

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.03.009

## 一种宽带双圆极化印刷单极子天线

齐吉全<sup>1</sup>, 姜兆能<sup>1,2</sup>, 赵晓燕<sup>1</sup>, 王异玄<sup>1</sup>, 梁辉<sup>1</sup>, 孟帅<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601; 2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:**文章设计一种宽带双圆极化印刷单极子天线, 并进行加工制造和测试。天线整体尺寸为 35.0 mm×35.2 mm×0.5 mm, 主体结构由倾斜开槽的半圆单极子贴片和开槽的金属地组成, 可以实现天线优异的圆极化特性, 仿真和实测结果表明, 该天线  $S_{11} < -10$  dB 的阻抗带宽高达 65.8% (3.00~5.94 GHz), 3 dB 轴比带宽为 61.3% (2.92~5.50 GHz); 将上述天线单元顺序旋转和平移, 制作四端口宽带双圆极化天线阵列, 仿真和测量结果表明, 天线阵列在  $S_{11} < -10$  dB 时阻抗带宽达到 74.2% (2.80~6.10 GHz), 3 dB 轴比带宽为 52.6% (3.50~6.00 GHz)。2 种天线的仿真和测试结果高度一致, 验证了文章设计理念的正确性。

**关键词:**宽带; 圆极化; 单极子; 四端口; 阵列

中图分类号: TN822.3

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)03-0348-05

### A wideband dual circularly polarized printed monopole antenna

QI Jiquan<sup>1</sup>, JIANG Zhaoneng<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiaoyan<sup>1</sup>, WANG Yixuan<sup>1</sup>, LIANG Hui<sup>1</sup>, MENG Shuai<sup>1</sup>

(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In this paper, a wideband dual circularly polarized printed monopole antenna is designed, manufactured, and tested. The overall size of the antenna is 35.0 mm×35.2 mm×0.5 mm. The main structure of the antenna is composed of an inclined slotted semicircular monopole patch and slotted ground layer, which is very helpful for the antenna to achieve excellent circular polarization characteristics. The simulated and measured results show that the  $S_{11} < -10$  dB impedance bandwidth is as large as 65.8% (3.00-5.94 GHz), and the 3 dB AR bandwidth is 61.3% (2.92-5.50 GHz). On the basis of the above antenna unit, after sequential rotation and translation, a four-port wideband dual circularly polarized antenna array is also fabricated and measured. The antenna array exhibits a  $S_{11} < -10$  dB impedance bandwidth of 74.2% (2.80-6.10 GHz) and a 3 dB AR bandwidth of 52.6% (3.50-6.00 GHz). The simulated and measured results of the two antennas are highly consistent, which validates the correctness of the design concept.

**Key words:** wideband; circular polarization; monopole; four-port; array

通信技术的不断发展对无线系统的容量和数据传输速率提出了更高的要求。天线作为无线系统的重要组成部分, 如何实现天线的宽带化一直是研究的重点。微带圆极化天线不仅具有尺寸小、剖面低等优点, 还具有旋转的正交性以及接受

任意入射波和较强的抗干扰能力, 但也存在阻抗带宽窄的缺点。因此, 扩展微带圆极化天线带宽的研究具有重要意义。

目前, 国内外关于实现微带圆极化天线宽带化的研究中有许多巧妙的结构和方法<sup>[1-14]</sup>。为了

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-05-05

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(2208085MF161); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2021HGTA0144)和合肥工业大学教师计划资助项目(JZ2019HGTB0093)

作者简介: 齐吉全(1997—), 男, 安徽宣城人, 合肥工业大学硕士生;

姜兆能(1985—), 男, 江苏连云港人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: jiangzhaoneng@hfut.edu.cn.

扩大圆极化天线的带宽,学者们研究了多种天线形式,如介质谐振器<sup>[1]</sup>、交叉偶极子天线<sup>[2]</sup>等,这些天线结构简单、损耗低,但其高剖面限制了实际应用。文献[3-6]采用不同结构的馈电贴片来实现圆极化天线,如半圆形贴片<sup>[3]</sup>、剑形贴片<sup>[4]</sup>、L形贴片<sup>[5]</sup>和倾斜 d 形贴片<sup>[6]</sup>,这些天线均具有较宽的阻抗带宽和 3 dB 轴比带宽。文献[7]采用圆形金属罩和多个金属贴片设计了一种高增益双圆极化天线,其圆极化带宽达到 14%,但剖面过高。这些新型圆极化天线具有很好的参考和研究价值,对许多宽带通信系统的应用也有很大影响。

本文设计制作一种简单的宽带双圆极化印刷单极子天线,选择倾斜 d 形单极子作为主要辐射贴片产生圆极化。将上述天线经过顺序旋转和平移组成四端口阵列结构,以提高天线增益。

### 1 圆极化辐射机理

假设平面电磁波沿 z 轴传播,电场矢量分布在 xOy 平面上。一般情况下,电场矢量可以分解为沿 x 方向和沿 y 方向 2 个电场分量。天线圆极化电场示意图如图 1 所示。

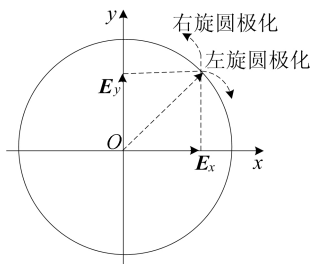


图 1 圆极化电场示意图

瞬时电场可以表示为:

$$\mathbf{E}(t) = E_x(t)\mathbf{i} + E_y(t)\mathbf{j} \quad (1)$$

$$E_x(t) = E_1 \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \quad (2)$$

$$E_y(t) = E_2 \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \quad (3)$$

其中:  $E_1$ 、 $E_2$  分别为电场在 2 个或正交方向分量上的电场幅值;  $\varphi_x$ 、 $\varphi_y$  分别为对应的 2 个电场分量的初始相位。

当  $|E_x| = |E_y| = E_0$  时, x 轴与 y 轴分量的相位差满足如下关系:

$$\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_y = \pm \left(\frac{1}{2} + 2n\right)\pi \quad (4)$$

2 个分量复合场振幅为:

$$|\mathbf{E}(t)| = E_0 \quad (5)$$

x 轴与电场矢量的夹角  $\alpha$  为:

$$\alpha = \pm \arctan \left| \frac{E_y}{E_x} \right| = \mp(\omega t - kz + \varphi_x) \quad (6)$$

由式(6)可知,电场矢量的端点在 1 个时间周期内变化的轨迹为 1 个圆,因此定义其为圆极化波。

### 2 天线单元设计

本文所设计的宽带双圆极化印刷单极子天线的俯视图、侧视图和实物图如图 2 所示。

天线单元由倾斜开槽半圆贴片和改进的金属地组成,介质为 0.5 mm 的方形 F4B 基板材料 ( $\epsilon_r = 2.65, \tan \delta = 0.002$ )。为了匹配阻抗,引入阻抗变换器,该阻抗变换器与 X 轴夹角为  $135^\circ$ 。通过半圆形辐射贴片与金属地上开的圆槽的耦合作用,形成幅值相同、相位差为  $90^\circ$  的圆极化模式。考虑到天线元件和阵列在实际测量时需要用金属夹固定,为避免天线金属贴片部分与金属固定件接触对实验结果的影响,设计了半径为  $R_3$  的槽结构。通过适当调整接地平面圆槽的大小和位置,可以获得更宽的轴比带宽。天线的参数见表 1 所列。

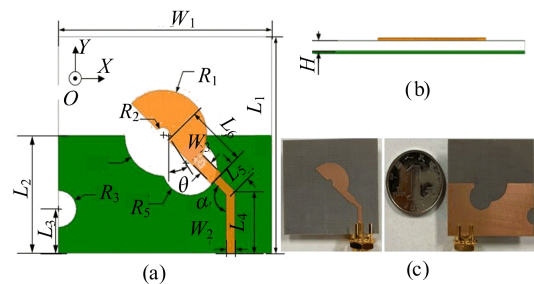


图 2 天线单元结构图

表 1 天线参数值 单位:mm

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
$L_1$	35.2	$L_5$	3.6	$W_3$	2.3	$R_1$	6.6
$L_2$	19.1	$L_6$	10.0	$R_1$	7.2	$R_5$	4.5
$L_3$	7.2	$W_1$	35.0	$R_2$	1.2	$H$	0.5
$L_4$	10.1	$W_2$	1.4	$R_3$	3.0		

本文天线工作在 4 GHz 时的表面电流分布如图 3 所示,由此确定所提出的天线辐射圆极化波的极性。半圆形辐射贴片沿 X 轴倾斜  $135^\circ$  产生圆极化模式,而地板上的圆形槽主要用于调节天线的阻抗匹配和圆极化性能。合成矢量  $\mathbf{J}_{\text{sum}}$  表示倾斜半圆辐射贴片上的表面电流与开槽金属地上电流的矢量和,正交表面电流是辐射圆极化波的必要条件,圆极化波段中的旋转电流均由所提出的倾斜 d 形单极子贴片的表面电流产生。具体来说,当  $t=0$  和  $t=T/4$  时,两者的  $\mathbf{J}_{\text{sum}}$  相互正交,并随着  $t$  的增加顺时针旋转,因此在 +Z 和

-Z方向上,天线分别辐射左旋圆极化波和右旋圆极化波。

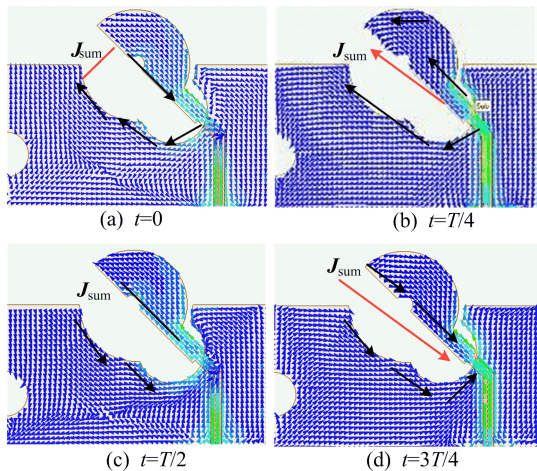


图 3 天线工作在 4 GHz 时的表面电流分布

### 2.1 辐射贴片半径 $R_1$

当改变辐射贴片半径  $R_1$  时,会对天线的  $S_{11}$  参数和轴比产生影响,结果如图 4 所示。

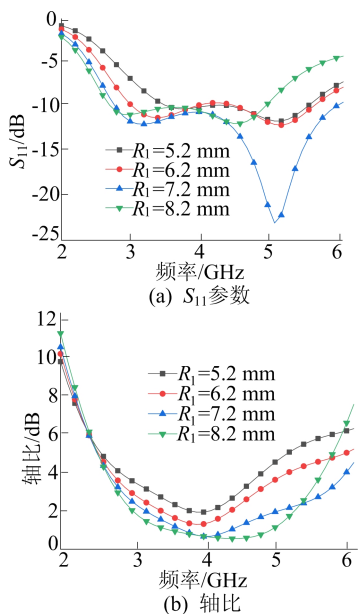


图 4 参数  $R_1$  对天线性能的影响

从图 4 可以看出:随着  $R_1$  的增大, $S_{11}$  曲线峰值逐渐向低频偏移,轴比带宽随之增大;当  $R_1$  增加到 8.2 mm 时, $S_{11}$  参数和轴比同时变差。经过参数分析, $R_1$  最佳尺寸为 7.2 mm,此时阻抗匹配和轴比带宽同时达到最佳效果。

### 2.2 金属地圆槽半径 $R_5$

$S_{11}$  和轴比随  $R_5$  变化的情况如图 5 所示。

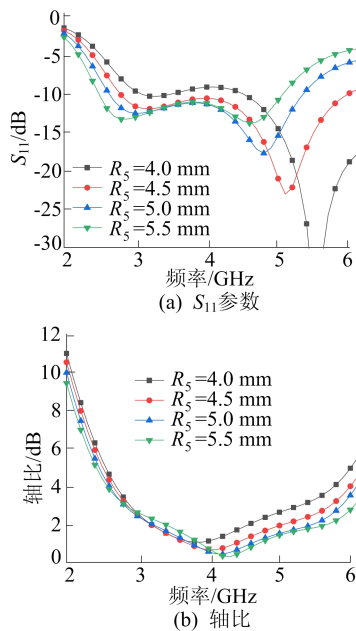


图 5 参数  $R_5$  对天线性能的影响

从图 5 可以看出,金属地圆槽半径  $R_5$  的值对  $S_{11}$  和轴比性能都有影响。随着  $R_5$  的增大, $S_{11}$  曲线峰值逐渐向低频偏移,在高频处  $S_{11}$  却增大;同时,3 dB 轴比带宽得到了明显拓宽。从测试结果可以看出,当  $R_5$  的参数值为 4.5 mm 时,阻抗和轴比带宽同时达到最佳。

### 2.3 圆形槽位置 $\theta$

圆形槽位置  $\theta$  (圆形槽与 Y 轴夹角) 的改变对天线性能的影响如图 6 所示。

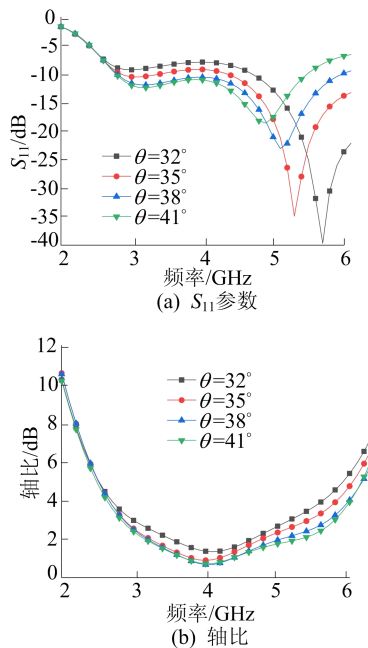


图 6 参数  $\theta$  对天线性能的影响

从图 6 可以看出,当圆形槽逐渐向右上方移动时,即  $\theta$  值增大,  $S_{11}$  在低频处减小,在高频处增大,整体阻抗带宽增大,与此同时,轴比带宽也在不断增加。综合考虑  $\theta$  值对参数  $S_{11}$  和轴比带宽的影响,  $\theta$  值取为  $38^\circ$ 。

### 3 天线阵列

天线阵列的结构如图 7 所示。图 7 中:  $D=22.0\text{ mm}$ ;  $W=79.2\text{ mm}$ ;  $W_f=22.1\text{ mm}$ 。

天线阵列工作时,各端口同时施加等幅的且相位差为  $90^\circ$  的激励。可以看出,与天线单元相比,天线阵列的物理结构更加对称,同时可以获得更高的增益。

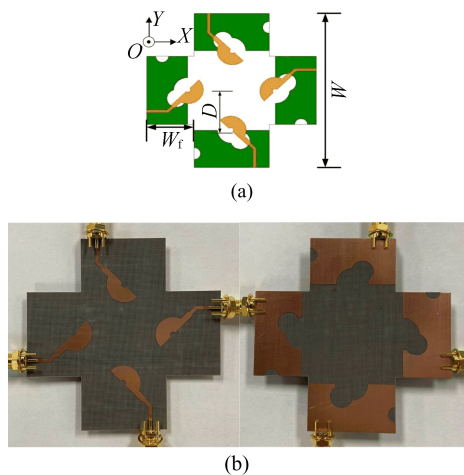


图 7 天线阵列结构

### 4 天线仿真与实测结果分析

本文设计的天线单元轴比及阻抗带宽仿真与实测结果如图 8 所示。通过矢量网络分析仪(型号 ZNA43)以及微波暗室对设计制作的天线实物进行测试。

图 8a 所示的仿真阻抗匹配带宽高达  $68.2\%$  ( $2.90\sim 5.90\text{ GHz}$ ),实测的阻抗带宽为  $65.8\%$  ( $3.00\sim 5.94\text{ GHz}$ )。图 8b 所示的仿真和实测轴比带宽达到  $61.3\%$  ( $2.92\sim 5.50\text{ GHz}$ )。

由于天线加工误差、测试环境等因素的存在,仿真和实测结果略有不同。在排除外部因素(如加工精度、试验环境等)后,可以认为仿真结果与实测结果一致。

对于天线阵列,因为每个端口是对称的,所以每个端口的仿真和实测结果是相同的,这里只给出端口 1 的结果。天线阵列轴比及阻抗带宽仿真与实测结果如图 9 所示。

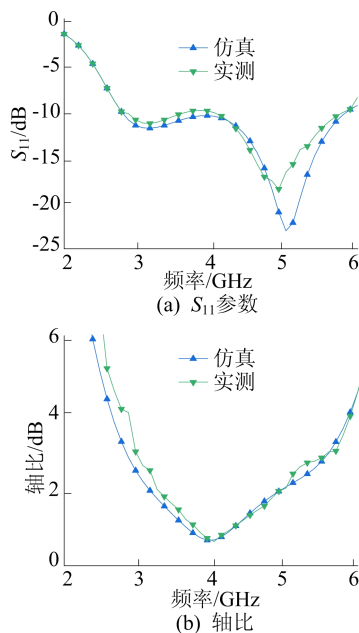


图 8 天线单元轴比及阻抗带宽仿真与实测结果

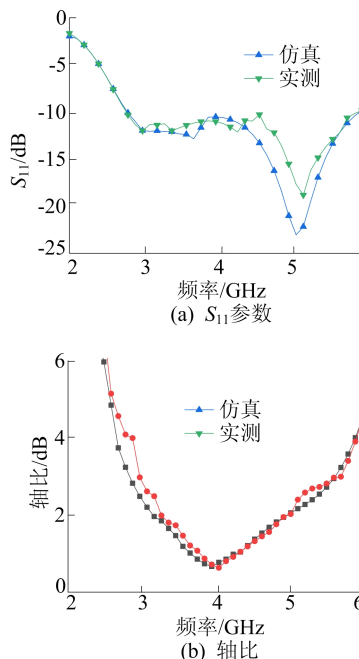


图 9 天线阵列轴比及阻抗带宽仿真与实测结果

从图 9a 可以看出:天线阵列的仿真阻抗带宽在  $2.70\sim 6.30\text{ GHz}$  频段相对带宽约为  $80.0\%$ ;实测的  $S_{11} < -10\text{ dB}$  的阻抗带宽为  $74.2\%$  ( $2.80\sim 6.10\text{ GHz}$ )。从图 9b 可以看出,仿真的  $3\text{ dB}$  轴比带宽为  $3.50\sim 6.00\text{ GHz}$ ,相对带宽为  $52.6\%$ 。

本文天线与其他文献中相似天线的性能对比见表 2 所列。表 2 中:RHCP 表示右旋圆极化; LHCP 表示左旋圆极化;第 2、第 3、第 4 列中数值分别为天线长、宽、厚度与波长  $\lambda_0$  的比值。

表 2 本文天线与相似天线性能对比

参数	长/ $\lambda_0$	宽/ $\lambda_0$	厚度/ $\lambda_0$	阻抗带宽/%	轴比带宽/%	隔离度/dB	极化方式
文献[10]	3.60	3.60	0.12	8.9	1.5	>20	RHCP
文献[11]	0.67	0.67	0.02	66.7	40.0	>25	LHCP
文献[12]	0.33	0.33	0.01	143.9	20.0	>18	LHCP
文献[13]	0.850	0.850	0.013	21.0,9.5	5.5,3.1	>18	RHCP
本文	1.320	1.320	0.008	74.2	52.6	>17	LHCP&RHCP

## 5 结 论

本文设计制作了一种简单的宽带双圆极化印刷单极子天线,并进行了测试。半圆形单极子贴片产生圆极化波,金属地中圆形槽的大小和位置是调节轴比带宽的关键因素。通过天线单元的旋转和平移,设计制作了四端口馈电宽带双圆极化天线阵列。仿真和实测结果表明:该天线单元在  $S_{11} < -10$  dB 时阻抗带宽可达 65.8% (3.00~5.94 GHz),3 dB 轴比带宽可达 61.3% (2.92~5.50 GHz);天线阵列在  $S_{11} < -10$  dB 时阻抗带宽为 74.2% (2.80~6.10 GHz),3 dB 轴比带宽为 52.6% (3.50~6.00 GHz)。

### [参 考 文 献]

- [1] 杨文君,楼建东,雷雪,等.一种新型宽带圆极化介质谐振器天线设计与实现[J].微波学报,2014,30(6):26-30.
- [2] 徐煜思,张福恒,杨国敏.一种超表面宽带圆极化交叉偶极子天线设计[J].复旦学报(自然科学版),2020,59(2):203-207.
- [3] XU R,LI J,LIU J. A design of broadband circularly polarized c-shaped slot antenna with sword-shaped radiator and its array for L/S-band applications[J]. IEEE Access,2018,6:5891-5896.
- [4] ALTAF A,SEO M. A tilted-D-shaped monopole antenna with wide dual-band dual-sense circular polarization[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2018,17(12):2464-2468.
- [5] SAMSUZZAMAN M T,ISLA M,SINGH M J. A compact printed monopole antenna with wideband circular polarization[J]. IEEE Access,2018,6:54713-54725.
- [6] XU R,LI J,LIU J,et al. A design of dual-wideband planar printed antenna for circular polarization diversity by combining slot and monopole modes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2018,66(8):4326-4331.
- [7] 孟军衔,陈明,汪伟.一种高增益双圆极化天线设计[J].信息技术与信息化,2020,245(8):116-118.
- [8] 徐慧文,盛卫星,严彬云.一种 X 波段双圆极化天线的设计[J].火控雷达技术,2019,48(3):83-87.
- [9] KULKARNI J,DESAI A,SIM C Y. Wideband four-port MIMO antenna array with high isolation for future wireless systems[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications,2021,128(1):153507-153520.
- [10] BHADADE S,MAHAJAN S. Circularly polarized MIMO antenna for WLAN applications [J]. Electromagnetics,2019,39(5):325-342.
- [11] IQBAL A,SMIDA A,ALAZEMI A,et al. Wideband circularly polarized MIMO antenna for high data wearable biotelemetric devices[J]. IEEE Access,2020,8:17935-17944.
- [12] KUMAR P,UROOJ S,MALIBARI A. Design of quad-port ultra-wideband multiple-input-multiple-output antenna with wide axial-ratio bandwidth [J]. Sensors,2020,20(4):117-130.
- [13] DWIVEDI A,SHARMA A,SINGH A,et al. Design of dual band four port circularly polarized MIMO DRA for WLAN/WiMAX applications[J]. Journal Electromagnetic Waves and Application,2020,34(15):1990-2000.
- [14] 周涛,张豪,边成,等.多频双圆极化北斗天线设计[J].电子技术应用,2022,48(10):9-12.

(责任编辑 胡亚敏)