS缩减效果。该方法在保证较高自由度的同时大大降低了设计复杂程度,并提升了算法收敛速度。优化得到的超表面总体尺寸为144 mm×144 mm×2 mm。仿真与实测均表明,该超表面在12.8~36.8 GHz的超宽频段内实现了10 dB以上的RCS缩减,并且在X与Y极化波入射下均保持良好的缩减特性。这种兼具小型化、低剖面与极化稳定性的超表面在电磁隐身领域具有较广泛的应用场景。

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] 欧阳鑫,陈星.超宽带低RCS人工磁导体棋盘阵列设计[J].信息技术与信息化,2025(4):95-98.
OUYANG Xin, CHEN Xing. Design of an ultra-wideband low-RCS artificial magnetic conductor checkerboard array[J]. Information Technology and Informatization, 2025(4): 95-98. (in Chinese)
- [2] CHANG Q, HU D, WANG Y, et al. Design of RCS measurement system based on hardgating[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2013, 4(2): 123-127.
- [3] HUANG Z, LUO Z, ZHAO Y, et al. Tapered resistive sheets and FSS absorber loading for the wideband RCS reduction of the elliptic surface at TM polarization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(7): 6191-6195.
- [4] SINGH K, AFZAL M U, LALBAKSHI A, et al. Reflecting phase-gradient metasurface for radar cross section reduction[C]//2021 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2021: 344-346.
- [5] IRIARTE GALARREGUI J C, TELLECHEA PEREDA A, DE FALCÓN J L M, et al. Broadband radar cross-section reduction using AMC technology[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(12): 6136-6143.
- [6] ZHAO Z, LI X, DONG G. Wideband RCS reduction based on hybrid checkerboard metasurface[J]. Sensors, 2023, 23(8): 4054.
- [7] SAIFULLAH S, YASIR Y, WAQAS W. 4-bit optimized coding metasurface for wideband RCS reduction[J]. IEEE Access, 2019, 7: 122378-122386.

- [8] YASIR Saifullah, 杨国敏, 徐丰. 四叶草形超宽带漫散射编码超表面[J]. 雷达学报(中英文), 2021, 10(3): 382-390.
- YASIR Saifullah, YANG Guomin, XU Feng. A four-leaf clover-shaped coding metasurface for ultra-wideband diffusion-like scattering [J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 382-390. (in Chinese)
- [9] FU C, HAN L, LIU C, et al. Combining pancharatnam-berry phase and conformal coding metasurface for dual-band RCS reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 70(3): 2352-2357.
- [10] LU Y, SU J, LIU J, et al. Ultrawideband monostatic and bistatic RCS reductions for both copolarization and cross polarization based on polarization conversion and destructive interference [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(7): 4936-4941.
- [11] TAHER AL-NUAIMI M K, HUANG G L. RCS reduction using 2-bit coding metasurface with anisotropic unit cell and random phase distribuin [C]//2022 IEEE 10th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 2022: 1-2.
- [12] SHAN H, JIANG K, XING J, et al. BPSO and staggered triangle layout optimization for wideband RCS reduction of pixelate checkerboard metasurface [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 70(7): 3406-3414.
- [13] CHEN J, WEI Y, ZHAO Y, et al. Transparent and broadband diffusion metasurface with high transparency and high shielding effectiveness using metallic mesh [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(7): 5574-5583.
- [14] REN Z, LIU Y Q, WANG Y, et al. Ultra-broadband RCS reduction based on optimized coding “whale-shaped” polarization conversion metasurface with angular stability [J]. IEEE Access, 2022, 10: 50479-50486.
- [15] LIU X, LI C, DONG G, et al. Wideband radar cross section reduction of a coding metasurface combined with an inhomogeneous plasma [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2024, 52(5): 1661-1668.
- [16] WU G, YU W, LIN T, et al. Ultra-wideband RCS reduction based on non-planar coding diffusive metasurface[J]. Materials, 2020, 13(21): 4773.
- [17] LIU G, LIU J, ZHAO S, et al. Ultra-wideband low-detectable coding metasurface [J]. Chinese Journal of Electronics, 2019, 28(6): 1265-1270.