

基于相位控制超构表面的 OAM 阵列天线 RCS 减缩研究

李思佳¹, 陈可可¹, 高择朋¹, 李金果², 李卓越¹, 韩博文³

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 93154 部队, 甘肃酒泉, 735305;
3. 93107 部队, 沈阳, 110141)

摘要 设计了一款基于相位控制超构表面的低雷达散射截面(RCS)轨道角动量(OAM)阵列天线, 该天线由四元缝隙耦合微带天线组成, 通过馈电网络为各单元馈送幅度值相等, 相位值依次为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 的激励, 实现了 1 模态的 OAM 辐射效果。根据相位相消减缩 RCS 的原理, 以 2 种人工磁导体单元为基础, 构建了超构表面, 以棋盘布阵的形式加载到阵列天线周围, 实现了天线 RCS 的有效减缩。仿真结果表明: 阵列天线的工作带宽为 4.22~5.16 GHz, 增益为 8.91 dBi; 阵列天线在 5.3~7.0 GHz 实现了 8 dB 的 RCS 减缩, 在 5.35~6.05 GHz 实现了 10 dB 的 RCS 减缩。

关键词 OAM; 阵列天线; 雷达散射截面; 人工磁导体; 超构表面

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.03.001

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)03-0002-08

An OAM Array Antenna Based on Phase Controlling Metasurface

LI Sijia¹, CHEN Keke¹, GAO Zepeng¹, LI Jinguo², LI Zhuoyue¹, HAN Bowen³

(1. Information and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Unit 93154, Jiuquan 735305, Gansu, China; 3. Unit 93107, Shenyang 110141, China)

Abstract A low RCS (radar cross section) 2×2 OAM (orbital angular momentum) array antenna is designed based on the phase controlling metasurface. The array antenna is composed of four aperture coupled micro-strip antennas, and a feeding network with same amplitude and the phase values of 0° , 90° , 180° , and 270° for different ports, realizing the OAM radiation effect of mode 1. According to the principle of phase cancellation to reduce RCS, a meta-surface is constructed based on two units of artificial magnetic conductor with around the array antenna being loaded in the form of a checkerboard array, realizing effective reduction of antenna RCS. The simulated results show that the operating bandwidth of the array antenna is from 4.22 GHz to 5.16 GHz, and the gain is 8.91 dBi. The array antenna achieves the reduction of 8 dB RCS from 5.3 GHz to 7.0 GHz, and the reduction of 10 dB RCS from 5.35 GHz to 6.05 GHz.

Key words OAM; array antenna; radar cross section; feeding network; metasurface

随着无线通信事业的快速发展, 人类已经进入时延低、功耗低、可靠性高的 5G 时代。5G 移动通信技术的出现显著提升了通信速度和通信质量, 实现了互联网与物联网的互联互通。但是, 伴随着通

收稿日期: 2022-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(61701523, 61801508)

作者简介: 李思佳(1987-), 男, 陕西西安人, 副教授, 研究方向为超构表面设计与隐身天线。E-mail: lsj051@126.com

引用格式: 李思佳, 陈可可, 高择朋, 等. 基于相位控制超构表面的 OAM 阵列天线 RCS 减缩研究[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(3): 2-9.
LI Sijia, CHEN Keke, GAO Zepeng, et al. An OAM Array Antenna Based on Phase Controlling Metasurface[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(3): 2-9.

信系统技术的进一步发展,频谱资源越发短缺,成为阻碍技术升级的绊脚石。为此,不少学者和专家就如何拓宽信道容量进行了相关研究,轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 技术便是其中之一。2010 年 MOHAMMADI S M 等人将激光束的旋转相位和轨道角动量的最新发现应用于无线电频率^[1],并对无线电 OAM 系统进行了综合模拟,实验表明传统的天线方向图优化方法可以应用于 OAM 生成的圆形阵列天线,以增强其方向性。2017 年 LIU B Y 等人提出了一种宽带双极化双 OAM 模式天线^[2],该天线阵列由宽带双极化蝶形偶极子阵列和宽带相移馈电网络组成,用于从 2 个天线产生 OAM 的 ± 1 模态。OAM 技术基于所携带不同模态值之间的正交性,可以实现多路信号在不同轨道同时传输,进而有效地解决频率资源紧张问题,实现信道容量的拓宽^[3-5]。

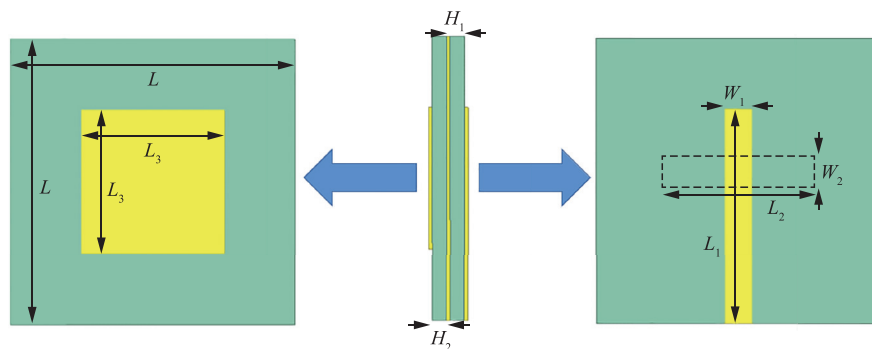
与此同时,随着电子战与信息战飞速发展,各式探测技术手段不断更新进步,军事装备的隐身性能要求也越来越高。在飞行器机载设备中,天线是总雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 的主要贡献者之一,因此需要采取有效方法措施减小天线 RCS。2007 年 PAQUAY M 等人首次提出将人工磁导体 (artificial magnetic conductor, AMC) 用于降低 RCS^[6],设计了一种用于 RCS 减缩的 AMC 结构,实现在宽带内实现明显的 RCS 减缩。2017 年 SU J X 等人以编码的形式组成超材料加载到阵列天线周围^[7],该超材料表面结构紧凑,易于共形,可

广泛应用于其他隐身平台。降低 RCS 以实现隐身性能在战争中的重要性愈发凸显,近几年,RCS 减缩研究在我国通信领域掀起高潮,如何降低 RCS 也是当前各国的研究热点^[8-11]。综合现有研究可以看出,已有的隐身天线通常都是对线极化、圆极化或者双极化天线 RCS 的减缩,关于 OAM 阵列天线 RCS 减缩的隐身技术鲜有报道。因此开展基于相位控制超构表面的 OAM 阵列天线 RCS 减缩研究具有明显的创新性。

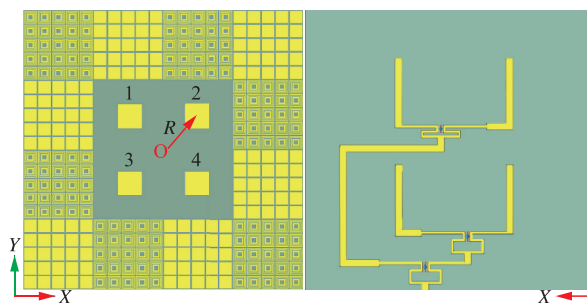
1 天线模型

微带是由双导线演变的结果,将无限薄的金属板放在双导线中央,根据镜像原理,产生的场型与单导线时一致,故将一侧导线演变成了带状。微带天线一般为 3 层结构,中间层为介质基板,下层以金属板作为接地面,上层叠加一定形状用以产生特定波束的金属贴片,通过微带线为天线单元馈送激励。微带天线具有低剖面、易共形、易集成等优势,在现代天线研究和应用中最广泛。

设计的天线以如图 1(a) 所示的缝隙耦合微带天线为基础,天线单元的参数见表 1,通过均匀圆阵列 (uniform circular array, UCA) 方式,以 R 为半径排列组成四元 OAM 阵列天线,见图 1(b),加载图 1(c) 所示的馈电网络以馈送控制相位的激励,加载超构表面以实现天线的 RCS 减缩。



(a) 缝隙耦合微带天线单元结构



(b) 加载超构表面

(c) 加载馈电网络

图 1 天线模型

表1 缝隙耦合微带天线参数

| 参数 | L | L_1 | L_2 | L_3 | W_1 | W_2 | W_3 | H_1 | H_2 |
|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 尺寸/mm | 45 | 28.7 | 9.5 | 16.3 | 3.1 | 1.6 | 16.3 | 1 | 3 |

1.1 阵列天线组阵原理

电磁波偏转角在旋转一周之后波前相位改变量 $\Delta\varphi$ 与阵元数目 N 、模态 l 之间的关系为^[1]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi l}{N} \quad (1)$$

理论上,阵列天线的天线单元数量越多时,所能产生 OAM 波束的模态种类越多^[12]:

$$-\frac{N}{2} < l_{\max} < \frac{N}{2} \quad (2)$$

根据阵列天线组阵方法和 OAM 技术的有关理论,将 4 个尺寸、材质、性能、朝向等完全相同的天线单元,等角度间隔以 UCA 形式分布,取 $l=1$,则 $\Delta\varphi=90^\circ$,排列半径为 R ,构建成四元 OAM 阵列天线,如图 1(b)所示。阵列天线组阵时,分别取不同的半

径 R 值,为阵列天线各个端口馈送幅度值相等、相位值依次为 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 的激励,结果发现四元 OAM 阵列天线以半径 $R=0.6\lambda$ 进行组阵时,能实呈现较好的 OAM 效果,故确定排列半径 $R=0.6\lambda$ 。

1.2 馈电网络

根据传输线理论,构建馈电网络见图 2。馈电网络的各条线长度根据阵列位置和不同相位要求来确定,两类不同的线宽具体为 $P_1=3.1\text{ mm}$, $P_2=1.22\text{ mm}$,隔离电阻为 $100\ \Omega$ 。该馈电网络可以实现 4 个端口幅度值相等,两相邻端口相位差为 90° 。仿真结果如图 3 所示, $f=5\text{ GHz}$ 附近 port2~port5 的幅度值基本相等, port2~port3, port4~port5, port5~port2 相位差为 90° , port3~port4 相位差为 270° (等效为 90°),即基于馈电网络实现 port2~port5 相邻两端口之间相位差均为 90° 。

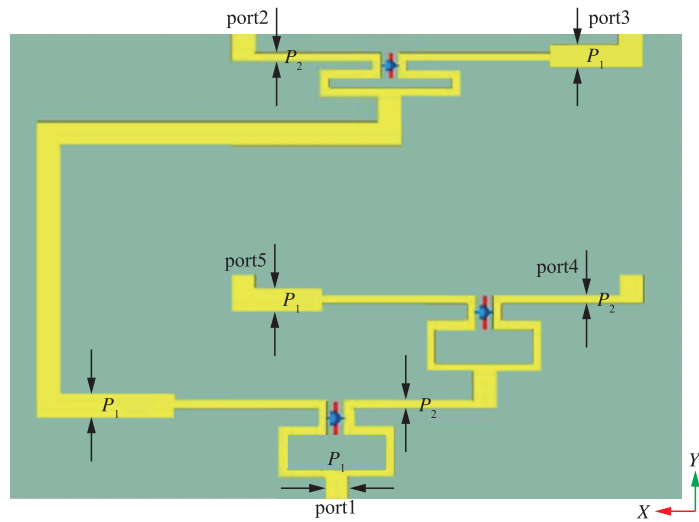


图2 馈电网络模型

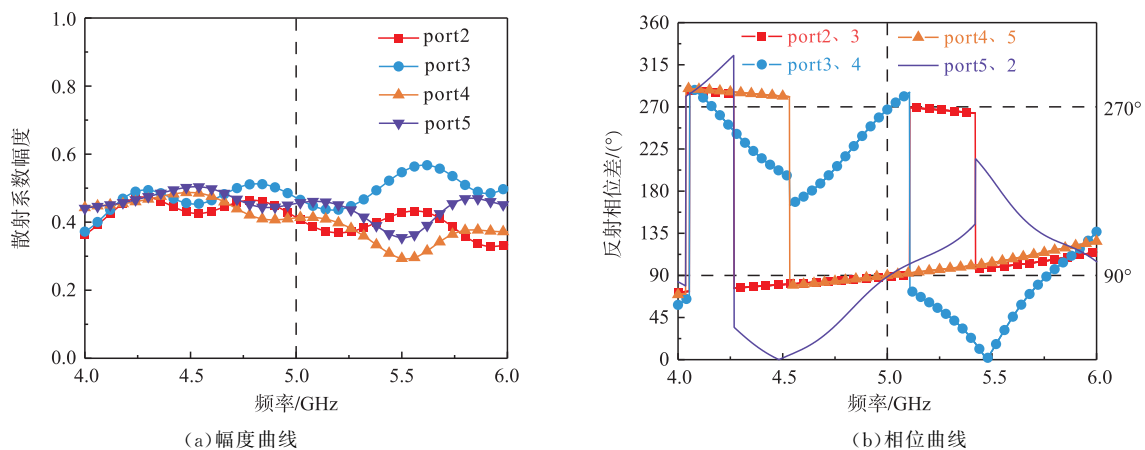


图3 馈电网络模型性能曲线

1.3 超构表面

为解决天线组阵后其雷达散射截面增大的问题,引入超构表面以实现 RCS 减缩^[13-18]。首先设计 2 种

AMC 单元,如图 4 所示,2 种 AMC 单元以金属板作为接地面,贴片材质均为金属铜,介质板材质均为 Rogers RT5880。2 种 AMC 单元的参数见表 2。

2 种 AMC 单元反射相位及相位差见图 5。理论上,当 2 种 AMC 单元产生的反射相位差为 $143^\circ \sim 217^\circ$,对应的 RCS 减缩量在 10 dB 及以上时^[18],可产生明显的相位相消效果,实现较好的散射抑制性能。工程上一般取 2 种 AMC 单元实现相位相消对应的反射相位差为 $150^\circ \sim 210^\circ$ 。

如图 6 所示,将 2 种 AMC 单元以棋盘结构的形式排列,超构表面在 4~7 GHz 产生不同程度的 RCS 减缩效果, $f=5.5$ GHz 处 RCS 减缩效果最明显,最大减缩量为 18 dB,与 2 种 AMC 单元实现相位相消时对应的频段相比,基本无频偏。最终确定将 2 种 AMC 单元各自 5×5 组阵,以棋盘结构形式构建超构表面,用于阵列天线的 RCS 减缩。

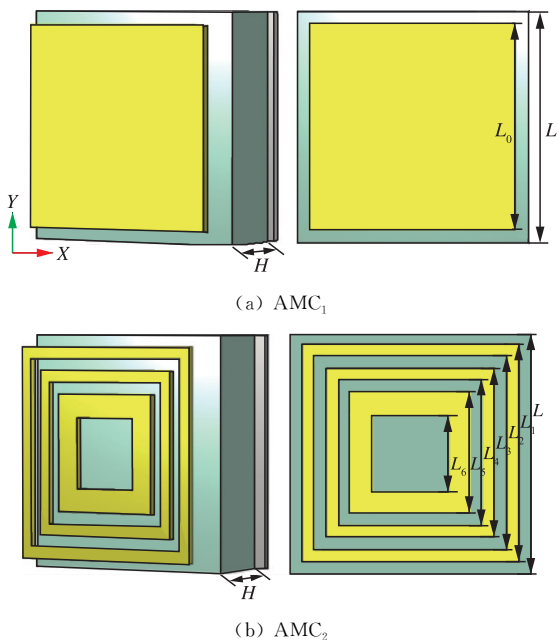
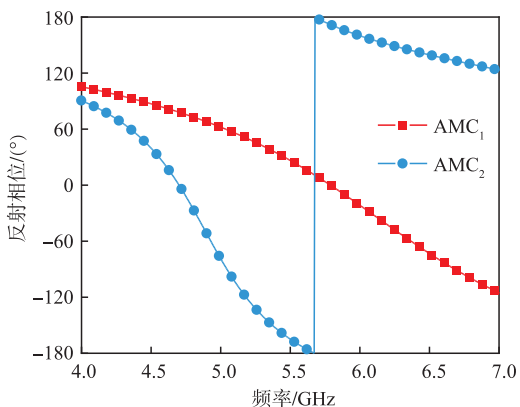


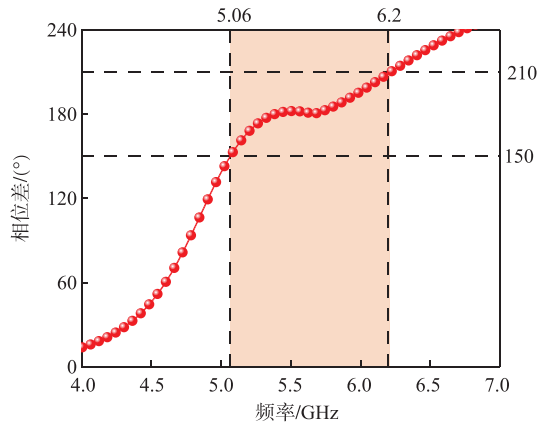
图 4 2 种人工磁导体结构图

表 2 2 种 AMC 单元相关参数

| 参数 | L | L_0 | L_1 | L_2 | L_3 | L_4 | L_5 | L_6 | H |
|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 尺寸/mm | 10 | 8.8 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 3 | 3 |

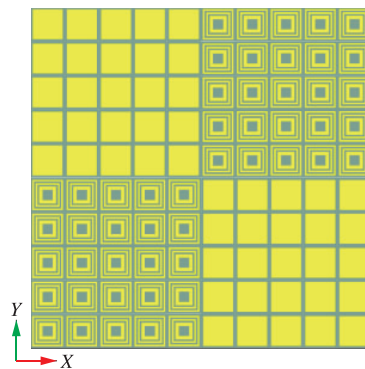


(a) 2 个 AMC 单元反射相位曲线

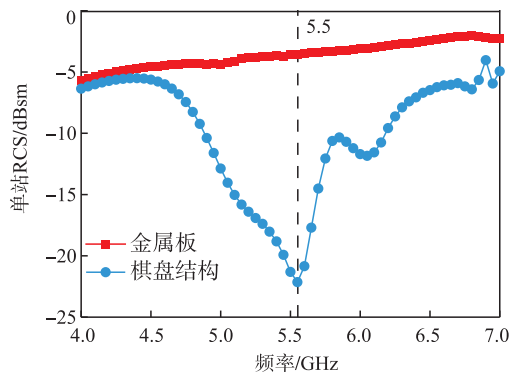


(b) 反射相位差

图 5 2 种人工磁导体结构图



(a) 超构表面



(b) 超构表面的性能曲线

图 6 超构表面模型及性能曲线

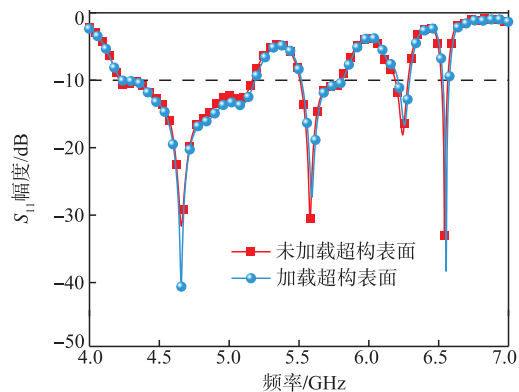
2 天线性能

2.1 辐射性能

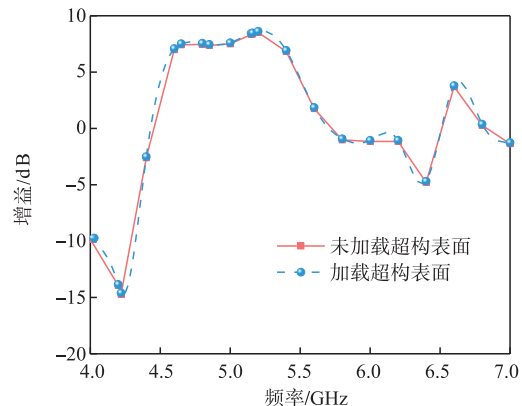
将超构表面与馈电网络加载到四元 OAM 阵列天线上,仿真结果见图 7,阵列天线带宽为 0.94 GHz(4.22~5.16 GHz), $f=5$ GHz 处回波损耗值约为 -13 dB。图 7(a)为加载超构表面前后的反射曲线,图 7(b)为天线阵列的增益曲线,阵列天线加载超构表面前后,对应的 2 条反射曲线基本重合。图 7(c)~图 7(e)为 4.8 GHz、5.0 GHz、5.16 GHz 时天线的三维方向图,从左至右分别为主极化相位分布,主极化幅度分布和交叉极化幅度分布。从

OAM 三维波束的辐射和相位分布结果可以看出：在 4.75~5.16 GHz 阵列天线三维方向图呈现明显的 OAM 效果，同时其交叉极化分量很小，即表明加

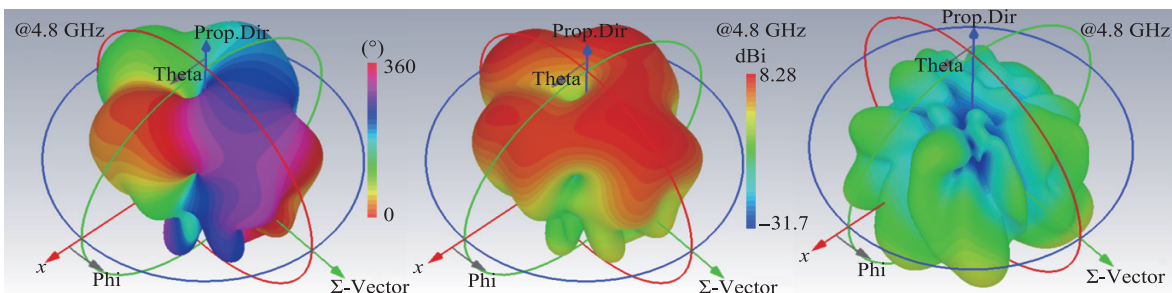
载超构表面几乎没有对原四元 OAM 阵列天线的辐射特性产生影响。



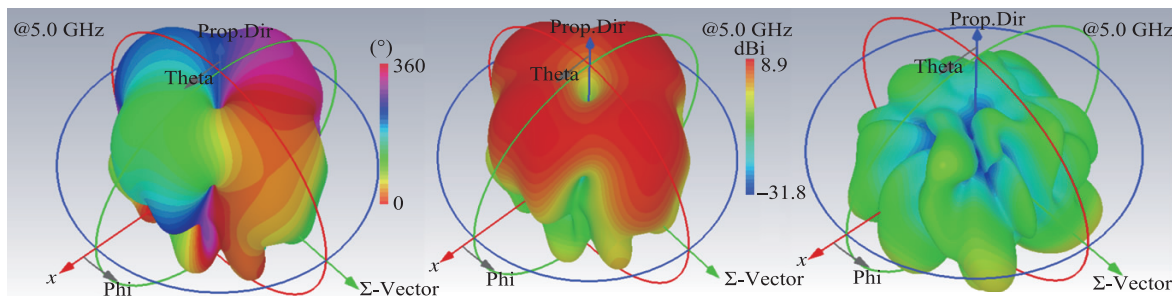
(a) 加载超构表面前后的反射曲线



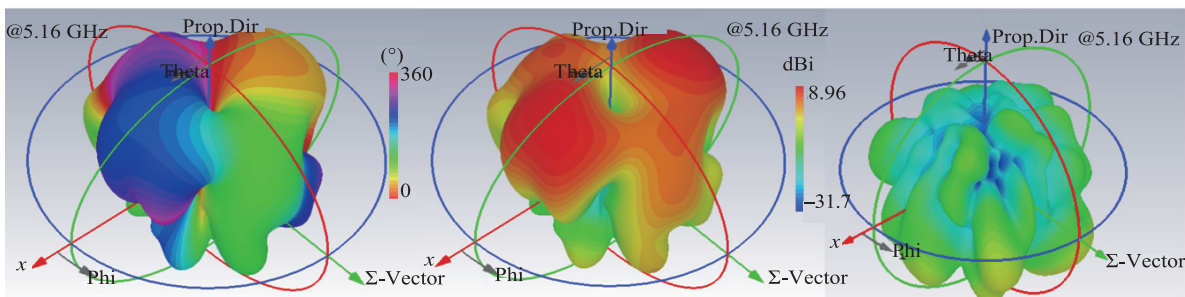
(b) 阵列天线增益曲线



(c) 4.8 GHz 时天线三维方向图



(d) 5.0 GHz 时天线三维方向图



(e) 5.16 GHz 时天线三维方向图

图 7 阵列天线辐射性能

2.2 散射性能

为图 1 所示的模型施加垂直入射 X 极化、Y 极化平面电磁波激励，仿真结果见图 8。施加 X 极化平面电磁波时，阵列天线在 5.1~7.0 GHz 范围内产生不同程度的单站 RCS 减缩效果，5.3~7.0 GHz 范围内实现 8 dB 的 RCS 减缩，5.35~6.05 GHz 范围内实现 10 dB 的 RCS 减缩， $f=5.4$ GHz 和 $f=5.95$ GHz

处 RCS 减缩效果最明显，RCS 减缩量分别为 11.4 dB 和 21.8 dB。施加 Y 极化平面电磁波时，阵列天线在 4.5~7.0 GHz 范围内产生不同程度的单站 RCS 减缩效果，5.2~7.0 GHz 范围内实现 8 dB 的 RCS 减缩，5.25~6.05 GHz 范围内实现 10 dB 的 RCS 减缩， $f=5.4$ GHz 和 $f=5.95$ GHz 处 RCS 减缩效果最明显，减缩量分别为 16.1 dB 和 21.7 dB。

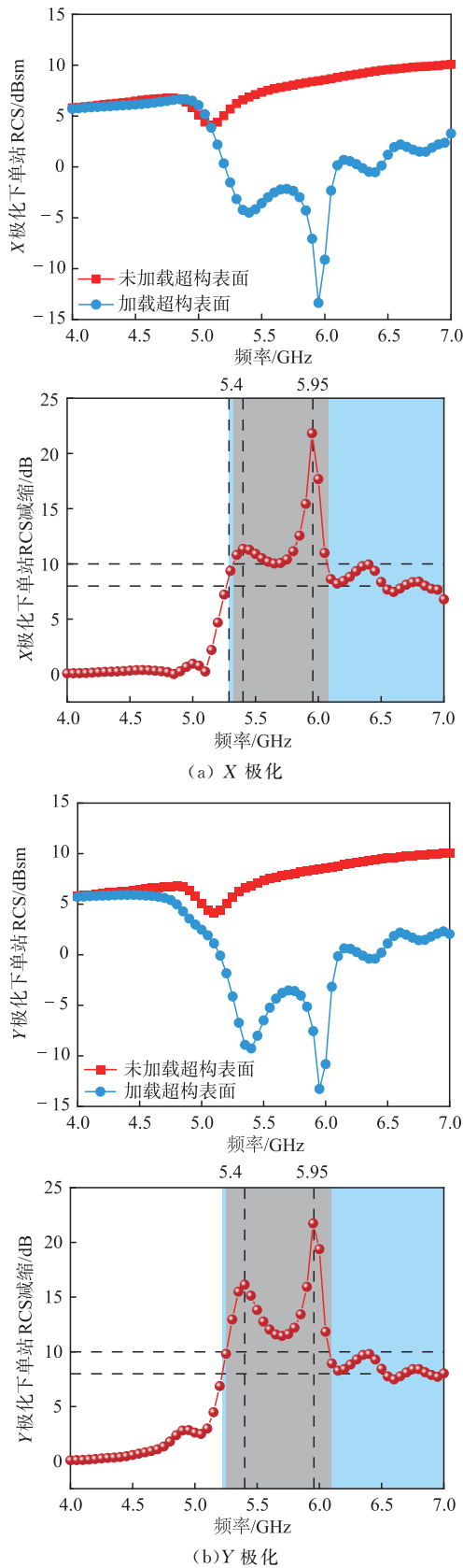


图 8 不同极化方式下单站 RCS 减缩曲线

进一步分析不同频率处双站 RCS 减缩情况, 由图 9 所示, 为阵列天线施加垂直入射 X 极化平面电磁波激励时, $-55^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 角度范围内可实现明显的双站 RCS 减缩。 $\theta = 0^{\circ}$ 时, $f = 5.4$ GHz 处的减缩量为 11.4 dB, $f = 5.95$ GHz 处的减缩量为 21.8 dB。 为阵

列天线施加垂直入射 Y 极化平面电磁波激励时, 在 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 角度范围内基本实现较明显的双站 RCS 减缩。 $\theta = 0^{\circ}$ 时, $f = 5.4$ GHz 处的减缩量为 16.7 dB, $f = 5.95$ GHz 处的减缩量为 21.6 dB。 双站 RCS 减缩结果与同条件单站 RCS 减缩基本相同, 加载超构表面的阵列天线可以实现明显 RCS 减缩效果。

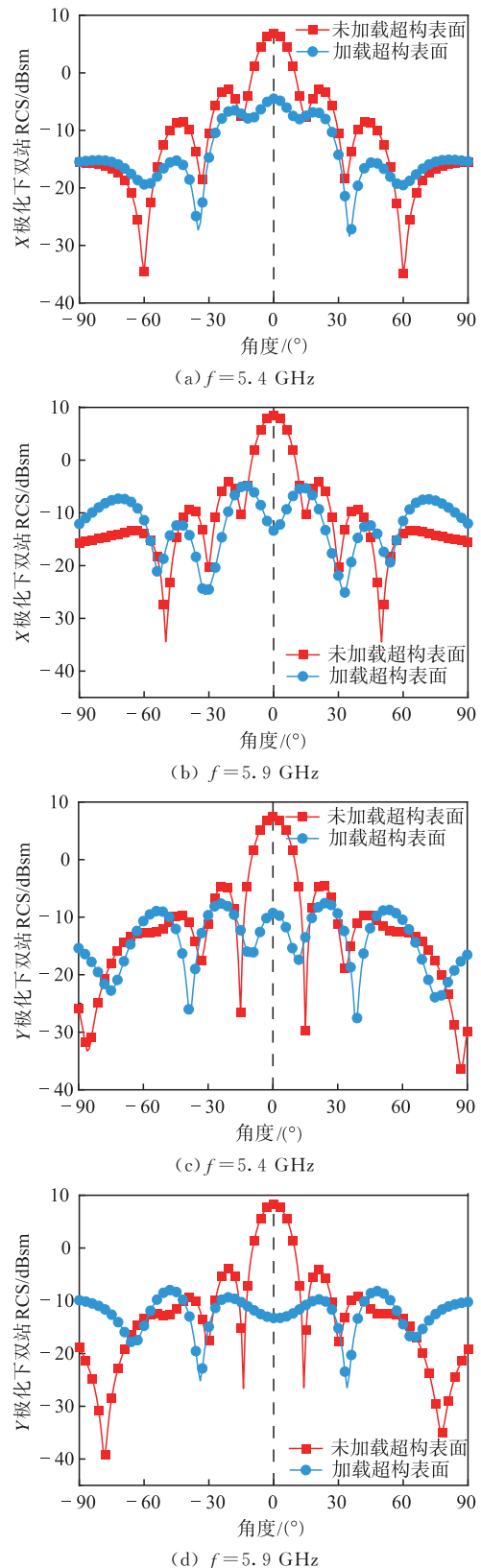
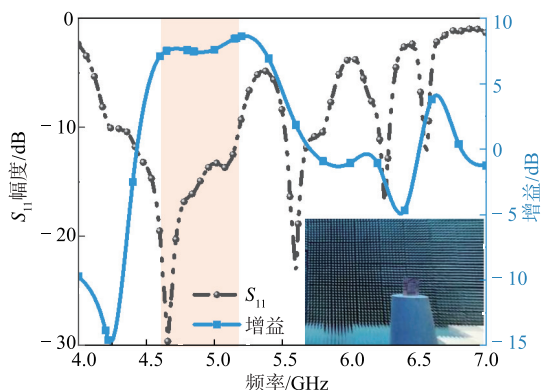


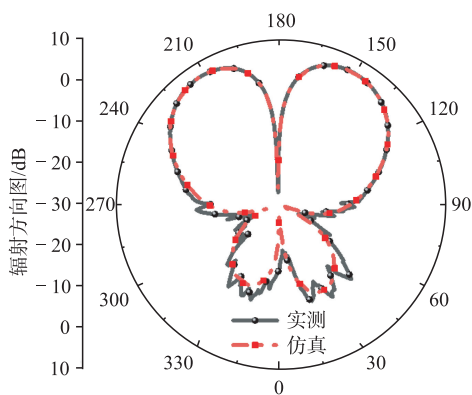
图 9 双站 RCS 减缩曲线

2.3 测试分析

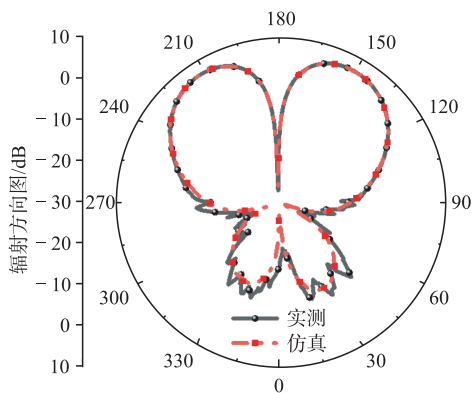
为验证设计的基于相位控制超构表面的 OAM 阵列天线辐射和散射性能,加工制作了样件并进行了测试,如图 10 所示。



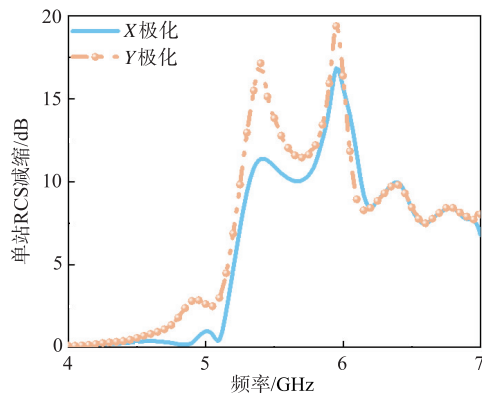
(a) 测试的 S_{11} 幅度和增益曲线



(b) 仿真和测试的 xoz 面方向图



(c) 仿真和测试的 $yo z$ 面方向图



(d) 测试的 RCS 减缩曲线

图 10 OAM 阵列天线测试结果

从测试结果可以看出,天线样件在 4.6~5.2 GHz 范围反射小于 -10 dB,且在该范围得增益大于 8 dB;从图 10(b)和图 10(c)的方向图对比结果可以看出,仿真与测试的一致性较好,天线阵列形成了 OAM 的锥形波束;测试的 RCS 减缩结果表明设计的基于相位控制超构表面的 OAM 阵列天线具有明显的 RCS 减缩效果。

3 结语

本文首先设计了工作于 5 GHz 的缝隙耦合微带天线,将 4 个天线单元以半径 $R=0.6\lambda$ 排列组成四元 OAM 阵列天线,产生较好的 OAM 波束。其次设计一款基于相位控制的馈电网络,实现对阵列天线各单元馈送幅度值相等,相位值依次为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 的激励,实现了 1 模态的 OAM 辐射效果。最后设计了 2 种 AMC 单元,各自 5×5 组阵后,以棋盘结构形式组成超构表面加载到阵列天线周围,可在 5.3~7.0 GHz 基本实现 8 dB 的 RCS 减缩,在 5.35~6.05 GHz 实现 10 dB 的 RCS 减缩。该天线可有效缓解信道容量受限问题并且具有隐身性能,在多个领域具有广泛的应用价值。

参考文献

- [1] MOHAMMADI S M, DALDORFF L K S, BERGMAN J E S, et al. Orbital Angular Momentum in Radio—A System Study[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(2): 565-572.
- [2] LIU B Y, CUI Y H, LI R L. A Broadband Dual-Polarized Dual-OAM-Mode Antenna Array for OAM Communication [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 744-747.
- [3] 唐杰,李凯,林楚婷,等. OAM-MIMO 通信系统的信道容量研究[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(6): 27-35.
- [4] 余超. 平面 OAM 天线特性研究及设计分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [5] 赵林军,张海林,刘乃安. 涡旋电磁波无线通信技术的研究进展[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(11): 3075-3085.
- [6] 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.
- [7] SU J X, KONG C Y, LI Z R, et al. Wideband Diffuse Scattering and RCS Reduction of Microstrip Antenna Array Based on Coding Metasurface[J]. Electronics Letters, 2017, 53(16): 1088-1090.

- [8] PAN W B, HUANG C, CHEN P, et al. A Low-RCS and High-Gain Partially Reflecting Surface Antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(2): 945-949.
- [9] LI W Q, CAO X Y, GAO J, et al. Broadband RCS Reduction and Gain Enhancement Microstrip Antenna Using Shared Aperture Artificial Composite Material Based on Quasi-Fractal Tree [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2016, 10(4): 370-377.
- [10] RAJESH N, MALATHI K, RAJU S, et al. Design of Vivaldi Antenna with Wideband Radar Cross Section Reduction [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 2102-2105.
- [11] JIA Y T, LIU Y, GONG S X, et al. A Low-RCS and High-Gain Circularly Polarized Antenna with a Low Profile [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2477-2480.
- [12] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M J, et al. Free-Space Information Transfer Using Light Beams Carrying Orbital Angular Momentum [J]. Optics Express, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [13] 周禹龙, 曹祥玉, 高军, 等. 双频率选择表面及其在微带天线宽带 RCS 减缩中的应用 [J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1446-1451.
- [14] CONG L L, CAO X Y, SONG T, et al. Ultra-Wideband Low Radar Cross-Section Metasurface and Its Application on Waveguide Slot Antenna Array [J]. Chinese Physics B, 2018, 27(11): 470-475.
- [15] 吉地辽日, 曹祥玉, 高军. 具有超宽带 RCS 减缩特性的天线设计 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41(1): 115-122.
- [16] 李培, 刘颖, 李鹏, 等. 基于极化旋转超表面的天线 RCS 减缩方法 [J]. 电子信息对抗技术, 2021, 36(5): 84-89.
- [17] 冯奎胜, 李娜, 杨欢欢. 电磁超构表面与天线结构一体化的低 RCS 阵列 [J]. 物理学报, 2021, 70(19): 80-88.
- [18] 王成, 王星, 李思佳, 等. 基于双层介质 AMC 的宽带隐身超表面 [J]. 现代雷达, 2021, 43(4): 52-58.

(编辑:徐楠楠)