

文章编号: 1671-7449(2026)01-0124-09

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(1): 124-132.

基于特征模分析的宽带圆极化超表面缝隙耦合天线

郑学梅^{1,2*}, 桂傲²

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室, 吉林 吉林 132012;

2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 基于特征模理论, 提出一种低轮廓超表面圆极化宽带缝隙耦合微带天线。超表面由 4×4 的切角金属贴片构成, 天线由缝隙耦合馈电, 其地板缝隙由双梯形连接而成。通过特征模式理论, 对正方形超表面切角分离正方形贴片模式显著性的简并模作用进行了分析, 有效分离了简并模, 为实现圆极化宽带性能提供了模式基础。该天线尺寸为 $0.67\lambda\times 0.67\lambda\times 0.043\lambda$, λ 为5.0 GHz自由空间波长。仿真结果表明, -10 dB阻抗带宽29.8%, 频率从4.33 GHz到5.82 GHz, 3 dB轴比带宽17.8%, 频率从4.93 GHz到5.82 GHz。此天线具有良好圆极化宽带性能, 在卫星通信等领域具有潜在的应用前景。

关键词: 特征模式; 圆极化; 宽带; 超表面

中图分类号: TN822

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026029

引用格式: 郑学梅, 桂傲. 基于特征模分析的宽带圆极化超表面缝隙耦合天线[J]. 测试技术学报, 2026, 40(1): 124-132.

ZHENG Xuemei, GUI Ao. Broadband circularly polarised metasurface slit-coupled antenna based on characteristic mode analysis[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(1): 124-132.

Broadband Circularly Polarised Metasurface Slit-Coupled Antenna Based on Characteristic Mode Analysis

ZHENG Xuemei^{1,2*}, GUI Ao²

(1. Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. School of Electric Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Based on the characteristic mode theory, a low-profile metastructure circularly polarized broadband slot-coupled microstrip antenna is proposed. The metasurface is composed of a 4×4 cut angle metal patch, the antenna is fed by gap coupling, and the floor gap consists of a double trapezoidal connection. Based on the theory of characteristic mode, the function of degeneracy mode of square radiating patch is analyzed, and the degeneracy mode is separated effectively, which provides the mode basis for realizing circular polarization broadband performance. The size of the antenna is $0.67\lambda\times 0.67\lambda\times 0.043\lambda$, where λ is the free-space wavelength at 5.0 GHz. The simulation results show that the -10 dB impedance bandwidth is 29.8% for frequencies from 4.33 GHz to 5.82 GHz and the 3 dB axial ratio bandwidth is 17.8% for frequencies from 4.93 GHz to 5.82 GHz. This antenna achieves good circularly polarised broadband performance and has excellent application prospects in areas such as satellite communications.

Key words: characteristic pattern; circular polarization; wideband; metasurface

【收稿日期】2025-05-28

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(61803356); 东北电力大学博士科研启动基金资助项目(BSIXM-2021207)

*【通信作者】郑学梅(1983—), 女, 副教授, 博士, 主要从事MIMO天线、微带器件研究。E-mail: zhengxuemei@neepu.edu.cn。

0 引言

圆极化天线在通信系统中可有效缓解多径衰落效应,并降低极化失配导致的信号损耗,因此,其在无人机和航天器通信、遥感和探测、射频识别以及全球导航卫星系统等方面广泛应用^[1-3]。然而,传统圆极化天线通常具有窄带宽、低增益、高剖面和大尺寸等缺点,限制了其在高速数据传输系统、卫星通信、雷达系统、物联网传感器等方面的应用。目前,宽带圆极化天线有多种设计方法,如加入寄生贴片^[4-5]、双馈电或多馈电网络^[6-7]以及采用多层贴片结构^[8]。Hussain等^[5]提出了一种方形主辐射贴片与对称寄生贴片组合的圆极化天线设计,实现了14.7%的轴比带宽(宽带值比中心频率)。Liu等^[7]采用双端口进行馈电实现了31.3%的轴比带宽,但馈电系统较为复杂。Ding等^[8]采用多层贴片结构提升带宽,实现了19.4%的轴比带宽,但多层结构导致天线的剖面尺寸明显增大。韩国瑞等^[9]通过传统模式分析方法获得了优异的圆极化宽带性能,但峰值增益仅有5.5 dBi。因此,这些方法在同时满足小型化、低剖面 and 宽带特性方面仍存在各自的局限性。

超表面是一种人工设计的二维电磁结构,由于其电磁特性具有可塑性,因此被广泛用于改善天线辐射性能。在天线中使用超表面可以实现线极化波转变成圆极化波^[10]、扩展带宽^[11]、放大增益^[12]以及多模谐振^[13]。目前已有多种超表面圆极化带宽天线设计相继被报道^[12-16]。Hussain等^[13]提出了带有寄生贴片的超表面天线,并通过激发多谐振模式实现了16.8%的3 dB轴比带宽。Liu等^[14]提出了一种基于椭圆单元的超表面圆极化天线,实现了18.6%的3 dB轴比带宽。虽然现有的方法可以优化圆极化的工作带宽,但它们普遍存在结构复杂、尺寸大等问题。

本文提出一种基于特征模理论的超表面-缝隙耦合宽带圆极化天线设计方法。特征模理论兼具解析本征模式的概念明晰性与数值矩量法(Method of Moments, MoM)处理复杂结构的优势^[17],具有普适性。本文基于特征模理论分析矩形超表面单元,识别出两个具有重叠谐振带宽且特征角曲线重合的辐射模式;为实现圆极化条件,创新性地采用矩形超表面单元截角处理方法,成功分离两种模式的特征角曲线至60°以上差值,从

而满足宽频带圆极化辐射的性能要求。最后,本文通过模式电流分析,优化设计缝隙耦合馈电结构,有效激励目标特征模式,从而满足宽带圆极化天线的性能需求。

1 特征模理论分析

1.1 特征模理论

近年来,特征模分析(Characteristic Mode Analysis, CMA)因其高效性被广泛用于电磁散射体内部机理研究和超表面天线设计^[7,18-19]。特征模式被定义为一组表面电流和辐射场分布,它们与任何外部激励源无关,只取决于导体的几何参数(形状与尺寸)^[17]。广义本征值方程定义为

$$XJ_n = \lambda_n R J_n, \quad (1)$$

式中: R 和 X 分别为求解电场积分方程的MoM中阻抗矩阵的实部和虚部; λ_n 和 J_n 分别为第 n 阶模式($n=0,1,2,3,\dots$)中的本征值和特征电流。理想导体的表面电流定义为

$$J = \sum_n a_n J_n, \quad (2)$$

$$a_n = \frac{\langle E_i, J_n \rangle}{(1 + j\lambda_n)}, \quad (3)$$

式中: a_n 为第 n 阶模式的模式加权系数; E_i 为外加电场,内积 $\langle E_i, J_n \rangle$ 为定义该模式的模态激励系数。模式显著性(Mode Significance, MS)是衡量特征模式的重要参数,其值仅取决于导体自身的电磁特性。 MS_n 为第 n 种模式的MS值,其随频率的变化曲线反映了不同频点下的模式谐振强度。当 $MS_n=1$ 时,该模式处于谐振模态;当 $MS_n=0$ 时,该模式完全不谐振^[20]。在工程实践中,通常将 $MS_n>0.707$ 对应的频率范围定义为该模式的谐振带宽^[21]。 CA_n 为第 n 阶特征电流的切向分量与模式显著性(MS_n)对应的模式电场之间的相位差。 MS_n 和 CA_n 分别定义为

$$MS_n = \frac{1}{|1 + j\lambda_n|}, \quad (4)$$

$$CA_n = \pi - \tan^{-1} \lambda_n. \quad (5)$$

为了实现圆极化辐射,通常需要同时激励两个工作在同一频段、空间正交且具有90°相位差的特征模式。实现这一目标有两种途径:一种是直接利用天线自身的正交模式^[18];另一种则通过设计馈电网络(如缝隙耦合或微带线馈电)来产生

所需的相位差^[7,19]。本研究采用通过对超表面的设计使所需两种模式产生相位差的方法,并采用优化的缝隙耦合馈电结构实现模式激励,结合全波电磁仿真技术对轴比特性进行系统分析,通过参数优化设计,最终提升圆极化宽带性能。

1.2 CMA中所需的模式

超表面的几何形状如图 1(a) 所示,该结构由 4×4 正方形金属阵列构成。每个金属贴片尺寸为 $w_1 \times w_1$, 相邻贴片间的边缘间距为 g 。该超表面结构制作于衬底的上表面。衬底采用 FR4 介质材料,其相对介电常数为 4.4,厚度为 h_1 。为了研究超表面的特性,使用电磁仿真软件 CST Microwave Studio(CST)中的 CMA 模块进行仿真计算。在天线的设计过程中,采用 CMA 以获得无源天线结构的电磁特性。

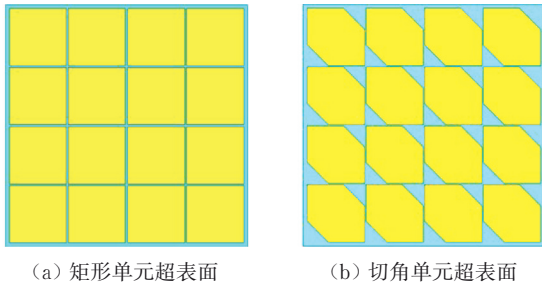
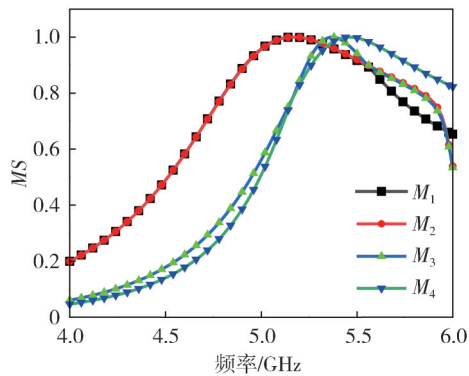


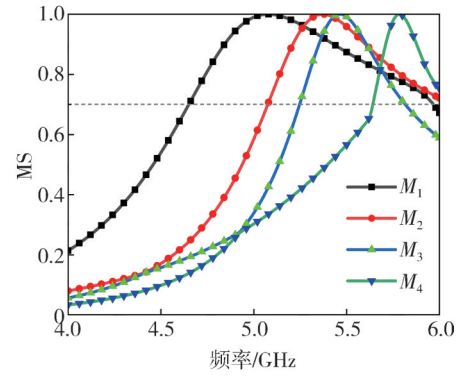
图 1 矩形与切角单元超表面结构示意图

Fig. 1 Metasurface structures with rectangular and chamfered unit cells

基于 CMA 方法,本文对具有无限大基底和理想地板的超表面结构进行了特征模式研究。仿真结果如图 2(a) 所示,呈现了前 4 个特征模式:模式一(Mode1, M_1)、模式二(Mode2, M_2)、模式三(Mode3, M_3)和模式四(Mode4, M_4)的 MS 值随频率的变化关系。



(a) 矩形单元超表面的 MS 曲线

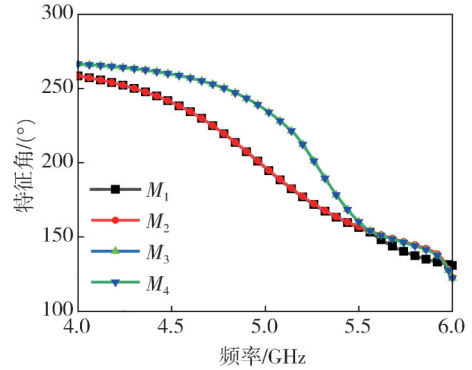


(b) 切角单元超表面的 MS 曲线

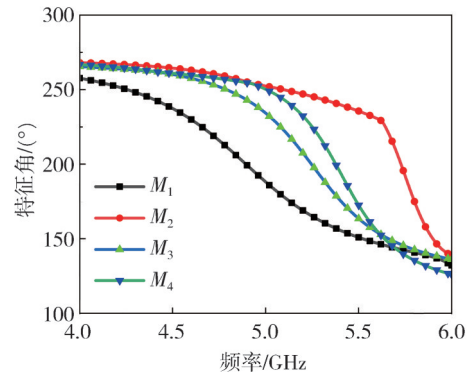
图 2 四种模式的 MS 曲线

Fig. 2 MS curves for the four modes

仿真结果表明, M_1 和 M_2 具有完全一致的 MS。此外,这 4 个模式在相近的频点处均呈现显著谐振特性。为了获得所需的辐射特性,研究者选择所需的模式并激发它们。此外,非必要模式应该被抑制。现有研究表明^[7,19],当两个特征模式的 MS 曲线完全重合时,即可判定为一对简并模式。如图 2(a) 所示,本研究的 M_1 和 M_2 正是呈现出这种典型的简并特性。如图 3(a) 所示, M_1 和 M_2 特征角曲线呈现完全重合的特性。



(a) 矩形单元超表面的特征角曲线



(b) 切角单元超表面的特征角曲线

图 3 超表面的特征角曲线

Fig. 3 Characteristic angular curves of metasurface

根据圆极化辐射的基本原理,需要使这两个正交模式的激励相位差稳定在 90° 附近。为实现这

一目标,本研究设计一种新型的超表面,通过打破结构对称性以达到分离简并模式并完成特征角差接近 90° 的目标。

本文设计的天线是通过对矩形贴片切角的方法实现模式调控。如图 1(b) 所示,在矩形贴片对角位置引入精确切角,有效打破结构对称性。如图 2(b) 所示,该设计成功解除 M_1 和 M_2 的简并模式状态, M_1 的谐振频点在 5.1 GHz , M_2 的谐振频点在 5.78 GHz ,频率间隔达 0.68 GHz 。图 3(b) 所示,在工作频段内 M_1 和 M_2 的特征角也实现了有效分离,其相位差稳定维持在 60° 以上。这一特性为实现圆极化宽带性能提供了关键的模式基础。在目标工作频段内,根据图 2(a) 所示 M_3 和 M_4 的 MS 曲线, M_3 和 M_4 分别在 5.3 GHz 和 5.4 GHz 处谐振,谐振现象会对 M_1 和 M_2 在 5.0 GHz 附近频带的激励产生显著干扰,进而影响天线的圆极化宽带的性能,因此,抑制 M_3 和 M_4 的激励至关重要。

图 4 和图 5 比较了 5.0 GHz 频点处超表面在切角前后 4 种特征模式的表面电流 J_1 、 J_2 、 J_3 和 J_4 。

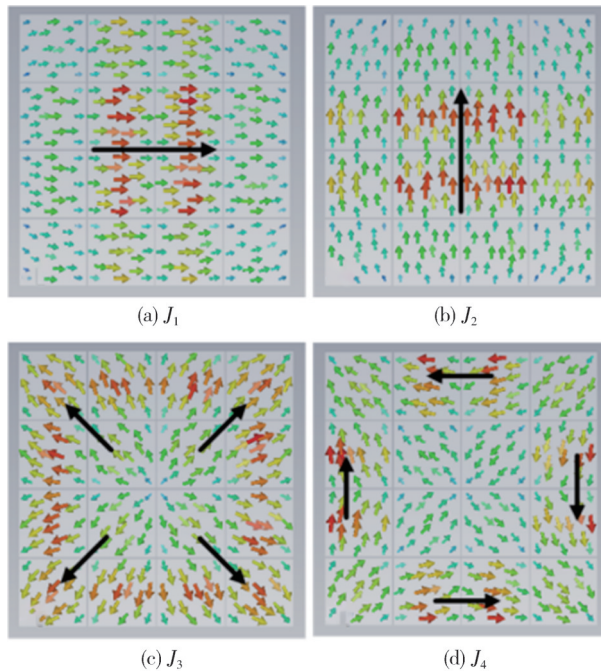
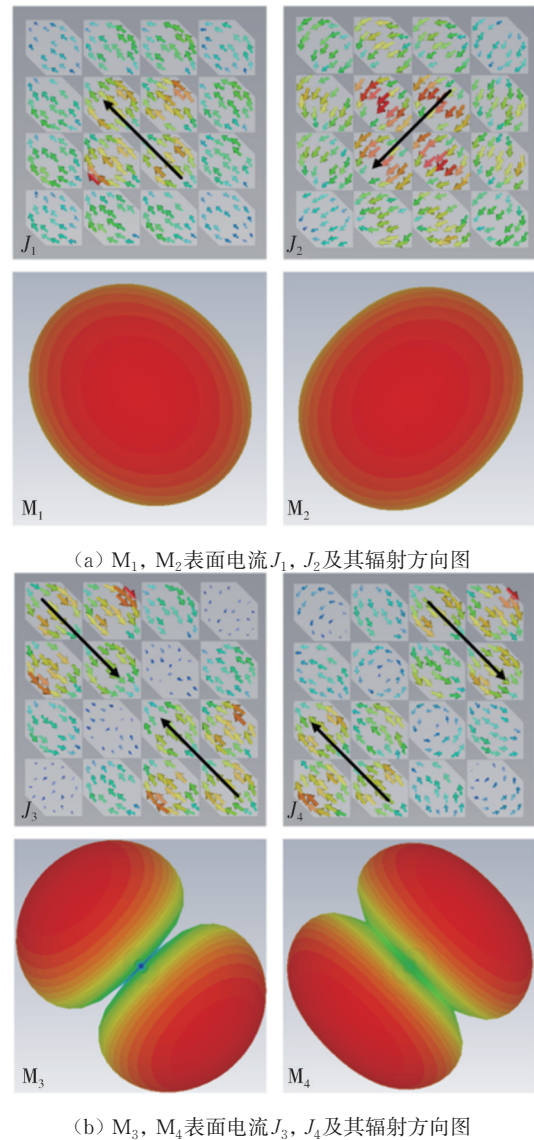


图 4 矩形单元超表面模式表面电流 J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4

Fig. 4 Rectangular unit metasurface mode currents J_1 , J_2 , J_3 , J_4

对比图 4 和图 5 中 5 GHz 处的表面电流分布可知,超表面切角前后 M_1 与 M_2 模式的电流方向始终相互正交。图 3(a) 中切角前两模式特征角曲线重合,经过切角处理后,特征角曲线有效分离出所需的相位差(图 3(b)),因此切角结构引入后,超表面满足了实现圆极化性能的条件。此

外,图 5 还给出了优化后贴片结构的前 4 阶模式电流的模式远场图。在图 5(a) 中,电流 J_1 和 J_2 在超表面上方向单一,且分别沿 -45° 和 -135° 方向极化。 J_1 和 J_2 的最大电流分布集中在中心贴片。在图 5(b) 中, J_3 和 J_4 的最大电流分布在超表面的非中心贴片位置,另外, J_3 和 J_4 在中心贴片位置上的模式电流远离中心原点,且在三维辐射图中可以观察到辐射主瓣不沿 $+z$ 方向。因此,本文选择模式电流 J_1 和 J_2 作为产生 $+z$ 方向辐射的电流,即选定 M_1 和 M_2 模式为所需模式。而 M_3 和 M_4 在工作频段内容易产生谐振,是会对 M_1 和 M_2 产生干扰的模式,因此,馈电结构设计应增加对 M_1 和 M_2 的激励,减少对 M_3 和 M_4 的激励。



(b) M_3 , M_4 表面电流 J_3 , J_4 及其辐射方向图

图 5 切角单元超表面模式表面电流及其辐射方向图

Fig. 5 Plot of surface currents and their radiation directions for metasurface mode of the chamfering unit

2 圆极化天线设计

图6给出了天线结构的整体示意图,两层介质基板采用的是相对介电常数为4.4的FR4薄基材。超表面如图6(a)所示,位于天线结构的顶层,采用图1(a)中边长为 w ,单元间距为 g 的 4×4 方形贴片单元,每个超表面矩形单元在对角处进行了对称切角,呈现出六边形形状,切后的边长值为 b 。

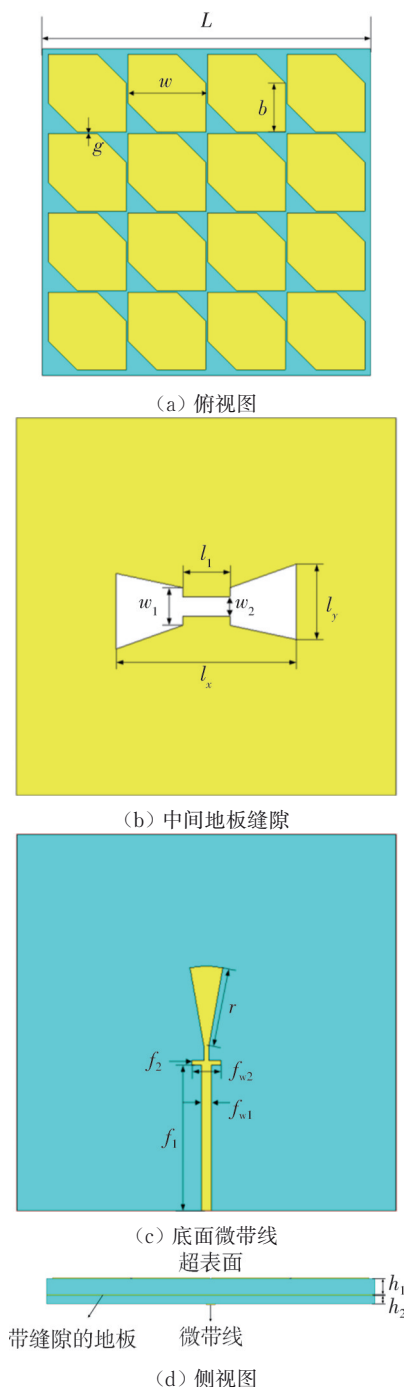


图6 圆极化天线设计

Fig. 6 Circularly polarised antenna design

图6(b)为位于两层介质基板之间的金属地板,其中心位置是两个梯形所连接的缝隙,整个缝隙长 l_x ,宽 l_y 。图6(c)所示为在底层表面的扇形微带馈线,用于激励超表面。根据特征模分析得出的结论,馈电的主要工作是对 M_1 和 M_2 进行激励,减少对 M_3 和 M_4 的激励。如图5所示, M_1 和 M_2 超表面表面电流集中在中心贴片,而 M_3 和 M_4 超表面表面电流集中在周边贴片,因此,微带线在中心区域馈电并且孔径缝隙在中心的耦合馈电方式有利于激励所需模式。在图6(c)中,该设计的天线通过下层基板分隔扇形微带线馈电。王泽旭等^[15]报道了扇形微带线会产生更加良好的阻抗匹配。

如图6(b)所示, w_2 为连接双梯形缝隙的中间矩形缝隙的纵轴长度。如图7所示,通过对 w_2 参数进行扫描,发现 w_2 对轴比曲线影响很小,3个扫描值的变化可以忽略不计,但 w_2 的减小可显著影响天线反射系数(S_{11}) ≤ -10 dB的阻抗匹配带宽。如图7(a)所示, $w_2=1.1$ mm时,阻抗匹配带宽最宽,对比图7(b),该带宽与轴比带宽在频率较高处不重叠,这使有效带宽减小,进而降低天线性能。

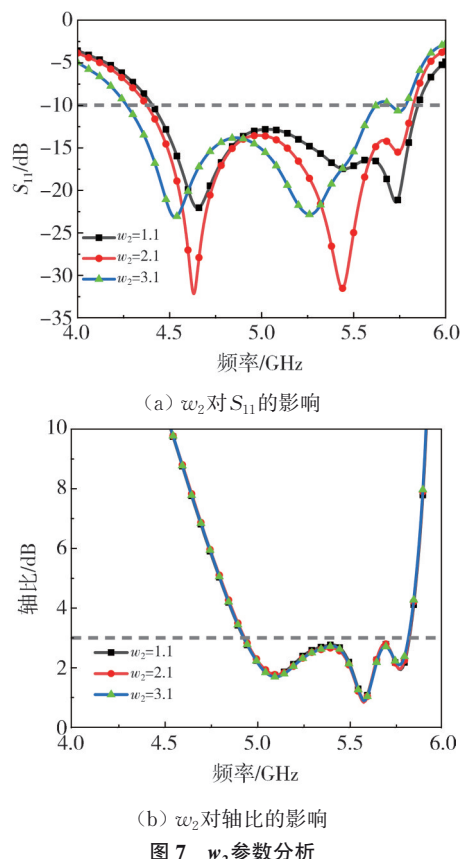


图7 w_2 参数分析

Fig. 7 Analysis of w_2 parameter

增加 w_2 会使 S_{11} 带宽减小,但带宽会向低频偏移,使阻抗匹配带宽区域完全包含轴比带宽,因

此增加了有效带宽,进而可提升天线的性能。综上所述,既要 S_{11} 带宽相对增加,又要满足阻抗匹配带宽与轴比带宽重叠, $w_2=2.1$ mm 为最优选择。

l_x 为地板缝隙横轴方向的全长。如图 8 所示,对 l_x 参数进行优化,发现 l_x 参数对轴比带宽影响较大。 $l_x=15$ mm 时,轴比曲线波动较大,带宽中间一小部分未低于 3 dB,不满足设计要求; $l_x=23$ mm 时,轴比曲线突起处及其附近区域大于 3 dB,同样未满足圆极化性需要求; $l_x=19$ mm 时,整个曲线下凹处都低于 3 dB,实现了圆极化宽带性能对轴比的要求。因此, l_x 的最终参数为 19 mm,可实现良好的圆极化宽带的性能。天线全部参数的最终优化值如表 1 所示。

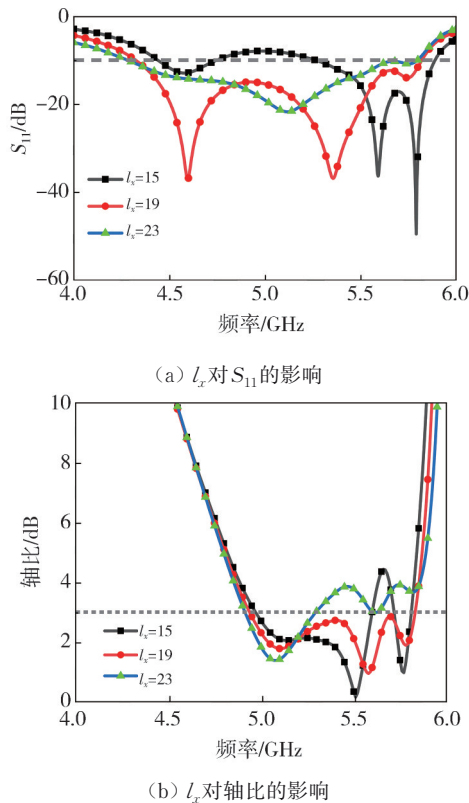


图 8 l_x 参数分析

Fig. 8 Analysis of l_x parameter

表 1 天线尺寸参数

Tab. 1 Antenna size parameters

参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm
L	40.0	l_y	15.5
w	9.5	r	11.0
g	0.2	f_1	16.8
b	6.0	f_{w1}	1.1
w_1	4.0	f_2	0.5
w_2	2.1	f_{w2}	3.0
l_1	5.0	h_1	0.6
l_x	19.0	h_2	2.0

3 仿真结果

3.1 时域仿真结果

在仿真软件 CST 中,该天线设计具备优异的性能。如图 9 所示,其在一 10 dB 阻抗带宽范围内达到了 29.8%, 3 dB 轴比带宽为 17.8%。在阻抗带宽范围内,天线增益曲线变化平稳,最高增益为 7.89 dBi,同时实现了 83.5% 的峰值辐射效率。

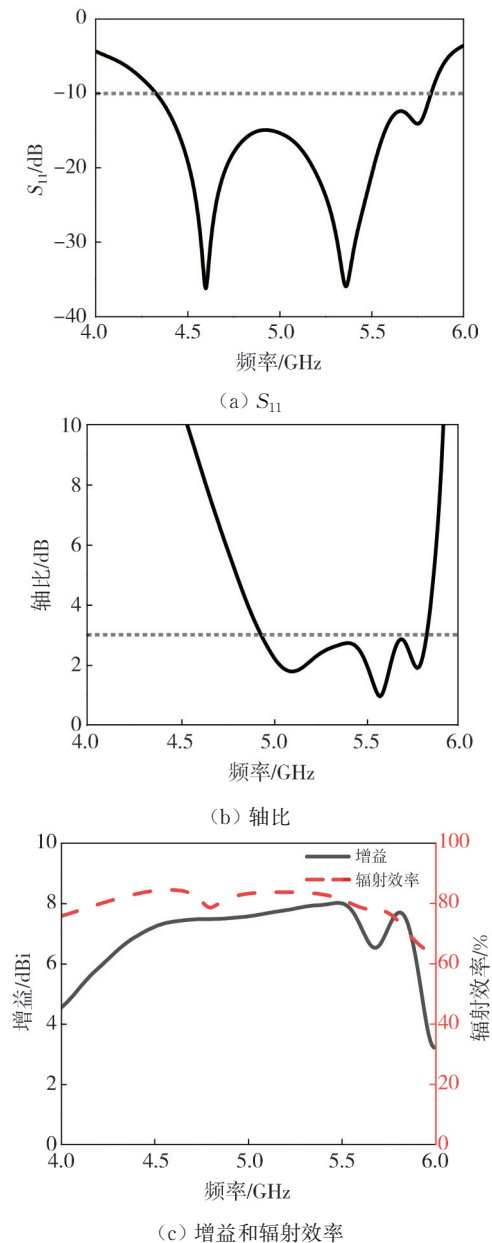


图 9 圆极化天线性能

Fig. 9 Circularly polarised antenna performance

3.2 远场分析

为了研究天线圆极化的远场特性,本文利用

CST 仿真软件对天线 5.0 GHz 和 5.5 GHz 的远场辐射特性进行了仿真分析。仿真结果包括天线处于这两个频率时分别在 E 面和 H 面右旋圆极化 (Right-Hand Circular Polarization, RHCP) 和左旋圆极化 (Left-Hand Circular Polarization, LHCP) 的辐射方向图。

如图 10(a) 所示, 天线在中心频率 5.0 GHz 处展现出优异的 RHCP 特性。LHCP 明显弱于

RHCP, 因此该天线圆极化的辐射方式主要是 RHCP 波, 适用于 GPS 等系统。对比图 10(b) 的结果表明, 天线在 E 面和 H 面均具有良好的圆极化性能。由 5.5 GHz 远场辐射图可以发现, 5.5 GHz 频率下的远场特性与 5.0 GHz 频率下的远场特性相近。因此, 本文设计的天线在圆极化工作频带范围 (4.93~5.82 GHz) 内能实现稳定的 RHCP 辐射性能。

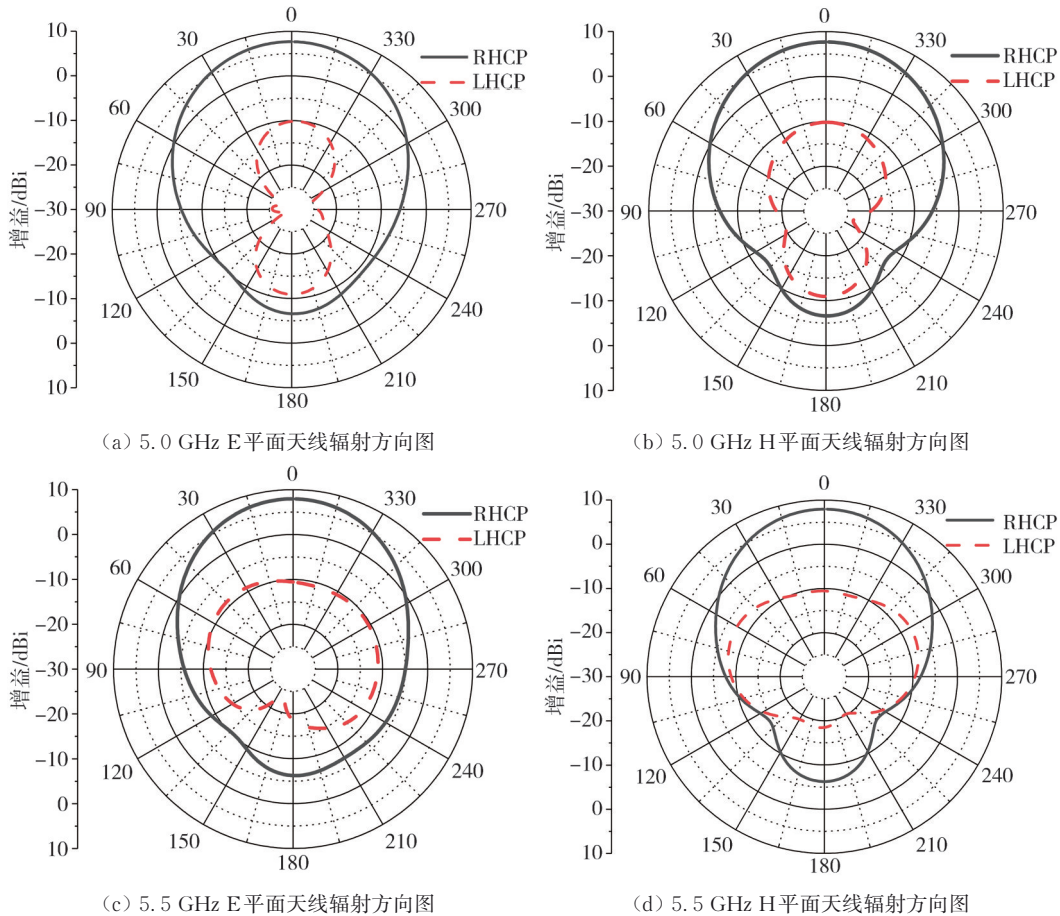


图 10 天线辐射方向图

Fig. 10 Antenna radiation direction diagram

3.3 天线性能对比

如表 2 所示, 本文选取天线尺寸、阻抗匹配带宽、轴比带宽、峰值增益 (G_{peak}) 和辐射效率 (η) 作为核心性能指标, 通过与文献所报道的类似实例对比评估天线的综合性能。

文献[7-8, 15-16, 22, 24-25]未提供辐射效率指标, 本文采用式(6)和式(7)计算这些文献中天线的辐射效率。

$$\eta = \frac{G_{\text{peak}}}{D_{\text{max}}} \times 100\%, \quad (6)$$

$$D_{\text{max}} \approx 1.64 \times \left(\frac{4\pi A_{\text{eff}}}{\lambda^2} \right), \quad (7)$$

式中: D_{max} 为最大方向性; A_{eff} 为有效辐射面积 (取物理面积的 70%~90%, 本文计算取 80%); λ 为工作波长 (由中心频率计算)。在表 2 中, 计算的数值添加“*”以作区别。

本文超表面单元设计改变了电流方向, 较传统贴片天线^[7,14]减少了 12%~15% 的辐射损耗。相较于文献[13-15, 25]的天线设计, 本天线在保持更小尺寸的同时, 实现了更优的阻抗匹配带宽和圆极化带宽。与尺寸相近的文献[16, 22]相比, 本天线设计在轴比带宽和峰值增益方面具有明显优势。相比于

文献[7]中尺寸相近的天线,本天线在峰值增益和辐射效率方面表现更优。与同样采用CMA设计超表面的天线^[8]相比,虽然 G_{peak} 和 η 性能上具有一定劣势,但通过超表面和馈电结构设计,在阻抗匹配和轴比

带宽性能上优势明显。与文献[24]相比,虽然在阻抗匹配带宽性能稍逊,但是 G_{peak} 和 η 性能上优势明显。综上所述,本文所提天线在小型化的同时展现出较宽的带宽和较高的增益。

表 2 圆极化天线性能与文献对比
Tab. 2 Comparison of circularly polarized antenna performance with literature

来源	中心频率/GHz	电尺寸/ λ^3	10 dB 阻抗带宽/%	3 dB 轴比带宽/%	G_{peak} /dBi	η /%
文献[7]	2.15	$0.71 \times 0.71 \times 0.04$	52.5	31.3	7.01	72.5*
文献[8]	6.5	$0.92 \times 0.92 \times 0.076$	33.6	19.4	9.00	63.7*
文献[13]	27	$1 \times 1 \times 0.04$	23.4	16.8	11.00	95.0
文献[14]	2.53	$1.14 \times 1.14 \times 0.014$	18.6	18.6	5.80	60.0
文献[15]	10	$0.57 \times 0.57 \times 0.16$	23.7	16.1	7.66	48.2*
文献[16]	1.5	$0.38 \times 0.38 \times 0.66$	15.7	11.00	5.50	62.1*
文献[22]	3.4	$0.58 \times 0.58 \times 0.043$	22.0	8.5	6.50	65.2*
文献[23]	2.2	$0.7 \times 0.7 \times 0.068$	16.7	17.4	8.00	96.0
文献[24]	5.0	$0.6 \times 0.49 \times 0.07$	33.7	16.7	5.80	51.4*
文献[25]	5.7	$0.78 \times 0.78 \times 0.06$	19.0	11.4	7.00	58.3*
本文	5.0	$0.67 \times 0.67 \times 0.043$	29.8	17.8	7.89	83.5

注:表2中根据文献数据计算所得数值均标有上标“*”以示区分。

4 结 论

本文采用特征模式分析方法设计了一种宽带圆极化超表面天线。首先,通过特征模式分析设计了超表面切角尺寸,使一对简并模式的谐振频率实现宽带分离,从而满足圆极化宽带的实现条件。同时,天线采用缝隙耦合馈电,在地板中心处设计出的双梯形缝隙在增加对超表面中心辐射效率的同时又更好地激励了所需的特征模式。该天线的尺寸为 $0.67\lambda \times 0.67\lambda \times 0.043\lambda$,阻抗带宽为29.8%,3 dB轴比带宽为17.8%,其具有小型化、低剖面特性,可应用于卫星通信、微波通信等领域。

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] ZHANG Y Q, LI X, YANG L, et al. Dual-band circularly polarized annular-ring microstrip antenna for GNSS applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 615-618.
[2] CASO R, MICHEL A, RODRIGUEZ-PINO M, et al. Dual-band UHF-RFID/WLAN circularly polarized antenna for portable RFID readers [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62 (5): 2822-2826.

[3] LI K, LI L, CAI Y M, et al. A novel design of low-profile dual-band circularly polarized antenna with meta-surface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1650-1653.
[4] FENG G, CHEN L, WANG X, et al. Broadband circularly polarized crossed bowtie dipole antenna loaded with parasitic elements[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(1): 114-117.
[5] HUSSAIN N, TRAN H H, LE T T. Single-layer wideband high-gain circularly polarized patch antenna with parasitic elements[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2020, 113: 152992.
[6] XU Y X, GONG S X, GUAN Y. Design of a double feed circularly polarized rectangular microstrip patch antenna on a circular asymmetrical carrier [C]//2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2012: 1-4.
[7] LIU S, YANG D, PAN J. A low-profile broadband dual-circularly-polarized metasurface antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(7): 1395-1399.
[8] DING K, HONG R, GUAN D, et al. Broadband circularly polarised stacked antenna with sequential-phase feed technique [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2020, 14(8): 779-784.
[9] 韩国瑞, 张倩, 陈新伟, 等. 一种宽带圆极化缝隙天线的研究与设计[J]. 测试技术学报, 2024, 38(2): 129-138.
HAN Guorui, ZHANG Qian, CHEN Xinwei, et al. Research and design of a wideband circularly polarized slot antenna [J]. Journal of Test and Measurement

- Technology, 2024, 38(2): 129-138. (in Chinese)
- [10] LIU J, LI J Y, XU R, et al. Design of polarization reconfigurable antenna based on rotatable metasurface [C]//2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2019: 1-4.
- [11] ZHOU E, CHENG Y, CHEN F, et al. Low-profile high-gain wideband multi-resonance microstrip-fed slot antenna with anisotropic metasurface[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2022, 175: 91-104.
- [12] ZHOU E, CHENG Y, CHEN F, et al. Wideband and high-gain patch antenna with reflective focusing metasurface [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2021, 134: 153709.
- [13] HUSSAIN N, JEONG M J, ABBAS A, et al. Metasurface-based single-layer wideband circularly polarized MIMO antenna for 5G millimeter-wave systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 130293-130304.
- [14] LIU T, LIU L, CHEN H, et al. A broadband circularly polarized antenna based on transparent conformal metasurface [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(12): 3197-3201.
- [15] 王泽旭, 马令坤, 云宇, 等. 新型环绕寄生结构的宽频带圆极化超表面天线设计与研究[J]. 陕西科技大学学报, 2025, 43(6): 166-174.
- WANG Zexu, MA Lingkun, YUN Yu, et al. Design and research of wideband circularly polarized metasurface antenna with novel surrounding parasitic structure [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2025, 43(6): 166-174. (in Chinese)
- [16] NASIMUDDIN, QING X. A miniaturized wideband circularly polarized antenna using metasurface [C]//2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2022: 1-5.
- [17] HARRINGTON R, MAUTZ J. Theory of characteristic modes for conducting bodies[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1971, 19(5): 622-628.
- [18] ZENG J, LIANG X, HE L, et al. Single-fed triple-mode wideband circularly polarized microstrip antennas using characteristic mode analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(2): 846-855.
- [19] GAO X, TIAN G, SHOU Z, et al. A low-profile broadband circularly polarized patch antenna based on characteristic mode analysis [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(2): 214-218.
- [20] CABEDO-FABRES M, ANTONINO-DAVIU E, VALERO-NOGUEIRA A, et al. The theory of characteristic modes revisited: a contribution to the design of antennas for modern applications[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(5): 52-68.
- [21] CHEN Y, WANG C F. Characteristic modes: theory and applications in antenna engineering [M]. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [22] JUAN Y, YANG W, CHE W. Miniaturized low-profile circularly polarized metasurface antenna using capacitive loading [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(5): 3527-3532.
- [23] DICANDIA F A, GENOVESI S. Characteristic modes analysis of non-uniform metasurface superstrate for nanosatellite antenna design [J]. IEEE Access, 2020, 8: 176050-176061.
- [24] WU Z, LI L, LI Y, et al. Metasurface superstrate antenna with wideband circular polarization for satellite communication application [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 15: 374-377.
- [25] LIU Y, HUANG Y X, LIU Z W, et al. A new broadband circularly polarized antenna with a single-layer metasurface[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2020, 30(7): e22226.