

引用:徐娟,宋逢泽,李冰.高增益圆极化顺序旋转磁电偶极子天线阵列设计[J].聊城大学学报(自然科学版),2026,39(5):643-652.

Citation: Xu Juan, Song Fengze, Li Bing. High-gain circularly polarized sequentially rotating magnetoelectric dipole antenna array design[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2026, 39(5):643-652.

文章编号 1672-6634(2026)05-0643-10

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2026010001

高增益圆极化顺序旋转磁电偶极子天线阵列设计

徐娟^{1,2}, 宋逢泽¹, 李冰¹

(1. 曲阜师范大学 网络空间安全学院, 山东 曲阜 273165; 2. 东南大学 毫米波全国重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要 提出并设计了一种顺序旋转馈电的高增益扇叶形圆极化天线阵列。天线单元采用分层式电磁耦合结构,使用微带线作为馈电网络,能量通过缝隙传输到底层的矩形贴片上,再通过金属孔耦合到顶层的扇叶形金属贴片上。利用分层式辐射结构设计,在底层平面设置对称缝隙进行耦合馈电,激励起一对正交简并模,并通过馈电设计满足幅度相等与相位正交的条件。两个模式的叠加形成了等效的环形旋转电流分布,从而建立稳定的右旋圆极化(Right-Hand Circular Polarization, RHCP)辐射。在顶层加载一对扇叶形辐射贴片,增强天线的圆极化特性,使得单元轴比带宽得到有效拓展。为进一步增强天线的辐射强度,以顺序旋转排布的 2×2 子阵为基础,再通过顺序旋转微带馈电网络组成 4×4 的圆极化天线阵列。仿真结果表明阻抗带宽基本覆盖 Q 波段(32.8~47.2 GHz),轴比带宽为 41.2%(32.4~47.2 GHz),辐射方向得到明显改善,阵列峰值增益为 18.3 dBic,满足当下毫米波段高速率和大容量的传输需求。

关键词 圆极化;宽带;顺序旋转;高增益;磁电偶极子

中图分类号 TN92

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



High-gain circularly polarized sequentially rotating magnetoelectric dipole antenna array design

XU Juan^{1,2}, SONG Fengze¹, LI Bing¹

(1. School of Cyber Science and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China;

2. National Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract A high-gain circularly polarized antenna array featuring fan-shaped radiating patches and a sequentially-rotated feeding network is presented. The antenna element adopts a layered electromagnetic coupling structure, where a microstrip line serves as the feed network. Energy is transferred through an aperture to a rectangular patch on the bottom layer and is then coupled to a pair of fan-shaped metal patches on the top layer via metallized vias. By leveraging this layered radiating structure, symmetrically placed apertures on the bottom layer are employed for coupled excitation, which first excites a pair of orthogonal degenerate modes. Through careful feed design, these modes are driven with equal amplitude and a 90° phase difference. Their superposition generates an equivalent rotating circular current distribution, thereby establishing stable right-hand circular polarization (RHCP) radiation. The introduction of a pair of

收稿日期:2026-01-01

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2023MF038);毫米波全国重点实验室开放课题(KN202502-05)资助

通信作者:徐娟,女,汉族,博士,副教授,研究方向:电磁场与微波技术,E-mail:xujuan125@163.com.

fan-shaped radiating patches on the top layer enhances the antenna's circular-polarization performance and effectively broadens the axial-ratio bandwidth of the element. To further increase the radiation intensity, a 4×4 circularly polarized array is implemented with a sequentially rotated 2×2 sub-array as the base, then combined with a sequentially rotated microstrip feeding network. The simulation results show that the impedance bandwidth basically covers the Q-band (32.8~47.2 GHz), the axial bandwidth is 41.2% (32.4~47.2 GHz), the radiation direction is significantly improved, and the peak gain of the array is 18.3 dBic, which meets the current millimetre-band high speed rate and large capacity transmission requirements.

Keywords circular polarisation; broadband; sequential rotation; high gain; magnetoelectric dipole

0 引言

如今,第五代(5G)移动通信的部署已日趋成熟,第六代(6G)通信与卫星通信(SatCom)等通信技术实现大幅进步,其核心演进方向是通过将地面网络与卫星网络进行深度融合,构建一个全域覆盖、无缝连接的一体化立体通信基础设施,这一融合是解决地面网络覆盖局限、实现真正全球连接的关键^[1-2]。信息传输呈现出高速率、大容量的发展趋势。在此背景下,毫米波频段因其巨大的可用带宽,成为支持下一代高速通信的核心物理层载体。Q波段作为毫米波频段的重要组成部分,不仅拥有丰富且相对宽松的频谱资源,可实现高达数十吉比特每秒(Gbps)的峰值传输速率,还因其处于较低大气衰减的“大气窗口”之一,相较更高频段更利于实现远距离稳定传输,成为当前及未来 5G-A、6G 乃至卫星互联网通信领域备受瞩目的研究热点^[3-5]。

在这一技术趋势下,高性能天线成为系统实现的基石。圆极化天线因其能够抑制复杂信道环境中的多径干扰和法拉第旋转效应、有效提升通信链路的鲁棒性而备受青睐^[6]。圆极化天线对极化的不敏感性不仅能有效降低对准难度,还可显著提升移动和复杂环境下的信号质量。然而,传统用于产生圆极化的交叉偶极子方法,在 Q 波段面临电尺寸过大、集成困难以及伴随频率升高而急剧增加的传输损耗等挑战,其适用性受到限制。相比之下,磁电偶极子天线因其有与交叉偶极子相当的良好辐射特性和结构紧凑、剖面低矮的特点,十分适用于 Q 波段。因此本文采用磁电偶极子天线来设计天线单元。同时,利用磁电偶极子天线具有的低剖面优势,可以对磁偶极子进行调整,使用多层介质基板也不会使得天线整体剖面过高^[7]。近期研究也表明,采用磁电偶极子设计的圆极化天线阵列是毫米波通信领域的一个重要技术方向,旨在实现高增益与宽带宽^[8]。一方面,要实现数十吉比特每秒的数据传输,必须具备足够宽的工作带宽,不仅包括阻抗带宽,更关键的是要保持优良圆极化特性的轴比(AR)带宽。现有 Q 波段的圆极化天线阵列设计,其轴比带宽普遍在 10% 左右,远不能满足未来系统的需求^[9-10]。另一方面,在毫米波频段,天线单元尺寸微小,单元间互耦效应显著,在高密度阵列集成中实现高效率和高增益波束形成尤为困难。为抑制 Q 波段密集阵列中显著的单元间互耦,本设计采取了以下核心措施:采用顺序旋转布局与馈电,利用其固有的 90° 相位递进特性使部分耦合场相互抵消;选用磁电偶极子作为辐射单元,凭借其方向图前后比高的特点,从源头上减弱侧向与后向辐射;并通过仿真优化确定了最佳单元间距,在阵列性能与耦合强度间取得平衡。这些方法共同作用,有效保障了阵列的宽带稳定工作。

针对以上背景和挑战,本文介绍了一个工作在 Q 波段的高增益圆极化磁电偶极子天线阵列。针对传统磁电偶极子天线,本文创新性地引入了一对扇叶形贴片,旨在激发额外的圆极化电流模式,从而在拓宽轴比带宽的同时增强辐射强度。为实现阵列的圆极化馈电,本文设计了顺序旋转的微带馈电网络,最终设计、制造和测量了具有增强增益和改善轴比带宽的 4×4 顺序旋转天线阵列。仿真结果表明,该天线阵列的 -10 dB 阻抗带宽(S_{11})达到了 53.4% (28.8~50.2 GHz),轴比带宽为 41.2% (32.1~48.7 GHz),基本覆盖完整的 Q 波段,天线阵列的峰值增益为 18.3 dBic,验证了其在未来高频段通信系统中的良好应用潜力。

1 扇叶形贴片高增益圆极化磁电偶极子天线单元设计

1.1 扇叶形贴片高增益圆极化磁电偶极子天线单元结构

设计工作在 Q 波段的宽带圆极化磁电偶极子天线单元如图 1 所示。天线单元由三个高度不同的 Rogers 5880 基板、带有矩形缝隙的金属板、底层矩形贴片、一对顶层扇叶形贴片和两个金属化通孔组成。天线

具体尺寸见表1。

天线单元的电由端口传输到微带线上,然后采用多层耦合馈电结构,在通过缝隙耦合到底层贴片后,再使用金属过孔馈电到顶层扇叶形贴片上^[11]。此时,底层贴片与缝隙有 90° 相位差,产生了圆极化波,再对顶层扇叶形贴片进行微调,也产生一个方向相同的圆极化波,从而有效改善辐射方向并增强辐射强度。天线单元的尺寸为 $0.8\lambda_0 \times 0.8\lambda_0 \times 0.28\lambda_0$,其中用公式(1)来计算扇形贴片的尺寸大小, λ_0 指在中心频率 f_0 时对应的波长。

$$\begin{cases} w_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_0} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}}, \\ l = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_c}}, \\ w = \frac{l}{\epsilon_r h_2}, \\ \epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h_2}{w_{\text{eff}}} \right)^{-\frac{1}{2}}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 c 是光速, f_0 是天线的中心频率, ϵ_r 是基板的介电常数, ϵ_c 是有效介电常数, w_{eff} 是扇叶形贴片的有效宽度。

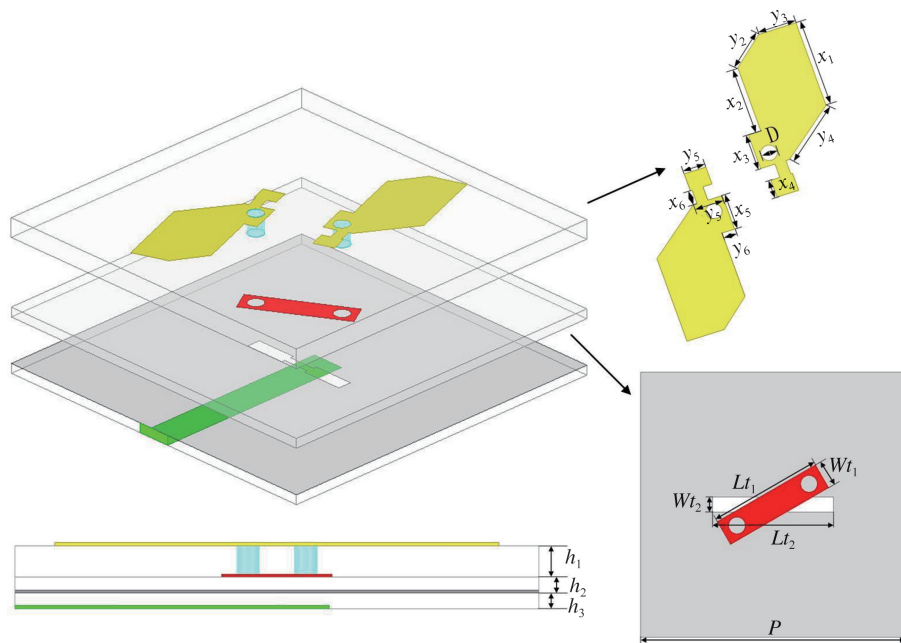


图1 微带天线单元结构

Fig. 1 Structure of a microstrip antenna element

表1 天线单元的详细尺寸

Tab. 1 Detailed dimensions of antenna elements

参数	值/mm	参数	值/mm	参数	值/mm	参数	值/mm	参数	值
h_1	1.57	x_1	3	x_3	1.6	x_5	1.2	Lt_1	2.6
h_2	0.254	y_1	1.3	y_3	1.4	y_5	1.1	Wt_1	1
h_3	0.254	x_2	2.6	x_4	0.8	x_6	0.6	Lt_2	2.55
D	0.4	y_2	1.7	y_4	1.55	y_6	0.5	Wt_2	0.4

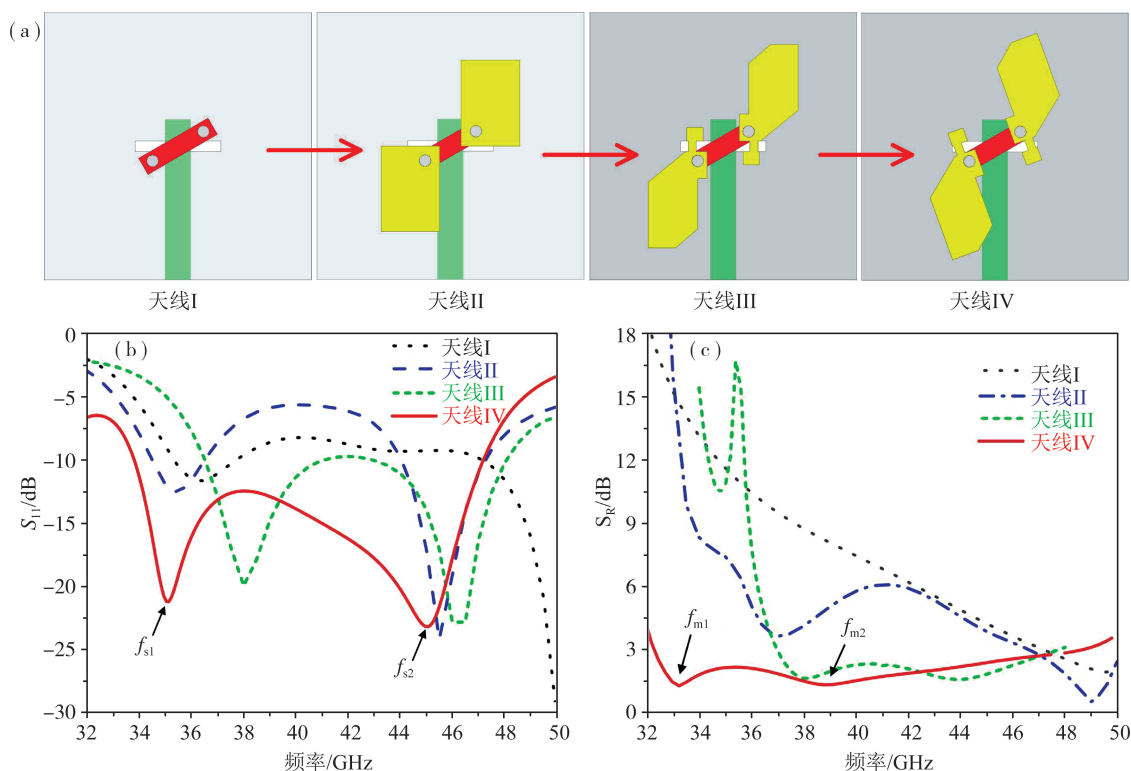
1.2 扇叶形贴片高增益圆极化磁电偶极子天线单元设计流程

为探究圆极化工作原理,研究天线单元的演变过程。如图2(a)所示,从常规的单馈电微带-缝隙耦合磁电偶极子天线Ⅰ开始,从矩形贴片上加入一对金属片并通过一对金属通孔将顶层贴片与底层贴片连接起来变为天线Ⅱ,到再对顶层贴片进行切割变为扇叶形贴片,如天线Ⅲ所示,最后将扇叶形贴片逆时针旋转 20° ,

演变成最终的天线单元Ⅳ,如下图2所示。

为了验证所提出天线单元的可行性,借助全波仿真软件 HFSS 进行仿真分析,天线演变的 S_{11} 和轴比曲线结果如图2(b,c)所示,天线Ⅰ拥有两个电流谐振点,轴比带宽较窄,仅在频谱的低频处。天线Ⅱ又在较低频段处产生较强的谐振特性,但阻抗带宽仍不匹配, S_{11} 和 A_R 带宽都未满足设计需求。因此在天线Ⅱ的基础上进行切角和微扰,得到天线Ⅲ的阻抗匹配良好 S_{11} 低于 -10 dB 且 A_R 带宽覆盖 Q 波段的较高频段处。为继续提升天线单元的整体工作性能,将扇叶形贴片逆时针转动 20° ,天线Ⅳ的 S_{11} 和轴比都有显著改善,阻抗带宽为 33.7% ($34.1 \sim 47.3$ GHz),轴比带宽为 37.4% ($32.4 \sim 47.3$ GHz)。将天线Ⅳ的两个谐振频率点命名为 f_{s1} (34.5 GHz) 和 f_{s2} (45 GHz),轴比带宽内找到两个频点为 f_{m1} (33 GHz) 和 f_{m2} (39 GHz)。

对电磁场叠加原理展开深入研究,电磁波具有矢量叠加特性。具体来说,工作在不同频段下具有相同旋向的圆极化电磁波可复合成新的辐射模式,可以有效拓展天线的轴比带宽^[12]。此外,切割贴片产生新的电流、增加寄生贴片等都可以改变贴片表面电流的流向,从而达到改善阻抗带宽和轴比带宽的效果。这与本文天线单元的演变流程相互印证,证明了天线单元设计的可行性。



注:(a) 天线单元设计演变过程;(b) S_{11} 结果图;(c) 轴比结果图。

图2 天线单元设计过程及仿真结果

Fig. 2 Antenna element design process and simulation results

1.3 天线单元性能分析

通过对上述天线结构演变过程的深入分析可以发现,扇叶形金属片作为辐射单元的关键组成部分,其空间转动角度对天线的电磁特性具有显著调控作用^[13]。具体而言,金属片的旋转角度 α 不仅改变了表面电流的分布路径,同时影响着辐射单元圆极化波特征。图3中展示的参数化仿真结果直观揭示了这一关键设计参数对圆极化性能的核心影响规律:当旋转角度 α 从 10° 逐步增大至 20° 过程中,天线的轴比特性呈现出明显的优化趋势,但再继续加大转动角度,圆极化波特性就逐渐减弱^[14]。这种参数敏感性验证了旋转对称设计在圆极化天线中的独特优势:通过精确调控金属单元的几何相位,能够有效平衡天线的辐射效率与极化纯度,这在移动终端天线的实际应用场景中具有重要工程价值。

从天线的设计流程和天线基本理论猜测,阻抗带宽产生的两个谐振点主要是由缝隙耦合和顶层贴片微调产生的^[15]。而图2的天线演变仿真的结果是与猜想相吻合的,为进一步验证,给出了天线在缝隙周围的

电流分布图,如图4所示。在缝隙模式中,电流主要在缝隙周围流动,判断出在0和 $T/4$ 时刻电流方向的相位差为 90° ,周期内电流呈现逆时针转动。如图5所示,在顶部贴片上,电流集中在贴片边缘处,判断出在0和 $T/4$ 时刻电流方向的相位差也都为 90° ,电流在周期内的转动方向同样为逆时针,验证了缝隙和贴片上产生同向圆极化使得性能更优越的猜想。为进一步佐证,图6展示了同一周期内天线单元的电场幅度分布。如图6所示,电场幅度分布显示高场强区集中于扇叶形贴片边缘,且旋转方向与电流一致,随时间从0时刻的对角分布旋转至 $T/4$ 时刻的正交对角分布, $T/2$ 时刻与0时刻呈 180° 空间反相, $3T/4$ 时刻与 $T/4$ 时刻呈 180° 空间反相,完成旋转周期。根据右手定律,天线在两部分处的产生右旋圆极化辐射,在经过叠加后天线IV的辐射宽度得到了显著拓宽。

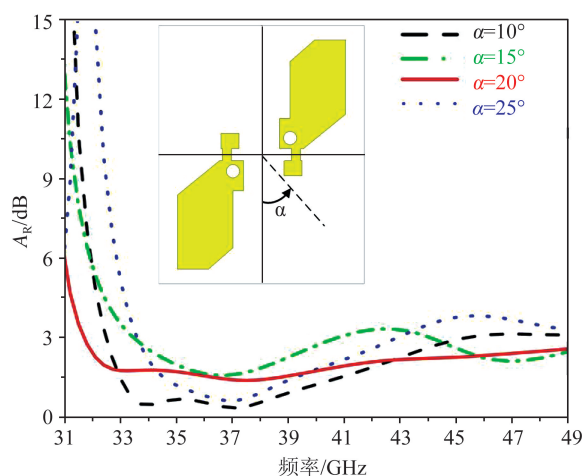


图3 转动角度 α 对轴比的影响

Fig. 3 The effect of rotation angle α on the axial ratio

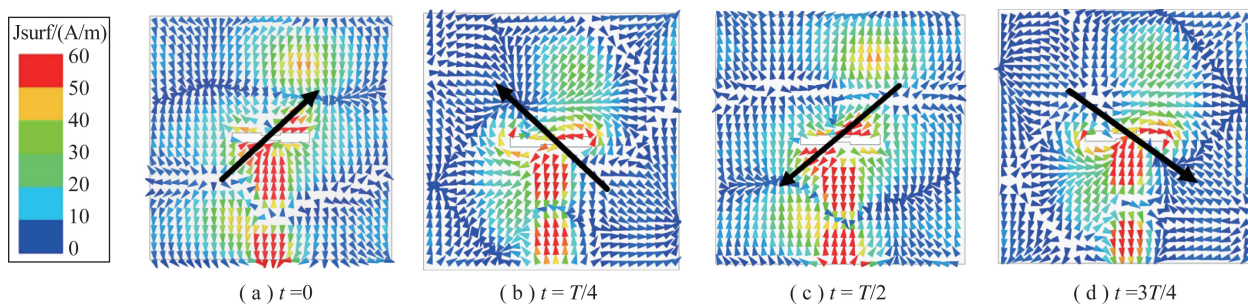


图4 一个周期内缝隙处电流矢量图

Fig. 4 Current vector diagram at the gap during one cycle

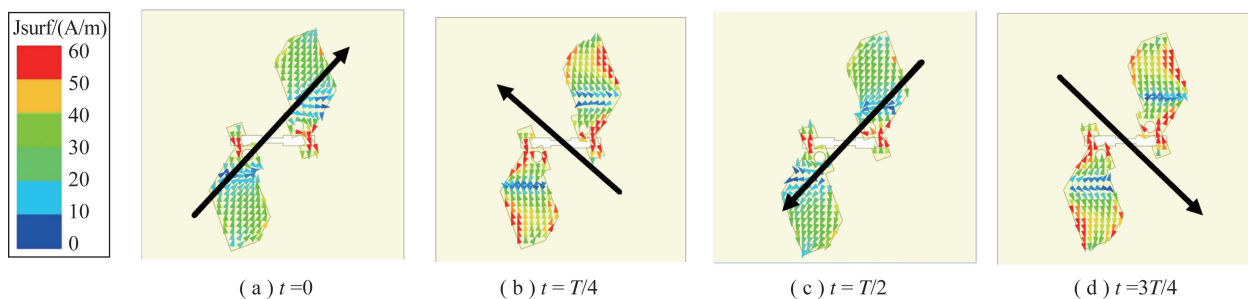


图5 一个周期内扇叶形贴片处电流矢量图

Fig. 5 Current vector diagram at the blade-shaped patch during one cycle

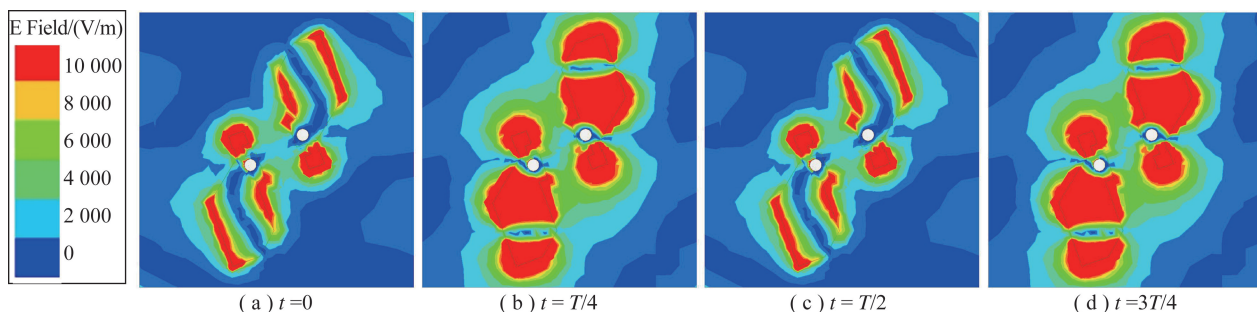
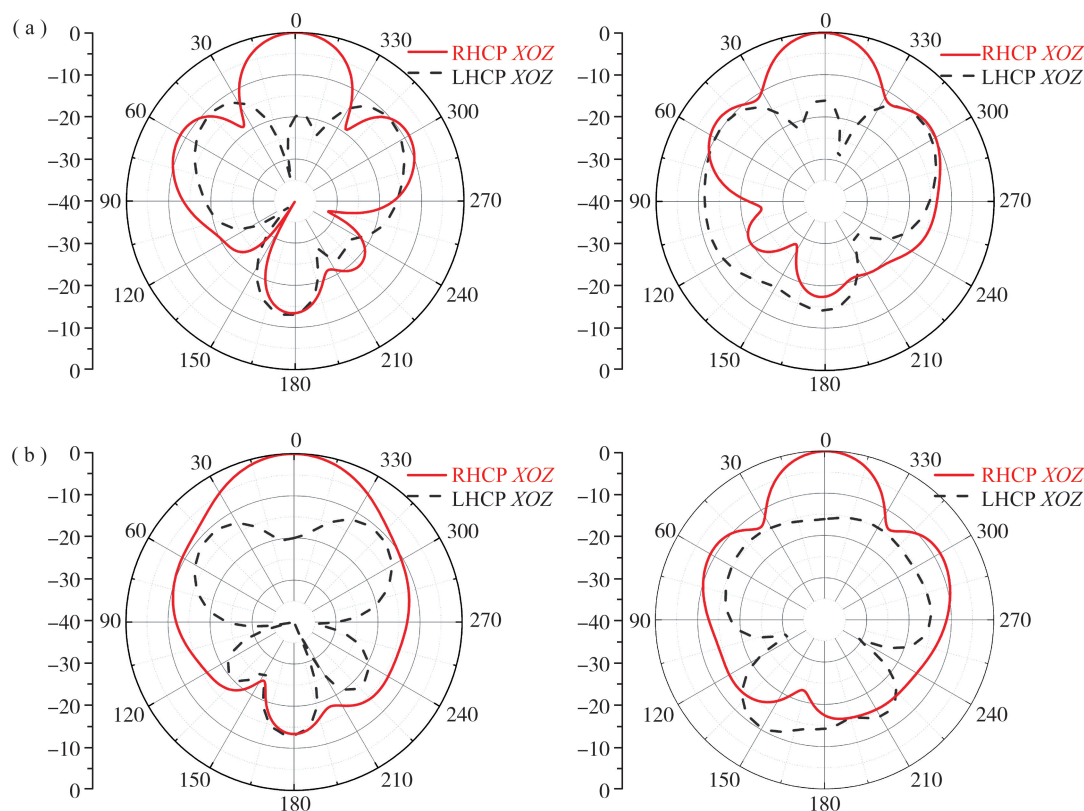


图6 一个周期内电场幅度分布图

Fig. 6 Map of electric field amplitude distribution over one cycle

基于上述分析,进一步验证天线单元在 xoz 平面和 $yo z$ 平面圆极化模式下对应的辐射方向图,如图7所示。可以直观的看到,在 xoz 、 $yo z$ 平面33 GHz和39 GHz处主极化辐射宽度较窄,这是由于缝隙处和扇叶形贴片处激发的辐射强度大小不同造成的。在缝隙处激发的辐射远场小于贴片所激发的,使得耦合之后的辐射远场图主极化产生裂瓣。交叉极化偏大,是馈电结构的复杂性导致的。多层耦合的馈电方式使得能量在传输中出现较大损耗,等效后的磁偶极子比理论偏小,根据磁电偶极子理论,当电偶极子与磁偶极子大小相等且有 90° 相位差时才能抵消交叉极化,体现较低的后向辐射性^[16]。此时,交叉极化无法完全抵消,交叉极化偏大。



注:(a) 33 GHz; (b) 39 GHz。

图7 天线单元在33 GHz和39 GHz处的辐射方向图

Fig. 7 Radiation patterns of the antenna element at 33 GHz and 39 GHz

通过表面电流和辐射远场图可知天线单元具有的良好辐射特性。由图8可知,在 $S_{11} < -10$ dB的阻抗带宽内,天线单元的平均增益为9 dBic,峰值增益达到了9.67 dBic。在缝隙处和扇叶形贴片上激发产生的辐射相叠加,天线整体的辐射特性得到增强^[17]。与另一款工作频率相近的平面集成圆极化天线单元相比,该天线单元的峰值增益提高4 dBic以上,验证了该天线单元的高增益辐射特性^[18]。

2 高增益圆极化顺序旋转天线阵列设计

2.1 顺序旋转馈电网络设计

本设计通过引入顺序旋转技术对 4×4 微带馈电网络进行优化设计,旨在提升圆极化天线的辐射强度并拓展其工作带宽。如图9(a)所示,馈电网络中各 2×2 子阵的4个单元按顺时针方向依次旋转 90° 排布,对应馈电相位分别为 0° 、 90° 、 180° 、 270° ,使正交场分量在远场叠加形

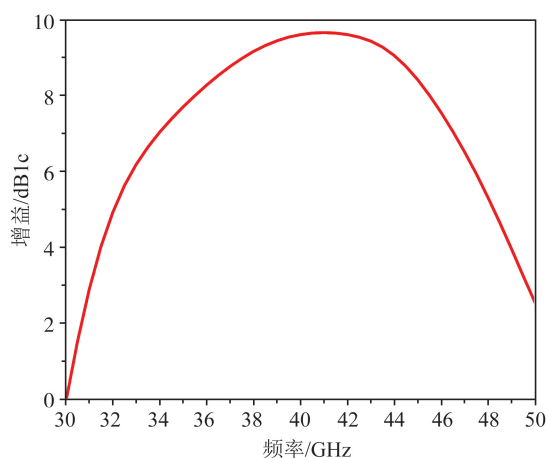
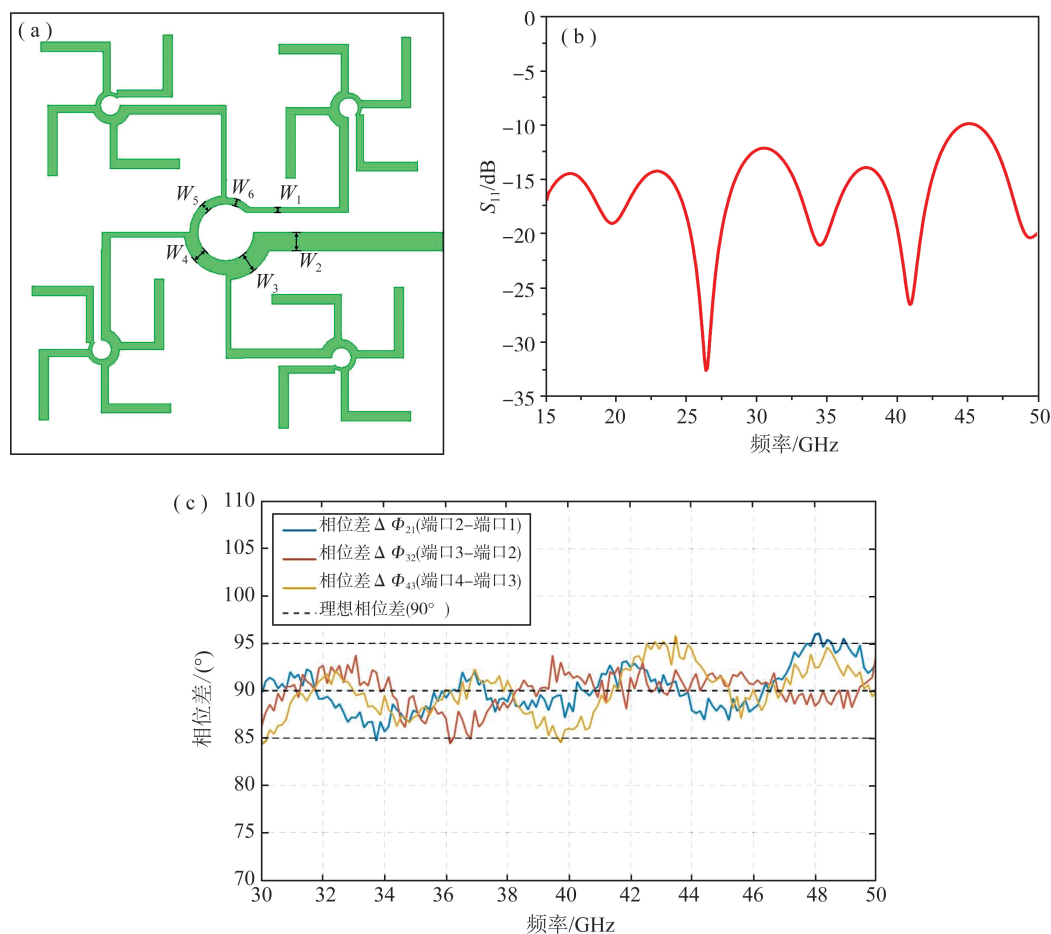


图8 天线单元增益图

Fig. 8 Gain characteristics of the antenna element

成纯圆极化波,形成相位渐进式旋转馈电特性,其关键结构参数已在表2中标注。为验证馈电网络性能,采用 HFSS2018 全波仿真软件进行电磁仿真分析,所得相邻端口相位差如图9(b)所示, S_{11} 如图9(c)所示。仿真数据显示,相邻端口相位差在中心频点处实现 90° ,全频段内相位差保持在 $85^\circ\sim 95^\circ$ 的范围内,验证了相位渐进式排布的精确控制效果;在目标工作频段内馈电网络的回波损耗 S_{11} 始终优于 -15 dB,阻抗匹配性能完全满足设计要求,且其有效工作带宽与前期设计的天线单元保持良好兼容性。这种协同设计方法为宽带圆极化天线的工程实现提供了有效解决方案。



注:(a) 功分器结构;(b) 功分器 S_{11} 结果;(c) 功分器相邻端口相位差曲线。

图9 馈电功分器网络结构与性能

Fig. 9 Structure and performance of the feeding power divider network

2.2 天线阵列的设计与实现

根据顺序旋转理论可知,将天线单元按照 90° 相位差依次顺时针选择排布,与上节设计的馈电网络相结合,实现了 4×4 的顺序旋转宽带高增益圆极化磁电偶极子天线阵列设计。天线阵列如图10所示,天线阵列的尺寸为 $2.2\lambda_0\times 1.9\lambda_0\times 0.18\lambda_0$ 。尺寸剖面较低,尺寸较小,易于加工。

2.3 天线阵列仿真结果及分析

图11给出了仿真的圆极化天线阵列 S_{11} 、 A_R 和增益曲线,仿真的阻抗带宽为53.4%(28.8~50.2 GHz),轴比带宽为41.2%(32.1~48.7 GHz),重叠带宽可以达到41.2%。全波仿真结果表明,该天线阵列可以实现18.3 dBic的峰值增益。该天线阵列具有宽轴

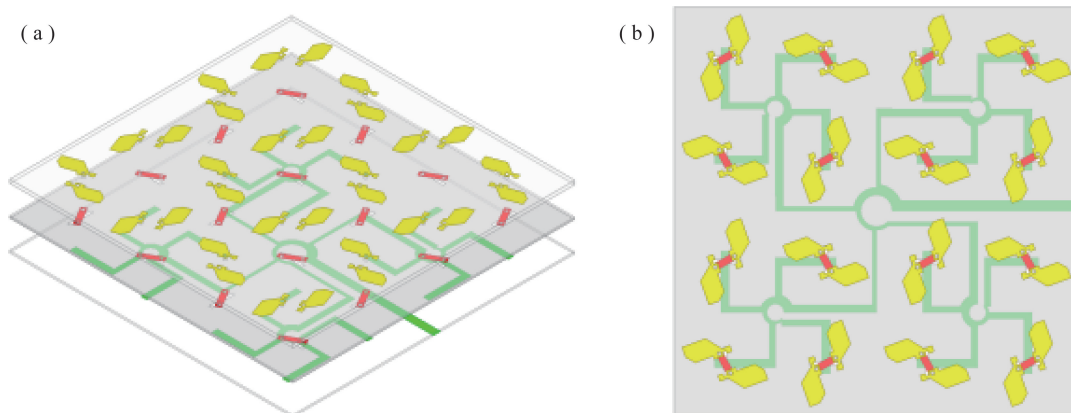
表2 微带馈电网络具体参数

Tab. 2 Specific parameters of the microstrip-fed network

参数	值/mm
W_1	0.55
W_2	1.2
W_3	1.15
W_4	0.6
W_5	0.55
W_6	0.85

比特性,并且峰值增益提高了3倍。在低频段天线阵列增益显著降低的现象值得关注,进一步分析表明,该

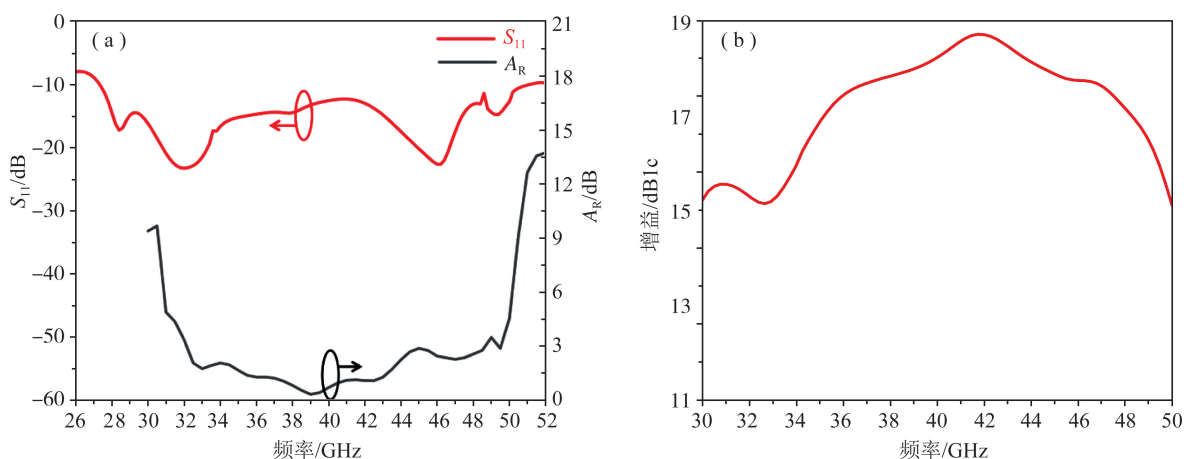
特性源于阵列结构对主极化 RHCP 辐射场的定向增强效应^[18]。这种极化调控效应在有效拓展天线轴比工作带宽的同时,通过阵列单元间交叉极化分量的相位相干作用产生矢量叠加,导致 RHCP 与 LHCP 分量在特定频段形成辐射场耦合关系,最终造成低频区域辐射增益的规律性衰减。



注:(a) 3D 结构图; (b) 俯视图。

图 10 天线阵列结构

Fig. 10 Antenna array structure

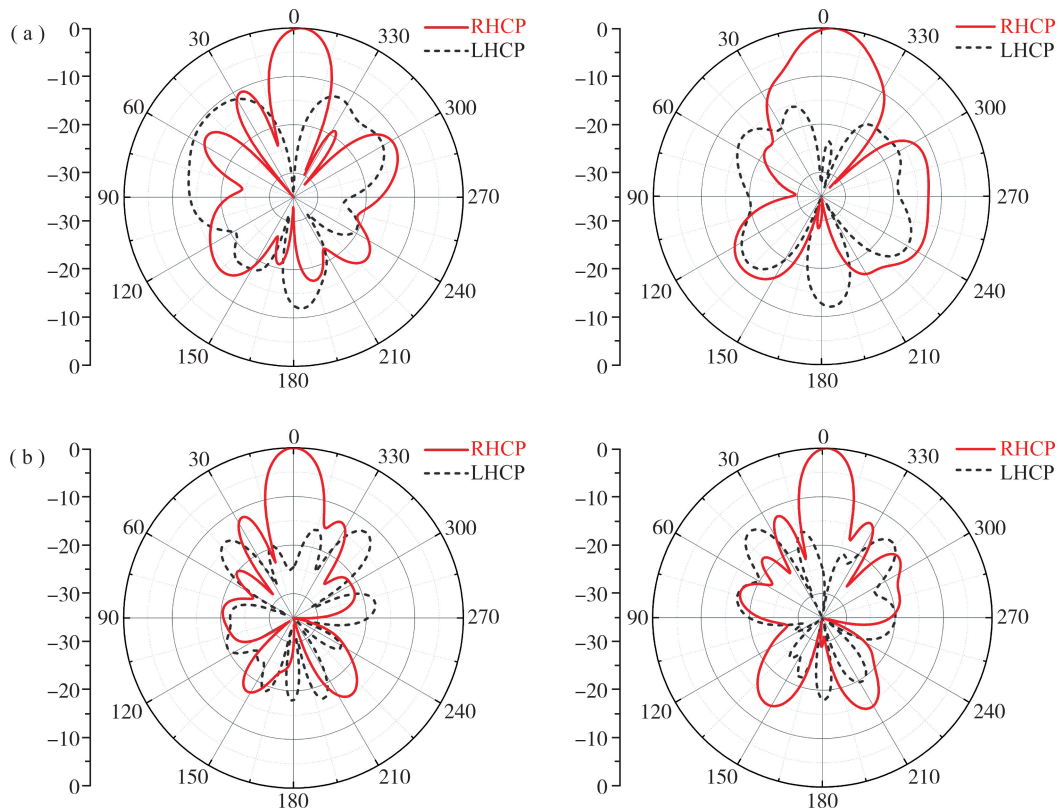


注:(a) S_{11} 和轴比; (b) 增益。

图 11 天线阵列仿真结果图

Fig. 11 Antenna array simulation results

基于天线单元双圆极化模态的电磁耦合机理研究,图 12 仿真结果表征了对应轴比带宽特征频点(38 GHz 与 46 GHz)的天线阵列归一化辐射方向图。天线阵列辐射方向的副瓣相对于单元有明显的改善,其中 46 GHz 处的主束宽度更窄,方向更集中,验证了阵列设计的极化纯度优势。天线阵列辐射性能良好, xoz 和 $yo\bar{z}$ 平面的交叉极化都低于 -20 dB。值得注意在较低频率处 $yo\bar{z}$ 面存在轻微畸变现象^[19],在 30° 方向出现副瓣展宽现象,分析主要源于三方面因素:单元间距电尺寸减小导致单元方向图展宽,固定馈电网络引入约 5° 相位误差使副瓣抬升 2~3 dB,以及 2×2 子阵非均匀间距产生的构造性干涉。详细量化分析主瓣宽度 18° ,集中了 78% 的辐射功率,峰值增益 16.8 dBic,仅较中心频率下降 1.5 dB,仍满足高增益需求;副瓣峰值电平 -10.5 dB,能量占比低于 8%,对阵列总效率影响小于 2%;交叉极化低于 -20 dB,圆极化纯度优良; 30° 方向干扰较主瓣低 10 dB 以上,满足通信链路信噪比要求。主瓣与副瓣的功率比值约 10 dB,确保能量主要集中于目标方向,阵列方向图仍维持明确的主辐射指向性,对系统整体辐射效率影响可控。通过对比单元与阵列的辐射特性可知,天线阵列与单元辐射特性相比波束宽度更具优化性,充分论证了本文提出的圆极化天线阵列在毫米波通信系统中的工程应用价值。



注:(a) 38 GHz; (b) 46 GHz。

图 12 天线阵列在 38 GHz 和 46 GHz 的辐射方向图

Fig. 12 Radiation patterns of the antenna array at 38 GHz and 46 GHz

为突显本文设计的天线阵列在毫米波领域的技术突破性,表 3 通过七项关键指标(中心频率、轴比带宽、阻抗带宽、峰值增益、增益带宽、剖面及规模)对本方案与现有圆极化阵列展开量化对标。从表中可以看出,本文设计的天线阵列与相同尺寸的阵列相比,无论是阻抗带宽还是轴比带宽,都有明显的优势,并且保证了高增益和高辐射效率。

表 3 本文与其他天线阵列的比较

Tab. 3 Comparison of the present work with other antenna arrays

文献	中心频率/GHz	轴比带宽/%	阻抗带宽/%	峰值增益/dBic	增益带宽/%	剖面(λ_0)	规模
[20]	15.6	65.5	67.2	17.2	53.1	0.15	4×4
[21]	25	42.8	58	22.18	42.8	0.14	8×8
[22]	60	21.5	20.8	19.3	21.5	0.47	4×4
[23]	26	26.5	30.7	15.0	25.3	0.20	4×4
本文	40.4	41.2	53.4	18.3	41.2	0.18	4×4

3 结论

本文以工作在毫米波 Q 频段处为设计目标,以提高天线辐射增益和拓宽辐射宽度为核心设计了一个顺序旋转高增益圆极化磁电偶极子天线阵列。天线单元采用分层式馈电,在缝隙磁电偶极子天线的基础上加入一对扇叶形金属片,利用了电磁波叠加原理实现了宽轴比和高增益,天线单元峰值增益达到了 9.67 dBic。随后设计了微带功分器馈电网络,组成最终的 4×4 顺序旋转圆极化天线阵列。经过全波仿真和远场验证,天线阵列的阻抗带宽 S_{11} 为 53.4%(28.8~50.2 GHz),轴比带宽为 41.2%(32.1~48.7 GHz)。天线阵列峰值增益为 18.3 dBic,与单元相比提高一倍。本文设计的天线阵列具有宽带特性、优良的圆极化辐射宽度和高辐射强度,适用于高传输速率和高容量的卫星通信、5G 通信等通信领域。

参 考 文 献

- [1] Wang Y Y, Lin H, Song Y X, et al. Performance-enhanced orthogonal time frequency space system based on probabilistic shaping[J]. Optics Communications, 2025, 596: 132498.
- [2] Li X Y, Shang B D. Advancing multi-connectivity in satellite-terrestrial integrated networks: architectures, challenges, and applications [J]. IEEE Network, 2026, 40(1): 209-218.
- [3] Alsaab N, Alhassoon K, Alsaleem F, et al. High-performance series-fed array multiple-input multiple-output antenna for millimeter-wave 5G networks[J]. Sensors, 2025, 25(4): 1036.
- [4] Huang Z C, Liao S W, Xue Q. A Q/V dual-band dual-circularly polarized shared-aperture phased array antenna with limited field of view scanning[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting IEEE, 2024: 2381-2382.
- [5] Mallick S, Acharya T, Chakravarty S. Robust secure beamforming design in cognitive satellite communication for coexistence with terrestrial networks[J]. Physical Communication, 2024, 67: 102509.
- [6] Abed A T, Singh M S J, Jawad A M. Investigation of circular polarization technique in Q-slot antenna[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2020, 12(2): 176-182.
- [7] Tong X F, Jiang Z H, Li Y, et al. A low-profile dual-broadband dual-circularly-polarized reflectarray for K-/Ka-band space applications [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2024, 25(8): 1145-1161.
- [8] Xiang L, Wu F, Yu C, et al. A wideband circularly polarized magneto-electric dipole antenna array for millimeter-wave applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(5): 3876-3881.
- [9] Zhang Y, Hong W. Planar substrate intergrated circular polarized antenna for Q-band wireless communications[C]//Proceedings of 10th Global Symposium on Millimeter-Waves. IEEE, 2017: 184-186.
- [10] Xiao J, Ding T Y, Luo D L, et al. Circularly polarized antenna array using metallic slanted cross slot for 5G MMW applications[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2022, 43(1): 165-180.
- [11] Hu Y F, Wu Y L, Wang G, et al. A circularly polarized, highly selective, harmonic-suppressed filtering antenna for 5G application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(12): 4308-4312.
- [12] Bai H, Wang G M, Zou X J. A wideband and multi-mode metasurface antenna with gain enhancement[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2020, 126: 153402.
- [13] Xu R, Li J Y, Liu J, et al. UWB circularly polarised slot antenna with modified ground plane and L-shaped radiator[J]. Electronics Letters, 2018, 54(15): 918-920.
- [14] Peng F, Liao C, Zhao L, et al. A planar circularly polarized wide-angle scanning phased array with aperiodic distributed and randomly rotated elements[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(12): 4433-4437.
- [15] Jian Z, Yu H F, Lü L W, et al. Design of a wide axis ratio beam width circularly polarized dielectric resonator antenna[C]//Proceedings of International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. IEEE, 2022: 1-3.
- [16] Ali Banihashem S, Mohammadi P, Zehforoosh Y. Magnetic-electric dipole circularly polarized antenna with unidirectional radiation pattern with improved characteristics[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2024, 16(2): 276-283.
- [17] Bi Z Q, Tu Z H. Pattern diversity circularly polarized antenna with wide axial-ratio beam[C]//Proceedings of Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference. IEEE, 2024: 1-3.
- [18] Yang Y, Gong R J, Bay Y L. 2-D scanning circularly polarized multi-beam antenna array of ME dipole[C]//Proceedings of IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM). IEEE, 2021: 1-3.
- [19] Tran H H, Park H C. Gain and bandwidth enhancements of sequential-fed circularly polarized patch antenna array using multiple parasitic elements[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020, 30(9): e22319.
- [20] Liu H P, Zhang Y H, Zhao X W. A wideband circularly polarized antenna array loaded with dual-layer metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024, 72(8): 6717-6722.
- [21] Tan Q Q, Fan K K, Yu W L, et al. A circularly polarized strip dipole antenna array with working bandwidth above 40% for wireless and satellite communications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(1): 9-13.
- [22] Xiao J, Gan Q, Ye Z H, et al. A 60-GHz wideband high-efficiency circularly polarized dual-coil antenna array[J]. Sensors, 2025, 25(7): 2211.
- [23] Wu T, Zhang C. Broadband circularly polarized magneto-electric dipole antenna for millimeter-wave communication[J]. iScience, 2025, 28(10): 113469.

(责任编辑:赵海军)