

# 一种具有高口径效率和可重构散射特性的 圆极化天线阵列设计方法

王鹏飞<sup>1</sup>, 胡文研<sup>2</sup>, 贾永涛<sup>1\*</sup>, 张家豪<sup>1</sup>, 史 港<sup>1</sup>, 刘 英<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学雷达探测感知全国重点实验室, 陕西西安 710071; 2. 北京机电工程总体设计部, 北京 100854)

**摘 要:** 本文提出了一种具备高口径效率与可重构散射特性的圆极化天线阵列设计方法. 首先, 基于 p-i-n 二极管设计了一种可重构天线单元, 在保持圆极化辐射特性稳定的前提下, 实现了相位差 180° 的两种散射状态切换. 其次, 通过创新性地采用馈电结构重叠设计, 显著减少了单元中二极管的使用数量, 从而提升了辐射性能. 最终, 基于该单元构建了 2 × 8 圆极化相控阵, 其在 9.4 GHz 工作频率下实现了 14.6 dBic 的增益和 86.5% 的口径效率. 此外, 该阵列的辐射波束可在 ±45° 范围内扫描, 同时其散射波束能在 ±32° 范围内有效调控, 且不影响圆极化辐射特性的稳定. 实测与仿真结果的高度一致性验证了设计方法的有效性.

**关键词:** 雷达散射截面; 可重构散射特性; 圆极化; 天线阵列; 高口径效率

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No.62171339, No.62271366, No.62401435)

**中图分类号:** TN821

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2025)08-2729-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20250233

## A Design Method for Circularly Polarized Antenna Arrays with High Aperture Efficiency and Reconfigurable Scattering Characteristics

WANG Peng-fei<sup>1</sup>, HU Wen-yan<sup>2</sup>, JIA Yong-tao<sup>1\*</sup>, ZHANG Jia-hao<sup>1</sup>, SHI Gang<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Radar Detection and Sensing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. System Design Institute of Mechanical-Electrical Engineering, Beijing 100854, China)

**Abstract:** A design method for circularly polarized antenna arrays featuring high aperture efficiency and reconfigurable scattering characteristics is proposed. Firstly, a reconfigurable antenna element is constructed using p-i-n diodes, which achieves two scattering states with a phase difference of 180° while maintaining stable circularly polarized radiation characteristics. Secondly, by innovatively adopting an overlapping feeding structure design, the number of diodes used in the antenna element is significantly reduced, effectively improving the radiation performance. Finally, a 2 × 8 circularly polarized phased array is constructed based on this element, achieving a gain of 14.6 dBic and an aperture efficiency of 86.5% at 9.4 GHz. Additionally, the radiation beam of the array can be scanned within a range of ±45°, and its scattering beam can be effectively adjusted within a range of ±32° without compromising the stability of its circularly polarized radiation characteristics. The high consistency between the measured and simulation results verifies the effectiveness of the proposed design method.

**Key words:** radar cross section; reconfigurable scattering characteristics; circularly polarized; antenna array; high aperture efficiency

**Foundation Item(s):** National Natural Science Foundation of China (No.62171339, No.62271366, No.62401435)

## 1 引言

天线作为低可观测平台中关键的电磁波收发前端,其固有的强散射特性显著影响平台隐身性能<sup>[1]</sup>. 随

着卫星通信、遥感探测及电子战等技术的快速发展,圆极化天线的应用不断扩大,技术需求持续增长. 因此,研究圆极化天线雷达散射截面 (Radar Cross Section,

RCS)减缩技术具有重要应用价值。

目前,圆极化天线的 RCS 减缩技术主要分为加载吸波器<sup>[2-5]</sup>和对消技术<sup>[6-24]</sup>两类。然而,传统低散射天线一旦制造完成,其散射特性便固定不变,且隐身角域受限。随着组网雷达等新型反隐身技术的快速发展,这些散射特性固化的天线正面临严峻挑战。因此,开展具有可重构散射特性的天线设计尤为重要。然而,当前研究主要集中于线极化天线的散射重构设计,针对圆极化天线的探索仍显不足。

例如,文献[25]提出了一种线极化天线阵列,通过调整数字天线单元实现了散射波束的定向操控。文献[26]设计了一种基于有源超表面的线极化法布里-珀罗(Fabry-Pérot, F-P)天线,将有源超表面与 F-P 谐振腔一体化设计,在提升天线增益的同时实现了散射波在 $\pm 40^\circ$ 范围内的连续调控。文献[27]利用天线辐射与散射特性差异,设计了一种基于二极管的散射重构天线单元,基于该单元构建的线极化阵列可在 $\pm 60^\circ$ 范围内灵活调控散射波束,且辐射性能保持稳定。文献[28]提出了一种散射波束可调的圆极化天线阵列,通过调整单元状态实现了 3 种散射编码状态,同时保持了稳定的圆极化性能。然而,该设计因集成大量二极管及其他器件,导致口径效率降低。此外,该天线存在一定的功能局限:辐射波束缺乏动态扫描能力;散射波束仅能生成多波束,无法产生单波束,限制了潜在应用场景。更为关键的是,该研究缺乏系统性的天线散射重构设计方法,导致技术路径缺乏明确的指导框架。

为突破现有技术局限,本研究提出了一种新型圆极化天线阵列设计方法,可兼具高口径效率和可重构散射特性。该阵列在 9.4 GHz 频率下实现了 14.6 dBic 的增益,口径效率达 86.5%。此外,其辐射波束可在 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 范围内有效扫描,同时散射波束可在 $\pm 32^\circ$ 范围内灵活调控,且不影响辐射特性的稳定性。该研究为圆极化天线散射特性重构技术提供了新的设计思路,并构建了系统的设计框架,推动了该领域技术的快速发展。

## 2 天线单元设计

### 2.1 散射特性可重构圆极化天线单元设计方法

设计散射波束可重构天线阵列的核心在于构建具有不同散射特性的可重构天线单元。根据文献[25]和文献[27],该单元需满足两个关键条件:(1)在不同工作状态下具有相似的辐射特性,以确保阵列在不同配置中均能保持稳定的辐射性能;(2)在不同状态下呈现相反的反射特性,这是实现散射重构的基础。

本文提出了一种圆极化天线散射特性可重构单元的系统设计思路(见图 1),具体步骤如下。

(1)超表面选型。选取具备相位调控能力的超表

面,如开口谐振环(Split Ring Resonators, SRR)。通过调整 SRR 的长度  $l$  与开口缝隙宽度  $w$ ,实现  $x$  和  $y$  极化入射波间  $180^\circ$  的反射相位差。

(2)馈电激励。通过在适当位置添加馈电结构,实现对结构的有效激励。本设计借鉴了在弯曲金属结构末端加载馈电结构来设计圆极化天线的方法<sup>[29,30]</sup>,将馈电结构置于 SRR 开口缝隙旁,使非辐射单元转变为圆极化天线单元。必须注意,不同类型超表面的最佳馈电位置可能有所差异,例如极化转换超表面结构需对角放置<sup>[21,24]</sup>。

(3)旋转。将天线单元逆时针旋转  $90^\circ$ ,使其开口方向由  $x$  轴转变为  $y$  轴方向。

(4)重叠。将两个开口方向不同的天线单元进行堆叠。

(5)保留与移除。保留重叠区域,移除未重叠区域,形成双开口谐振环(Double-Splits Ring Resonant, DSRR)结构。

(6)放置二极管。在 DSRR 的两个开口缝隙处分别放置二极管。通过控制二极管的通与断,可调整 SRR 的开口方向,实现反射相位的调控。与二极管状态对应,两个馈电引脚仅有一个被激励,另一个处于非工作状态。

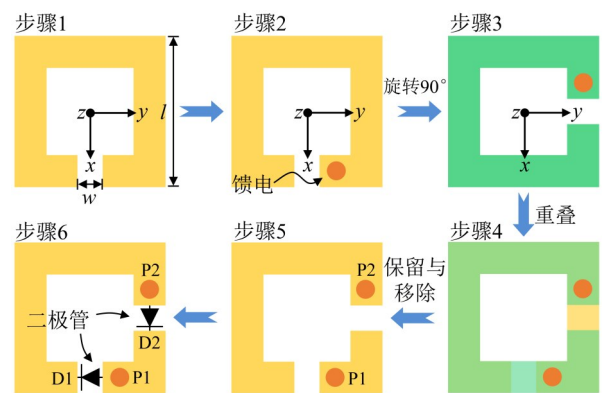


图 1 具有反射相位重构特性的圆极化天线单元设计步骤

至此,具备反射相位可重构特性的圆极化天线单元设计完成。该单元有两种状态:当二极管 2 导通且馈电引脚 1 被激励时,单元处于状态“0”;当二极管 1 导通且馈电引脚 2 被激励时,单元处于状态“1”,如图 2 所示。

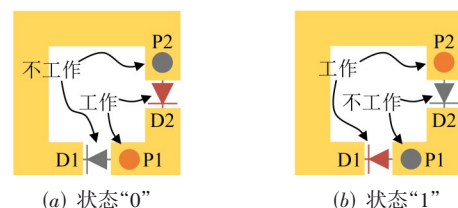


图 2 两种状态下二极管设置

为深入分析该天线单元的重构机制,可对其结构进行理想化处理:二极管导通时视为理想导体,断开时移除;非激励的馈电引脚进行隐藏处理.经处理后,不同状态下天线单元的理想结构恰好与图1中步骤2、步骤3一致.在这两幅图中,天线单元的开口朝向正交,使得在相同极化入射波照射下,两个天线单元产生 $180^\circ$ 的反射相位差.此外,状态“1”单元可视为状态“0”单元旋转 $90^\circ$ 所得,因此两者具有相同的辐射特性.这些特性满足可重构散射特性设计的核心条件:反射特性相反和辐射特性一致.

需要特别指出,本文所提出的设计方法具有广泛的适用性,不仅限于SRR超表面,还可有效应用于其他具备相位调控能力的超表面.

### 2.2 天线单元结构设计

文献[28]中的可重构天线单元采用双馈电结构,需引入额外的“馈电选择电路”以实现馈电切换,显著增加了结构复杂度,且因二极管等器件数量增多而降低了效率.为此,本研究重点对馈电结构进行优化,将原本分离的双馈结构重叠于中心位置,如图3所示.经此改进,仅需单一馈电即可实现馈电切换,无需额外馈电选择电路,显著简化了天线结构,减少了二极管使用数量,有望大幅提升口径效率.

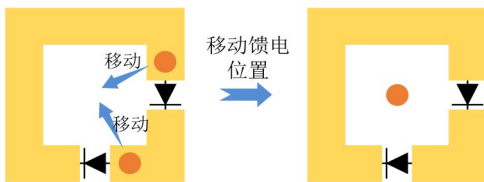


图3 馈电重叠设计

图4展示了所设计的可重构圆极化天线单元结构,采用3层金属层和2层介质基板,并集成4个二极管(MACOM MADP-000907-14020,编号1~4)及5个电感.二极管导通时等效为 $30\text{ pF}$ 电感与 $5.2\ \Omega$ 电阻的串联,断开时等效为 $30\text{ pH}$ 电感与 $25\text{ fF}$ 电容的串联.介质基板采用F4B材料,其相对介电常数 $\epsilon_r=2.65$ ,损耗角正切 $\tan\delta=0.004$ ,厚度分别为 $2.4\text{ mm}$ 和 $0.5\text{ mm}$ .其余结构参数详见表1.

该单元顶部辐射贴片由宽度为 $w_1$ 的金属环和位于中心的多边形金属片组成.金属环有两个间隙,分别放置2号和4号二极管;1号和3号二极管跨接于金属环与多边形金属片之间.相较于文献[28],本设计采用中心馈电结构,无需额外馈电选择电路,将二极管数量减少一半以上.

为控制二极管的状态,设计了3组偏置电路(偏置线1、2、3),其布局见图4.其中,偏置线1和偏置线2通过电感连接至顶部金属环,并经由金属化通孔延伸至单元底部;偏置线3通过电感与多边形金属片相连,并

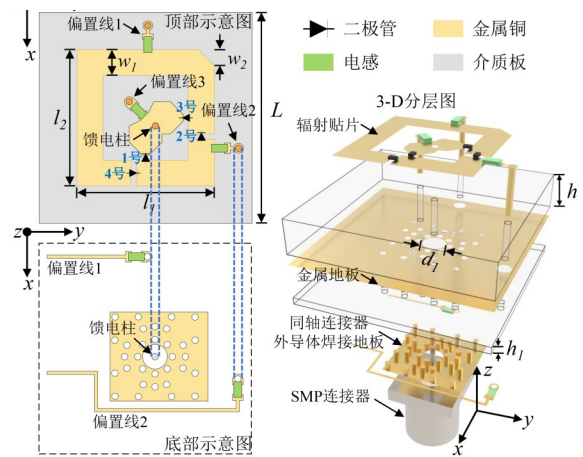


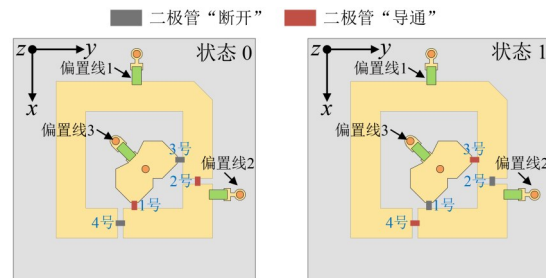
图4 天线单元结构

表1 天线单元结构参数 单位:mm

参数	值	参数	值
$L$	13	$l_2$	8.4
$h$	2.4	$w_1$	1.6
$h_1$	0.5	$w_2$	1
$l_1$	8.4	$d_1$	1.52

采用盲孔连接至金属地.

所设计的圆极化可重构天线单元具有两种工作状态,分别定义为状态“0”和状态“1”,如图5所示.图中黑色表示二极管断开,红色表示导通.在状态“0”,二极管1和2导通,二极管3和4断开;在状态“1”,二极管1和2断开,二极管3和4导通.二极管的工作状态通过外部偏置电压控制,其中偏置线3始终保持 $0\text{ V}$ 电位.当偏置线1施加负电压且偏置线2施加正电压时,天线单元处于状态“0”;当偏置线1施加正电压且偏置线2施加负电压时,单元切换至状态“1”.



(a) 状态“0” (b) 状态“1”  
图5 天线单元在两种状态中的二极管配置情况

### 2.3 天线单元辐射特性

为验证阵列环境中单元的辐射特性,采用周期边界进行仿真分析.图6展示了所设计天线单元的 $|S_{11}|$ 与轴比特性.在状态“0”, $|S_{11}|$ 小于 $-10\text{ dB}$ 的带宽为 $8.0\sim 10.5\text{ GHz}$ ;状态“1”下,带宽略收窄至 $8.1\sim 10.5\text{ GHz}$ .此外,状态“0”和“1”下的 $3\text{ dB}$ 轴比带宽分别为 $8.9\sim 9.6\text{ GHz}$

和 8.7~9.6 GHz. 结果表明,该天线单元在两种重构状态下有着相似工作带宽和圆极化特性.

图 7 展示了天线单元在周期边界条件下,于 9.2 GHz 在不同工作状态的增益方向图仿真结果. 各状态辐射方向图基本一致,表明可重构天线单元具有稳定的辐射特性,确保了阵列在不同编码配置下的辐射性能一致性. 图 8(a) 对比了天线单元增益与理想增益 ( $4\pi A_p/\lambda^2$ ,  $A_p$  为物理面积). 结果显示,所设计天线单元在 9.2 GHz 附近的增益仅比理想值低约 0.5 dB,表现出良好的增益性能.

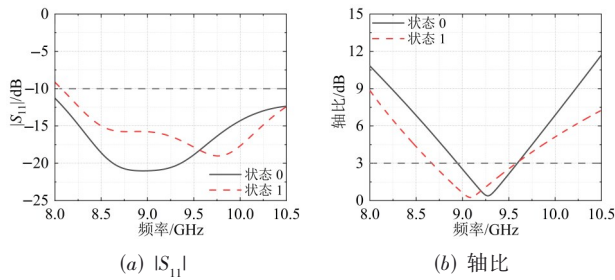


图 6 天线单元在两种状态下的  $|S_{11}|$  与轴比

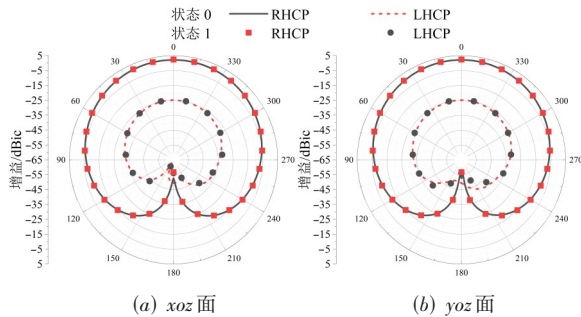


图 7 周期边界条件下天线单元在 9.2 GHz 的增益方向图仿真结果

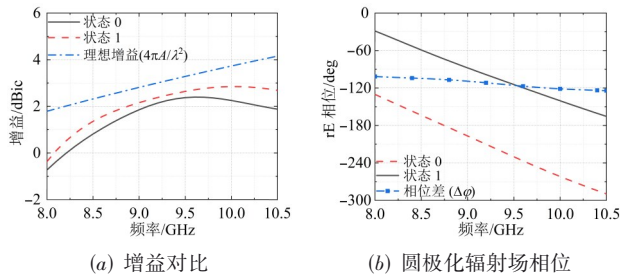


图 8 天线单元在两种状态下的辐射特性

为深入探究天线单元的圆极化辐射机理,以状态“0”为例对其表面电流分布开展仿真分析. 图 9 显示,当  $\omega t=0^\circ$  时,总电流指向  $-x$  轴;  $\omega t=90^\circ$  时,电流偏转至  $-y$  轴;当  $\omega t=180^\circ$  时,电流指向  $+x$  轴;当  $\omega t=270^\circ$  时,电流指向  $+y$  轴. 电流方向随时间呈逆时针旋转,表明天线单元辐射右旋圆极化波. 同理,状态“1”也具备右旋圆极化辐射能力. 图 8(b) 对比了两种状态下右旋圆极化辐射

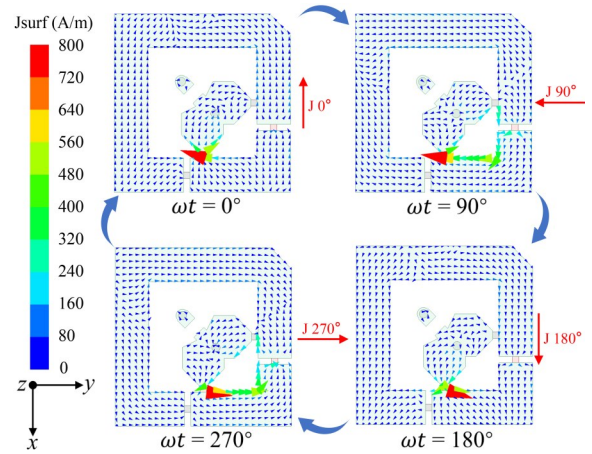


图 9 状态“0”单元的表面电流分布

场在同一时刻的相位特性,结果表明两者存在约  $100^\circ$  的相位差. 因此,在构建圆极化天线阵时,需对天线单元进行相位补偿,以确保在不同编码状态下均能实现良好的辐射性能.

### 2.4 天线单元散射重构特性

为研究天线阵列的散射特性调控机制,对天线单元处在“0”和“1”状态的反射特性进行仿真分析. 采用周期性边界条件,顶面设为 Floquet 端口,天线馈电端接  $50 \Omega$  匹配负载.

图 10 展示了设计天线单元在不同极化波垂直入射时的反射特性. 其中,图 10(a) 和图 10(c) 分别对比了  $x$  和  $y$  极化入射波下“0”和“1”状态的反射幅度. 结果表明,在 9.2 GHz 附近,天线单元在两种状态下的反射幅度完全相等. 图 10(b) 和图 10(d) 则分别呈现了  $x$  与  $y$  极化波下的反射相位对比. 在 8.6~10 GHz 频率范围内,“0”和“1”状态间的相位差可维持在  $180^\circ \pm 37^\circ$  范围内.

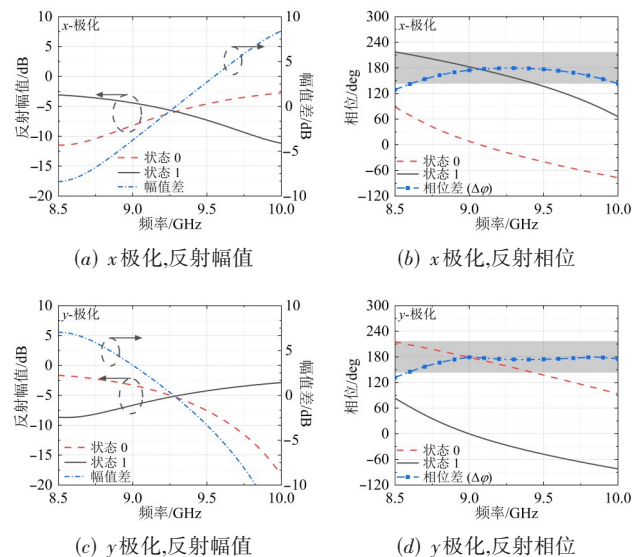


图 10 不同状态天线单元在  $x$  或  $y$  极化波下的反射幅度和相位特性

### 3 天线阵列设计

#### 3.1 天线阵列结构和工作原理

图 11 展示了设计相控阵天线结构,该阵列由 16 个可重构天线单元组成,编号 1~16. 每 4 个天线单元构成一个  $2 \times 2$  天线子阵,以确保良好的反射相位特性. 阵列两端各设有 4 个四引脚插针,每个天线单元的偏置线均连接至对应引脚,并与外部电压模块相接. 如图 11(b), 天线阵列背面设有金属方片,通过盲孔与金属地连接. 由于偏置线 3 始终接 0 V 电压,金属片仅需接电源负极即可实现该偏置. 该设计共集成 64 个 p-i-n 二极管和 80 个电感器,相较于文献[28]中的阵列设计,器件数量减少了近 1/3.

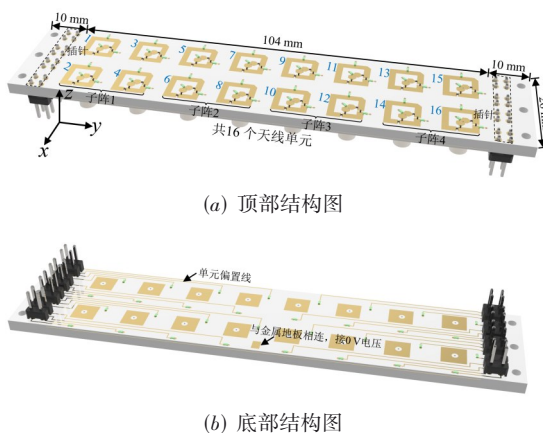


图 11 设计天线阵列结构示意图

图 12 展示了天线阵列在 4 种不同编码下的相位分布情况,分别对应编码“1”~“4”. 图中绿色和黄色分别表示处于“0”状态和“1”状态的天线单元. 具体编码分布如下:编码“1”时,所有单元均处于“0”状态;编码“2”时,子阵 1、2 维持“0”状态,子阵 3、4 切换至“1”状态;编码“3”时,子阵 1、4 保持“0”状态,子阵 2、3 转为“1”状态;编码“4”时,子阵 1、3 处于“0”状态,子阵 2、4 处于“1”状态. 通过调整阵列单元的工作状态,可有效改变阵列表面反射相位的分布,从而实现散射波束的动态调控.

为验证仿真结果的准确性,对所设计的天线阵列进行了加工与实测. 图 13 为天线阵列的实物图,其整体尺寸为  $124 \text{ mm} \times 26 \text{ mm} \times 2.9 \text{ mm}$ . 图中绿色区域为阻焊层,用于保护非焊接区域的线路及基材.

#### 3.2 天线阵列辐射特性

基于前文分析,设计天线单元在两种工作状态下存在一定的辐射相位差. 为确保天线阵列良好的辐射性能,需进行额外的相位补偿. 这种补偿策略是相控阵天线中的常规技术,易于实施. 为评估相控阵天线的阻抗匹配性能,选取位于阵列中心的 8 号单元作为测试对

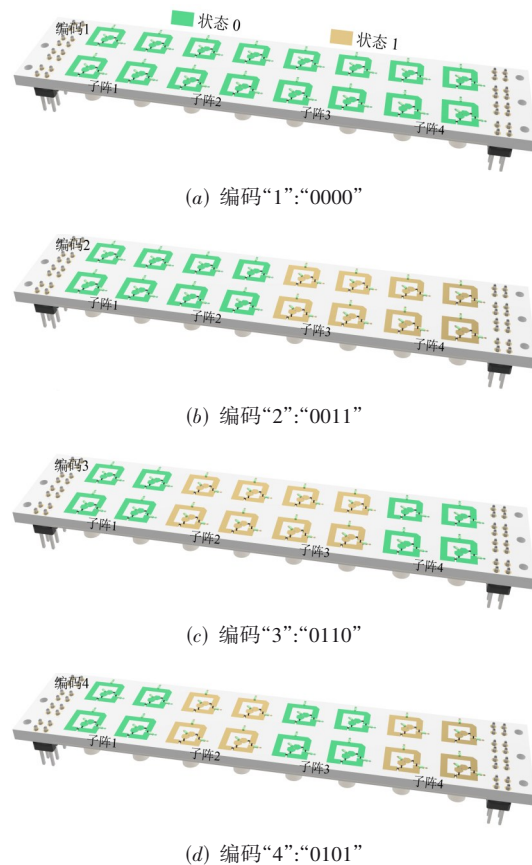


图 12 不同编码状态下天线阵列的表面反射相位分布情况

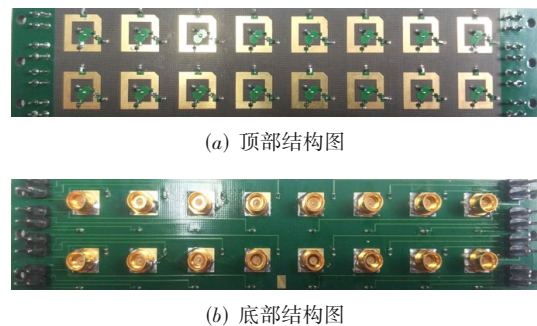


图 13 天线阵列实物图

象,分别在编码“1”和“3”配置下测试其“0”和“1”两种工作状态,对应图 12(a)和图 12(c). 图 14 展示了不同扫描角度下有源电压驻波比(VSWR)测量与仿真结果对比. 结果表明,在  $-45^\circ \sim 45^\circ$  扫描范围内,8 号单元在 8~10.5 GHz 频段内的有源 VSWR 值均低于 2.5. 测量与仿真结果高度一致,验证了该阵列优异的扫描特性.

采用单位激励有源元件方向图法<sup>[31]</sup>测量阵列的远场增益方向图. 图 15 对比了 9.4 GHz 下  $0^\circ$  和  $45^\circ$  扫描角的增益方向图. 在  $0^\circ$  扫描角下,阵列在所有编码状态的增益稳定在 14.6 dBic. 口径效率( $\epsilon_{ap}$ )定义为天线的有效口径面积( $A_{em}$ )与其物理口径面积( $A_p$ )之比,即  $\epsilon_{ap} =$

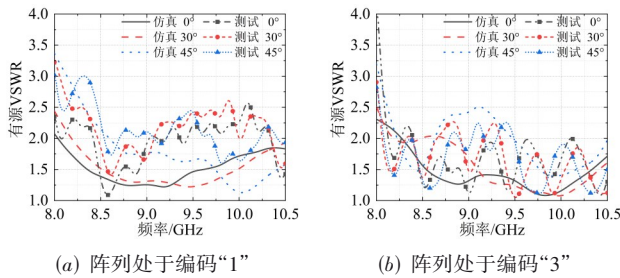


图 14 不同编码方式下降中第 8 单元有源 VSWR 的仿真与测试结果

$A_{em}/A_p$ . 其中,有效口径面积  $A_{em}$  由天线增益  $G$  和波长  $\lambda$  计算得出:  $A_{em} = G\lambda^2/(4\pi)$ . 代入定义式可得口径效率计算公式:  $\varepsilon_{ap} = G\lambda^2/(4\pi A_p)$ . 根据此公式,并取物理口径面积  $A_p$  (定义为阵列在投影平面上的总几何面积)为  $104 \text{ mm} \times 26 \text{ mm} = 2704 \text{ mm}^2$ ,计算得出 86.5% 的口径效率,显著优于文献[28]中的设计.

仿真增益与测试增益差异极小,不超过 1 dB. 当扫描角为  $45^\circ$  时,测量增益较仿真值下降约 2 dB,主要归因于天线组装误差、焊接精度、测量系统偏差及同轴电缆插入损耗等因素. 此外,在所有编码状态下,右旋圆极化电平在  $0^\circ$  和  $45^\circ$  扫描角下分别比左旋圆极化电平高 20 dB 和 14 dB 以上,表明阵列具有优异的极化纯度,充分验证了其良好的圆极化辐射性能.

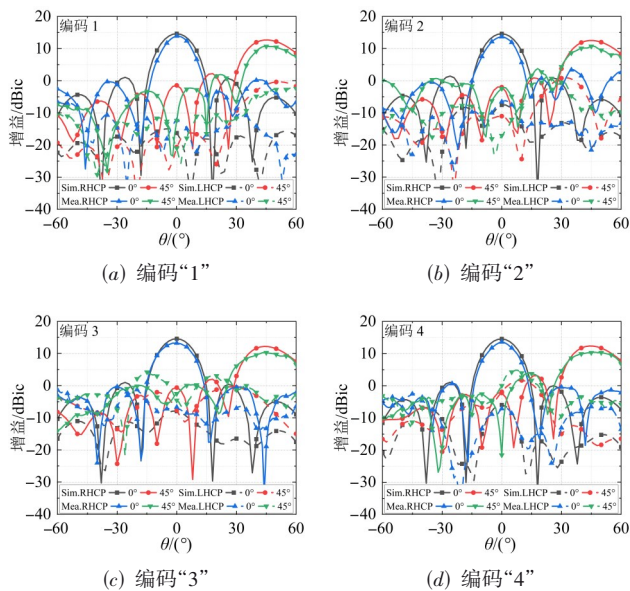


图 15 设计相控阵在不同编码状态下的增益扫描方向图

### 3.3 天线阵列散射特性

以  $y$  极化入射波为例,图 16 展示了编码状态处于“1”~“4”时设计天线阵列的单站 RCS 仿真结果. 为评估该阵列的低 RCS 特性,将其与尺寸为  $104 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$  的金属地板的 RCS 进行对比. 需指出,金属地板尺寸小

于阵列实际尺寸,不包括插针固定区域,如图 11(a).

当阵列处于编码“1”时,所有单元均处于状态“0”,如图 16(a)所示. 其 RCS 在 10.2 GHz 附近显著降低,这归因于天线单元的极化旋转效应,见图 10(c). 然而,在 9.4 GHz 圆极化工作频段,见图 6(b),阵列 RCS 值与金属地板相当,表明编码“1”时阵列无 RCS 缩减功能. 在编码“2”“3”“4”时,阵列在 8.4~10 GHz 频段内实现了 10 dB 的 RCS 减缩效果,如图 16(b)~图 16(d)所示. 此外,还对所提出天线阵列的单站 RCS 性能进行了测试,测试过程中阵列的 16 个端口均接有  $50 \Omega$  匹配负载. 尽管仿真与实测结果之间存在差异,但实测数据仍显示出良好的能量对消效果,验证了其优异的低 RCS 特性.

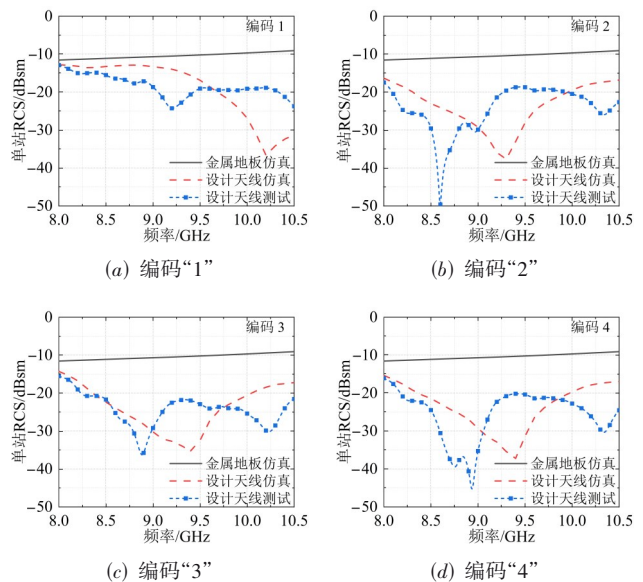


图 16  $y$  极化入射波下金属板和设计天线阵列的单站 RCS

观察图 16 中的阵列 RCS 测试结果发现,实测曲线的最小值相较于仿真曲线整体向低频方向偏移. 据此推测,测试与仿真结果之间的差异主要源于天线加工误差导致的尺寸偏差,进而引发谐振点偏移. 为验证此推论,对天线辐射贴片的长度参数  $l_1$  与  $l_2$  进行了参数化仿真研究. 如图 17 所示,增大贴片尺寸会导致谐振频率向低频偏移,该变化趋势与实测结果高度一致,证实了加工误差是造成差异的主要原因. 此外,介质材料参数偏差、焊接与连接器效应、测试系统误差以及仿真模型简化等因素,均可能引入额外误差.

为验证散射波束调控能力,对阵列在不同编码状态下的双站 RCS 特性进行仿真分析. 以  $y$  极化入射波为例,图 18(a)展示了  $yo_z$  平面内同极化散射波束的仿真结果. 结果表明,阵列散射波束指向可在  $\pm 32^\circ$  范围内有效调控,验证了其对于散射波束的灵活调控能力. 此外,不同编码状态下,阵列的辐射方向图均

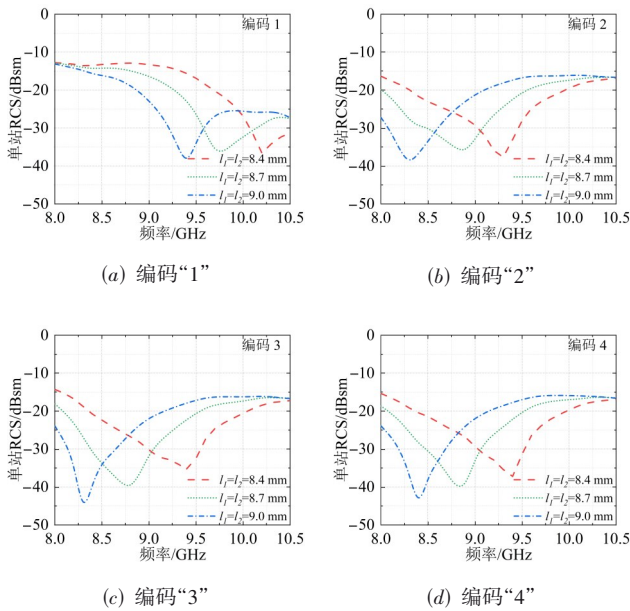


图 17 天线尺寸变化对 RCS 性能的影响

保持稳定,最大增益始终指向 $0^\circ$ ,如图 18(b)所示.因此,该阵列可在不影响辐射性能的前提下,实现对散射波束的灵活调控.

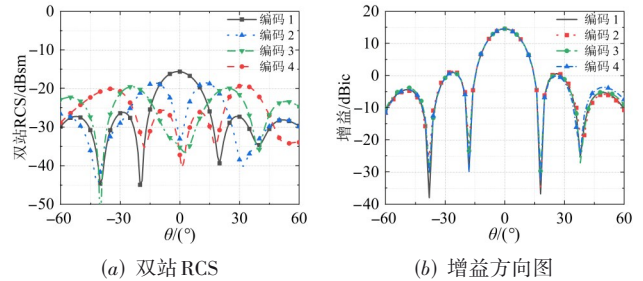


图 18 设计天线阵列在 9.4 GHz 时双站 RCS 与辐射方向图特性

表 2 对比了所设计的低 RCS 圆极化阵列与其他同类型设计的性能. 该阵列实现了 86.5% 的口径效率,显著优于其他设计,并且是唯一兼具辐射波束扫描和散射波束可调功能的设计. 此外,与文献[28]相比,其单元使用的二极管数量减少了一半以上,显著降低了设计复杂度.

表 2 低 RCS 圆极化天线性能对比

参考文献	口径效率/%	天线单元 二极管数量	RCS 减缩带宽	辐射波束 扫描能力	散射波束 调控能力
文献[15]	36.0	—	9.2 ~ 14 GHz (41.4%), >7.5 dB	不具备	不具备
文献[16]	50.2	—	4.53 ~ 6.70 GHz (38.6%), >6 dB	不具备	不具备
文献[17]	45.3	—	5.7 ~ 7.7 GHz (29.9%), >10 dB	不具备	不具备
文献[18]	53.9	—	4.7 ~ 5.8 GHz (21.0%), >6 dB	不具备	不具备
文献[19]	—	—	4 ~ 5 GHz (22.2%), >0 dB	不具备	不具备
文献[20]	31.0	—	5 ~ 17.5 GHz (111.1%), >5 dB	不具备	不具备
文献[21]	40.6	—	7.6 ~ 16.2 GHz (72.3%), >10 dB	不具备	不具备
文献[28]	56.5	10	8.2 ~ 11 GHz (29.2%), > 10 dB	不具备	具备
本文	86.5	4	8.4 ~ 10 GHz (17.4%), > 10 dB	具备	具备

### 4 结论

本文提出了一种高口径效率且散射特性可重构的圆极化天线阵列设计方法. 为评估该设计方法的有效性,通过具体的单元与阵列设计,结合仿真与实测进行全面验证. 结果显示,该天线阵列在 9.4 GHz 实现了 14.6 dBic 的增益,口径效率高达 86.5%. 此外,通过调整输入馈源相位,天线阵列的辐射波束能够在 $\pm 45^\circ$ 的范围内进行灵活扫描. 同时,其散射波束能在保持辐射性能稳定的前提下,在 $\pm 32^\circ$ 范围内进行有效调控. 最终,对所设计的天线阵列进行了加工与测试,测试与仿真结果高度一致. 该设计方法旨在为相关领域研究人员提供一个切实可行的指导框架,助力散射特性可重构天线技术快速发展.

### 参考文献

- [1] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [2] RUAN Y Z. Radar Cross Section and Stealth Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [3] REN J Y, JIANG W, ZHANG K Z, et al. A high-gain circularly polarized fabry-perot antenna with wideband low-RCS property[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(5): 853-856.
- [4] HAN Y, ZHU L, BO Y M, et al. Novel low-RCS circularly polarized antenna arrays via frequency-selective absorber[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(1): 287-296.

- [4] 丛丽丽, 付强, 曹祥玉, 等. 一种高增益低雷达散射截面的新型圆极化微带天线设计[J]. 物理学报, 2015, 64(22): 267-275.  
CONG L L, FU Q, CAO X Y, et al. A novel circularly polarized patch antenna with low radar cross section and high-gain[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(22): 267-275. (in Chinese)
- [5] 李思佳, 曹祥玉, 高军, 等. 宽带超薄完美吸波体设计及其在圆极化倾斜波束天线雷达散射截面缩减中的应用研究[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 223-232.  
LI S J, CAO X Y, GAO J, et al. Design of ultra-thin broadband metamaterial absorber and its application for RCS reduction of circular polarization tilted beam antenna[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(12): 223-232. (in Chinese)
- [6] LIU Y, LI K, JIA Y T, et al. Wideband RCS reduction of a slot array antenna using polarization conversion metasurfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 64(1): 326-331.
- [7] LI K, LIU Y, JIA Y T, 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.
- [8] SUN S Y, JIANG W, LI X Q, et al. Ultrawideband high-efficiency 2.5-dimensional polarization conversion metasurface and its application in RCS reduction of antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(5): 881-885.
- [9] 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.
- [10] ZHENG Q, GUO C J, DING J, et al. A broadband low-RCS metasurface for CP patch antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(6): 3529-3534.
- [11] JIDI L R, CAO X Y, LI W Q, et al. X-band and circularly polarized antenna with inborn RCS reduction[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(8): 1501-1504.
- [12] JIN C, ZHANG B C, YIN L Y, et al. Integrated low-profile low radar cross section circularly polarized dipole antenna array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(12): 8461-8469.
- [13] YANG P, YAN F, YANG F, et al. Microstrip phased-array in-band RCS reduction with a random element rotation technique[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(6): 2513-2518.
- [14] WANG P F, JIA Y T, LIU Y, et al. A wideband low-RCS circularly polarized reconfigurable C-shaped antenna array based on liquid metal[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(9): 8020-8029.
- [15] FAN Y, WANG J F, LI Y F, et al. Low-RCS and high-gain circularly polarized metasurface antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(12): 7197-7203.
- [16] ZHAO Y, CAO X Y, GAO J, et al. Broadband low-RCS circularly polarized array using metasurface-based element[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1836-1839.
- [17] ZHANG W B, LIU Y, JIA Y T. Circularly polarized antenna array with low RCS using metasurface-inspired antenna units[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(7): 1453-1457.
- [18] ZHENG Q, GUO C J, VANDENBOSCH G A E, et al. Low-profile circularly polarized array with gain enhancement and RCS reduction using polarization conversion EBG structures[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 2440-2445.
- [19] KANDASAMY K, MAJUMDER B, MUKHERJEE J, et al. Low-RCS and polarization-reconfigurable antenna using cross-slot-based metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 1638-1641.
- [20] ZHENG Q, GUO C J, DING J, et al. A wideband low-RCS metasurface-inspired circularly polarized slot array based on AI-driven antenna design optimization algorithm[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(9): 8584-8589.
- [21] WANG P F, JIA Y T, HU W Y, et al. Circularly polarized polarization conversion metasurface-inspired antenna array with low RCS over a wide band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(7): 5626-5636.
- [22] 陈强, 严天赐, 贺昌辉, 等. 基于PCM的圆极化贴片天线辐射和散射性能一体化设计[J]. 空天预警研究学报, 2024, 38(2): 138-142.  
CHEN Q, YAN T C, HE C H, et al. Integrated design of radiation and scattering performance of circularly polarized patch antennas based on PCM[J]. *Journal of Air & Space Early Warning Research*, 2024, 38(2): 138-142. (in Chinese)
- [23] 张磊, 董涛, 尹建勇. 新型的低RCS圆极化微带天线设计[J]. 现代防御技术, 2017, 45(6): 145-150.

- ZHANG L, DONG T, YIN J Y. Design of novel low RCS circularly polarized microstrip antenna[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(6): 145-150. (in Chinese)
- [24] ZHANG X P, CHEN Q, GENG W, et al. A wideband circularly polarized metantenna with low radar cross section[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(12): 4643-4647.
- [25] LIU Y, ZHANG W B, JIA Y T, et al. Low RCS antenna array with reconfigurable scattering patterns based on digital antenna units[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(1): 572-577.
- [26] ZHANG J H, LIU Y, JIA Y T, et al. High-gain fabry-Pérot antenna with reconfigurable scattering patterns based on varactor diodes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(2): 922-930.
- [27] ZHANG Z C, YANG S W, YANG F, et al. Low-scattering phased arrays with reconfigurable scattering patterns based on independent control of radiation and scattering[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(6): 5057-5066.
- [28] WANG P F, JIA Y T, HU W Y, et al. Broadband low-RCS circularly polarized antenna array with reconfigurable scattering patterns[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(3): 2279-2290.
- [29] CHEN Z J, TIAN J, DENG J Y, et al. Low-profile circularly polarized staircase curl antenna array with 2: 1 impedance and 50% AR bandwidths for 5G mmW communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(4): 3082-3087.
- [30] WU Q, HIROKAWA J, YIN J X, et al. Millimeter-wave planar broadband circularly polarized antenna array using stacked curl elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 7052-7062.
- [31] POZAR D M. The active element pattern[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(8): 1176-1178.

#### 作者简介



**王鹏飞** 男,1996年12月出生于江苏省盐城市。现为中科院空天信息创新研究院助理研究员。主要研究方向为相控阵天线设计、天线辐射与散射机理。中国电子学会会员编号: E190188326M。  
E-mail: wangpengfei@aircas.ac.cn



**张家豪** 男,1994年9月出生于陕西省兴平市。现为西安电子科技大学博士后、助理研究员。主要研究平台一体化天线散射机理、可重构天线及电磁结构交叉设计。中国电子学会会员编号: E190036075M。  
E-mail: gongchangjiahao@163.com



**胡文研** 女,1998年5月出生于河南省开封市。现为北京机电工程总体设计部工程师。主要研究方向为天线隐身技术与电磁超材料设计及应用。  
E-mail: 1085920114@qq.com



**史港** 男,1997年12月出生于陕西省兴平市。现为西安电子科技大学雷达探测感知全国重点实验室博士后。主要研究方向为天线散射理论及其应用。中国电子学会会员编号: E190035826M。  
E-mail: kobeport@163.com



**贾永涛** 男,1989年7月出生于河北省唐山市。现为西安电子科技大学教授、博士生导师。主要研究方向为电磁隐身技术。获陕西省自然科学奖、中国通信学会自然科学奖等省部级奖项4项。在国内外发表学术论文100余篇,出版天线隐身技术英文专著1部。中国电子学会会员编号: E190034605S。  
E-mail: jiazong0629@163.com



**刘英** 女,1977年6月出生于河南省周口市。现为西安电子科技大学雷达探测感知全国重点实验室主任、电子工程学院教授、博士生导师。主要研究方向为天线辐射与散射机理、新一代移动通信天线设计、电磁超材料设计及应用。在国内外发表学术论文300余篇,出版专著3部。中国电子学会会员编号: E190005447F。  
E-mail: liuying@mail.xidian.edu.cn