

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2312828

# 基于倒S形枝节的宽带圆极化天线设计

王志强<sup>1</sup> 段玥晨<sup>1</sup> 周鹏<sup>2</sup>

(1. 郑州大学机械与动力工程学院 郑州 450001; 2. 广东佛山联创工程研究生院 佛山 528311)

**摘要:** 为满足无线通信日益增长的带宽需求,扩展圆极化微带天线阻抗带宽和轴比带宽的同时保持无线设备的小型化,本文基于微带缝隙天线提出了一种宽带圆极化微带天线的设计。该天线整体尺寸为 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 1.6\text{ mm}$ ,顶部结构为倒S形枝节,采用偏心侧馈的馈电方式,通过在微带线上加载矩形短截线改善天线的阻抗匹配,扩展了天线的阻抗带宽,在接地板上切角、挖槽扩展了天线的轴比带宽。测量结果表明,天线的 $-10\text{ dB}$ 阻抗带宽为 $62.1\%$ ( $5.14\sim 9.81\text{ GHz}$ ), $3\text{ dB}$ 轴比带宽为 $63.9\%$ ( $4.43\sim 8.59\text{ GHz}$ )。该天线具有小型、宽频带的特性,适用于 $5.8\text{ GHz}$ 频段和WiFi-6E频段的无线通信系统中。

**关键词:** 宽带;圆极化;微带天线;轴比;倒S形枝节

**中图分类号:** TN821 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

## Design of broadband circularly polarized antenna based on inverted S-shaped branch

Wang Zhiqiang<sup>1</sup> Duan Yuechen<sup>1</sup> Zhou Peng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Guangdong Foshan Lianchuang Graduate School of Engineering, Foshan 528311, China)

**Abstract:** In order to meet the increasing bandwidth requirements of wireless communication, expand the impedance bandwidth and axial ratio bandwidth of circularly polarized microstrip antenna while maintaining the miniaturization of wireless equipment, this paper proposes a design of broadband circularly polarized microstrip antenna based on microstrip slot antenna. The overall size of the antenna is  $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 1.6\text{ mm}$ , the top structure is an inverted S-shaped branch, and the eccentric side feeding mode is adopted. The impedance matching of the antenna is improved by loading a stub on the microstrip line, which expands the impedance bandwidth of the antenna, and the axial ratio bandwidth of the antenna is expanded by chamfering and trenching the ground plate. The measured results show that the  $-10\text{ dB}$  impedance bandwidth of the antenna is  $62.1\%$  ( $5.16\sim 9.81\text{ GHz}$ ), and the  $3\text{ dB}$  axis specific bandwidth is  $63.9\%$  ( $4.43\sim 8.59\text{ GHz}$ ). The antenna has the characteristics of small size and wide band, which is suitable for the wireless communication system in the  $5.8\text{ GHz}$  band and WiFi-6E band.

**Keywords:** broadband; circular polarization; microstrip antenna; axial ratio; inverted S-shaped branch

## 0 引言

天线是无线通信系统的重要组成部分,近年来随着无线通信技术的快速发展,圆极化天线广受研究人员和工程师的关注<sup>[1]</sup>。天线的圆极化可由2个相互正交的线极化合成,当2个正交极化波振幅相同,相位相差 $90^\circ$ 时,就形成了圆极化波。相较于线极化天线,圆极化天线具有抗多径衰落、受法拉第旋转变效应影响小以及易进行极化匹配的特性<sup>[2]</sup>,其抗干扰能力更强,目前已广泛应用于卫星通信、射频识别、生物医学等无线通信的各个领域<sup>[3]</sup>。微带天线具

有体积小、剖面低、易集成、成本低等优点,但也存在阻抗带宽较窄的固有缺点<sup>[4]</sup>,实现微带天线的圆极化和宽带化是微带天线的研究方向之一。文献[5]在接地板上挖出两个同心环型槽,在环型槽的 $45^\circ$ 角位置加载两个不同的弯曲结构产生圆偏振辐射;文献[6]提出一种弯曲馈电结构和刻蚀在底板的3个不同形状的槽,十字槽、倒F形槽和倒L形槽激发两个 $90^\circ$ 相位差的电场,产生圆极化波,在微带线附近引入弯曲寄生条带提高天线的轴比带宽;文献[7]采用偏置馈电结构,在辐射贴片上增加倒L形枝节,使其辐射圆极化波,通过添加Y形条带和寄生匹配短截线展宽工作频

收稿日期:2023-02-16

带;文献[8]提出一种四端口的宽带圆极化贴片天线,利用  $TM_{11}$  和  $TM_{21}$  模式,以及  $TM_{11}$  的正交模式,实现了宽带特性,通过在圆形贴片中部加载短接引脚,对  $TM_{11}$  的偏振正交模进行了适当的激励,实现了带宽的增强,并根据天线的四端口配置利用一个  $180^\circ$  不同相巴伦和两个  $90^\circ$  移相器设计了馈电网络,实现天线的圆极化;文献[9-10]采用共面波导馈电方式,以槽形天线为基础,在微带延长线末端增加倒 L 形寄生带,并修改寄生带与微带线间的狭缝,实现宽带圆极化,改变接地板上槽的结构和尺寸可实现天线工作频带的改变;文献[11]在 C 形单极天线结构中引入 G 形寄生带,形成两个等幅、 $90^\circ$  相位差的正交模,通过调整接地板方槽的尺寸,扩展天线的工作频带;文献[12]采用叠层微带结构展宽阻抗带宽并提高天线增益,馈电网络与激励贴片共面一体化设计,利用顺序旋转四馈技术展宽轴比带宽,获得对称的圆极化辐射性能;文献[13]提出的天线结构简单,采用临近耦合馈电技术,有效扩展天线的带宽,通过加载两个  $90^\circ$  L 形枝节辐射圆极化波;文献[14]提出具有微扰单元宽带圆极化方形缝隙天线,在天线底板切角、挖槽来改变电流分布并在方形接地槽中增加半圆条带引入额外的电流路径,同时激发了多个圆极化谐振模式,使轴比带宽变宽;文献[15]采用金属人工表面结构加载技术,引入叠片元件阵列提高天线的增益,并基于双极正交耦合器设计了对称分布的双端口馈电网络,激发辐射元件,实现宽带双圆极化。

综上所述,实现宽带圆极化的主体思想是改变天线表面电流分布状况,常使用的方法有增加寄生单元、刻蚀缝隙、采用叠层结构、增加馈电网络、多点馈电等,但后几种方法容易增加天线的剖面尺寸和结构设计的难度。基于缩小天线尺寸,降低天线结构复杂度的目的,本文设计了一种宽

带圆极化天线,采用微带线馈电,天线顶部加载倒 S 形枝节,通过在微带馈线上增加短截线改善天线的阻抗匹配,在接地板上切除对角、挖槽的方式,使天线实现宽带圆极化。该天线结构小而紧凑,适用于宽带无线通信系统中。

## 1 天线设计

### 1.1 天线结构

圆极化微带天线的结构如图 1 所示,整体尺寸为  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$ ,介质板材料为 FR4,介电常数 4.4,损耗角正切值 0.02,介质板厚度为 1.6 mm。天线采用微带线馈电,共分为 3 层,上层为微带线和倒 S 形枝节,馈线上部末端加载了矩形枝节,下部末端进行切角处理并刻蚀了一条矩形缝隙,中间是介质板,下层是金属底板,底板中间挖出大方形槽,在两个对角位置作出不同尺寸的三角形切角,在底板馈线位置挖出一个矩形槽。经过优化后最终确定的天线各部分尺寸如表 1 所示。

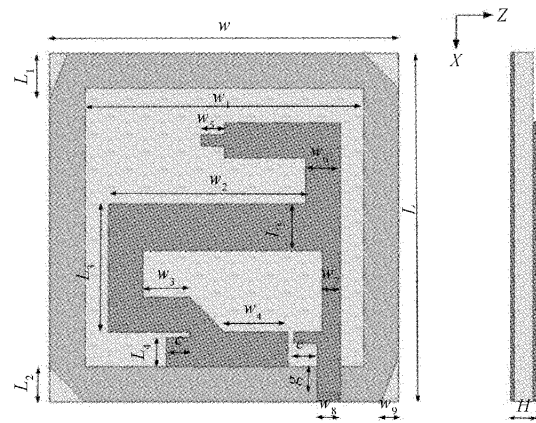


图 1 天线结构

表 1 天线各部分尺寸

										mm
$W$	$L$	$W_1$	$L_1$	$W_2$	$L_2$	$W_3$	$L_3$	$W_4$	$L_4$	
30	30	24	4	17	3	4	11	5.5	4	
$W_5$	$L_5$	$W_6$	$W_7$	$W_8$	$W_9$	$c$	$e$	$g$	$H$	
2	2.5	3	1.6	2	1.5	2	2	2.2	1.6	

为研究微带天线宽频带的形成方法,图 2 给出了天线设计过程中的 4 个步骤。ANT1 为在方形宽槽天线基础上改变顶部馈电枝节的形状及馈电位置,并在倒 S 形枝节末端又加载一矩形枝节得到的天线,ANT2 为在微带线末端和馈线末端分别加载矩形短截线得到的天线,ANT3 为在顶层馈线刻蚀缝隙并切角得到的天线,ANT4 为本文提出的天线。

图 2 中 4 个天线的反射系数曲线和轴比曲线仿真结果如图 3、4 所示。可以看出,ANT1 通过偏移微带线给顶部倒 S 形枝节馈电,激励接地板上的缝隙产生圆极化辐射,使天线在  $5.39 \sim 6.63\text{ GHz}$  内得到一个较窄的 3 dB 轴比

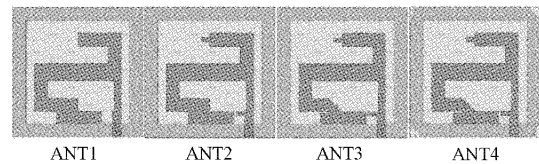


图 2 天线结构设计过程

带宽,此时天线阻抗匹配不佳,阻抗带宽较窄。ANT2 改变了微带线的结构,在微带线上增加短截线使其结构变为倒 L 形,提高了天线的阻抗匹配,工作频段达到  $5.31 \sim 9.08\text{ GHz}$ ,同时天线在  $5\text{ GHz}$  和  $7.8\text{ GHz}$  附近产生两段窄带圆极化。ANT3 在倒 S 形枝节下半部切角及刻蚀缝

隙,此时天线工作频段变化不明显,但轴比得到改善,带宽小幅度增加。ANT4在金属底板对角切角和在对应该微带线位置开槽,破坏了接地板的环形对称结构,显著地扩展了天线的轴比带宽,此时达到了4.43~8.59 GHz,同时天线阻抗带宽为5.16~9.81 GHz。随着轴比带宽的展开,天线在低频处的阻抗匹配特性逐渐变差。

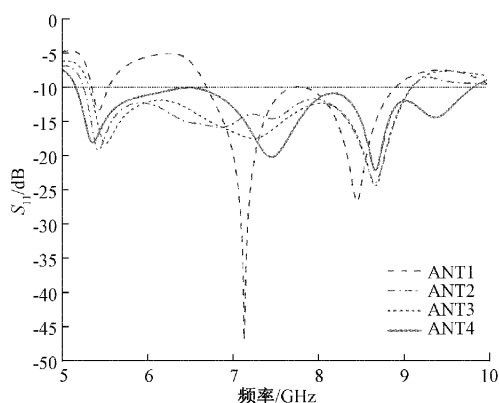


图3 反射系数

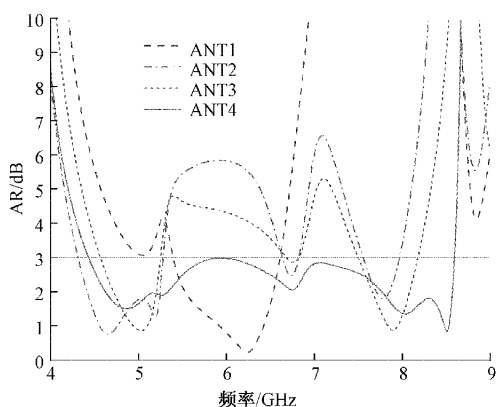


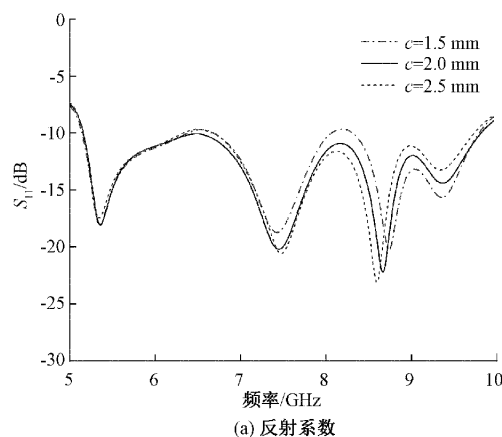
图4 轴比

### 1.2 天线参数分析

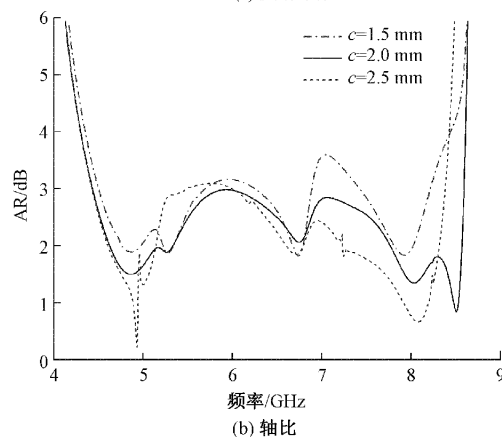
天线设计步骤中采用的增加矩形短截线、开槽、切角这些方式,本质上是在引入微小扰动,改变天线表面电流分布,增加谐振频点。因此在对天线模型进行优化的过程中,针对微扰部分的尺寸,进行了大量的参数扫描分析。在保持天线其他部分尺寸不变的情况下,逐个对天线顶部增加的矩形枝节、倒S形枝节末端倒角、矩形缝隙及底板开槽、切角的尺寸进行参数化扫描分析来观察反射系数与轴比曲线的变化。其中,倒S形枝节末端倒角和底板上的切角虽使得天线辐射缝隙结构发生改变,但对表面电流的分布变化影响较小,天线工作带宽变化不明显,对该部分尺寸参数分析优化内容并非重点。为减少参数分析的复杂度,本文选取贴片上矩形缝隙长度 $c$ 、微带短截线长度 $e$ 和底板矩形槽深度 $g$ 这3个具有代表性的尺寸数值来分析部分参数变化对天线性能的整体影响。

#### 1) 矩形缝隙长度 $c$ 对天线反射系数与轴比的影响

天线反射系数和轴比随参数 $c$ 的变化曲线如图5所示,矩形缝隙长度 $c$ 取值分别为1.5、2.0、2.5 mm。从图5(a)可以看出,随着缝隙长度变大,天线的反射系数在低频段处几乎不受影响,在中高频点发生偏移,图5(b)中轴比在7~8 GHz范围内逐渐展宽。阻抗带宽和轴比带宽都是先增大后减小,当取 $c=2.0$  mm时,天线的阻抗带宽和轴比带宽达到最大。



(a) 反射系数



(b) 轴比

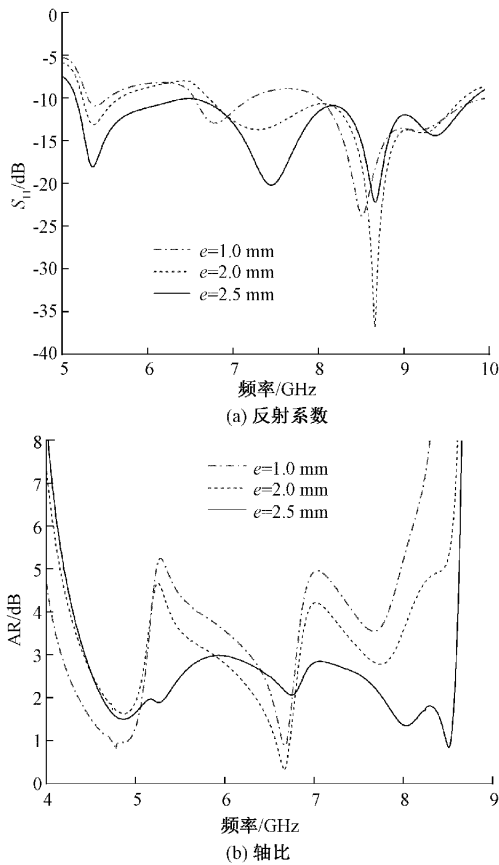
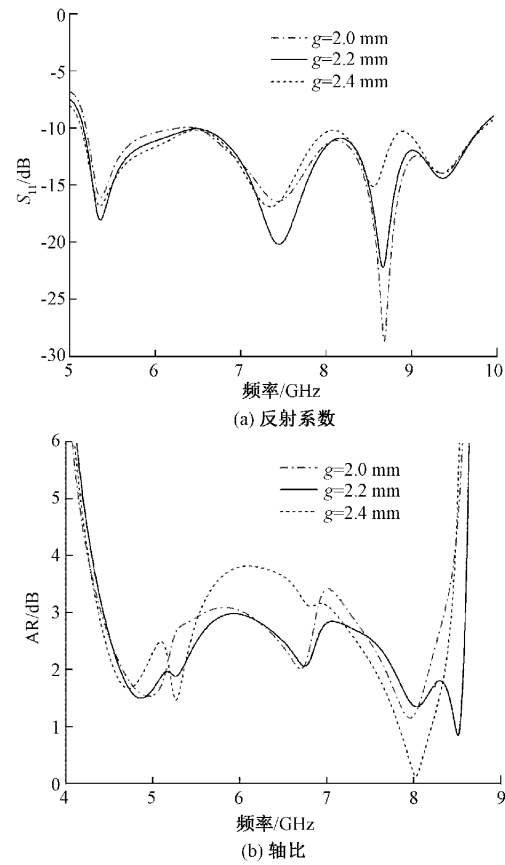
图5 天线反射系数与轴比随参数 $c$ 变化曲线

#### 2) 微带短截线长度 $e$ 对天线反射系数与轴比的影响

天线反射系数和轴比随参数 $e$ 的变化曲线如图6所示,受倒S形枝节结构的影响,微带短截线长度 $e$ 取值分别为1.0、1.5、2.0 mm。从图6(a)可以看出,当短截线长度逐渐增加时微带线上的电流路径延长,对应天线的阻抗带宽逐渐展宽,表明天线在低频段的阻抗匹配正在逐渐变好,同时图6(b)中天线的圆极化工作频段向高频偏移,轴比带宽在逐渐增加。在 $e=2.0$  mm时,天线的阻抗带宽和轴比带宽均达到最大。

#### 3) 底板矩形槽深度 $g$ 对天线反射系数与轴比的影响

天线反射系数和轴比随参数 $g$ 的变化曲线如图7所示,矩形槽深度 $e$ 取值分别为2.0、2.2、2.4 mm。从图7(a)可以看出,随着矩形开槽深度 $g$ 的增加,天线的阻抗带宽先增大后减小,接地板上的水平电流分量发生改

图 6 天线反射系数与轴比随参数  $e$  变化曲线图 7 天线反射系数与轴比随参数  $g$  变化曲线

变,图 7(b)中轴比带宽逐渐扩展。当  $g$  取 2.2 mm 时阻抗带宽和轴比带宽达到最大,槽深度继续增加会使阻抗匹配变差,同时天线的中间工作频段逐渐丧失圆极化特性。

根据上文分析结果可知,天线某一部分尺寸变化会对整体的性能产生影响,微带短截线主要影响天线的阻抗匹配,而矩形缝隙改变了竖直电流分量,底板矩形槽改变了水平电流分量,使天线的圆极化特性更加显著,最终在  $c$ 、 $e$ 、 $g$  三个参数分别取 2.0、2.0、2.2 mm 时天线具有较好的整体性能。

### 1.3 天线圆极化机理

圆极化辐射由两个幅度相同、相位相差  $90^\circ$  的正交电场分量产生。本文中采用单馈电点结构,通过偏置微带馈线的方式,避免接地板上水平电流分量相互抵消,并引入扰动枝节,增强垂直方向电流分量,使天线产生圆极化辐射。图 8(a)~(d)表示了天线一个馈电周期内相位差为  $90^\circ$  时的电流分布,在  $0^\circ$  相位时,接地板上各处分布的电流互相抵消,表面电流主要分布在微带线上和倒 S 枝节的右半部分,合成方向沿右上方向。在  $90^\circ$  相位时,接地板左侧电流相互抵消,表面电流主要分布在微带线上和接地板的右半部分,合成方向沿左上方向。在  $180^\circ$  和  $270^\circ$  相位时天线表面的电流分布分别与  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  相位时的电流分布幅度相同,方向相反,因此合成电流方向分别沿左下、右下方向。

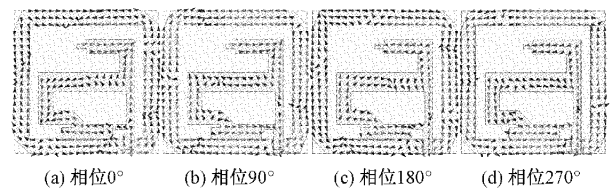


图 8 天线在 6.8 GHz 处表面电流分布

从  $+z$  轴来看,天线表面电流随相位沿逆时针方向变化,因此在 6.8 GHz 时天线在  $+z$  轴方向辐射右旋圆极化波。

## 2 天线测量结果分析

本文提出的圆极化微带天线模型,在设计过程中使用 HFSS 高频结构仿真软件对天线进行仿真和优化,为进一步验证所设计天线的性能以及设计的准确性,按照上文优化后确定的天线尺寸进行了实物加工。图 9 为天线制作实物,表面金属进行喷锡处理,减少表层铜带线氧化,使用矢量网络分析仪和天线测量系统对实物天线进行测量。

图 10、11 表示了天线反射系数和轴比曲线仿真与实测结果的对比。从结果来看,天线在低频处的匹配略微变差,整体工作频段向低频处偏移但变化不大,天线实际测量结果与仿真结果基本吻合,但由于加工制造精度、SMA 接头焊接和介质板介电常数偏差等原因会产生一定的误差。



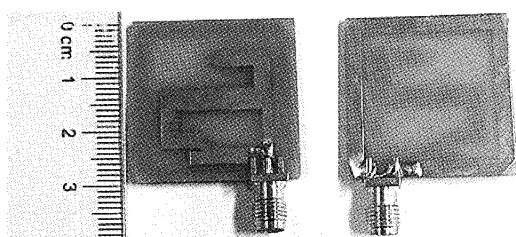


图9 天线制作实物

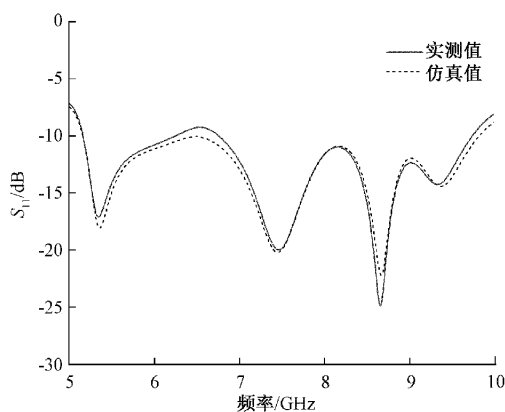


图10 天线反射系数仿真与实测结果

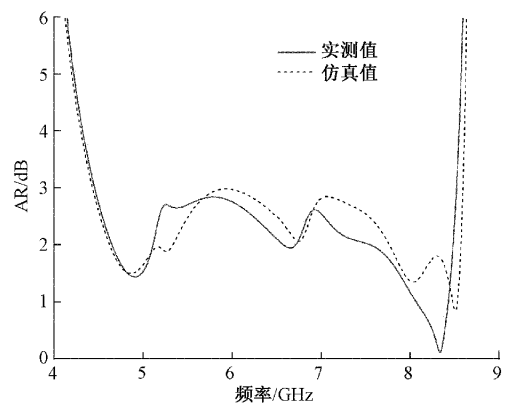


图11 天线轴比仿真与实测结果

天线在 5.8 GHz 处  $xoz$  和  $yoze$  面圆极化辐射增益方向图仿真和测试结果如图 12(a)、(b) 所示,从图中可以看出天线在  $+z$  轴方向辐射右旋圆极化波,在  $-z$  轴方向辐射左旋圆极化波,具有良好的辐射性能。

为更清晰直观地体现天线的性能,选取了参考文献中几种圆极化天线与本文提出的天线进行对比,分别从天线尺寸、 $-10$  dB 阻抗带宽和 3 dB 轴比带宽三方面进行比较,具体结果如表 2 所示。表中各天线介质板材质均为 FR4,采用微带线馈电,文献[4]提出的天线为双馈叠层天线,其余为单馈单层基片结构,剖面高度相近。文献[7]的双圆极化方形缝隙天线在 1.82~6.36 GHz 内有较宽的阻抗带宽,在低频 1.91~3.36 GHz 和高频 4.78~6.41 GHz 处有两段圆极化轴比带宽,但其相对尺寸较大,结构不够紧凑;文献[9]的 MIMO 天线单元有超宽阻抗带宽覆盖了

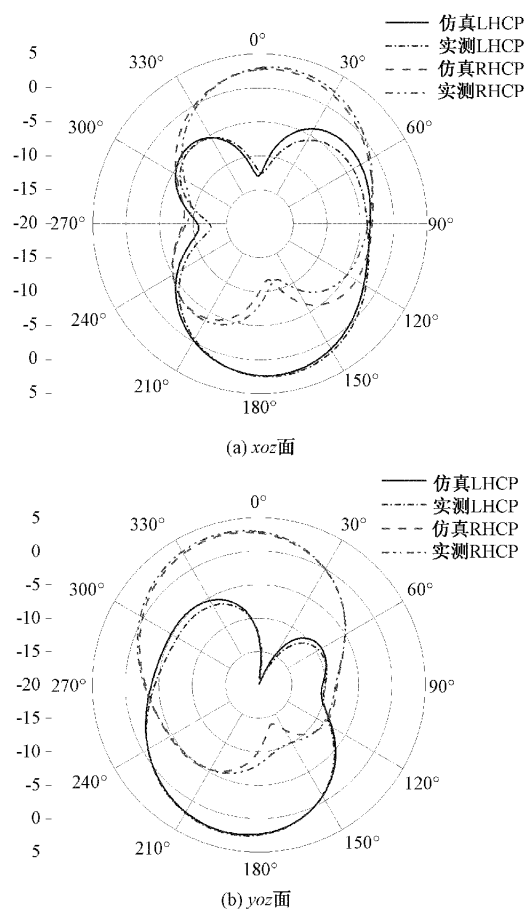


图12 5.8 GHz 处天线归一化辐射方向图

3.17~17.39 GHz,轴比带宽 4.8~8.8 GHz,但其天线表面挖出多个矩形缝隙,结构复杂度较大。对照结果表明,本文设计的天线在保持较小整体尺寸的同时具有较宽的工作带宽,满足宽带无线通信的需求。

表2 本文天线与参考文献中圆极化天线的性能比较

文献	尺寸	阻抗 带宽/%	轴比 带宽/%
[3]	40 mm×40 mm×1.6 mm	46.1	54.7
[4]	47 mm×47 mm×1.2 mm	59.0	40.5
[7]	50 mm×50 mm×1 mm	111.0	55.0,29.3
[9]	40 mm×20 mm×1.6 mm	138.3	58.8
[11]	32 mm×30 mm×1.6 mm	62.9	53.9
本文	30 mm×30 mm×1.6 mm	62.1	63.9

### 3 结 论

本文提出一种小型宽带圆极化微带天线的设计,以方形缝隙微带天线为基础,顶部加载的倒S形枝节,辐射圆极化波,在不增加天线体积的情况下结合增加寄生条带、切角挖槽、构造缝隙3种方式结合来扩展天线的工作带

宽,实现天线的宽带圆极化。天线仿真结果与测量结果基本保持一致,天线-10 dB阻抗带宽为62.1%(5.14~9.81 GHz),3 dB轴比带宽63.9%(4.43~8.59 GHz),工作频带覆盖C波段后部分频段,包含WLAN 5 GHz频段和WiFi-6E频段高频部分,可通过优化顶部枝节结构提高天线的性能。该天线具有良好的辐射方向性,结构紧凑,可用于宽带无线通信系统中。

### 参考文献

- [1] 李振亚,竺小松,张建华. 一种新颖的宽带圆极化单极天线[J]. 电子与信息学报,2018,40(11):2705-2711.
- [2] LIU X, WANG H, YANG X, et al. Quad-band circular polarized antenna for GNSS, 5G and WiFi-6E applications[J]. Electronics, 2022, 11(7): 1133.
- [3] 卢勇杰,单志勇,王亚飞. 小型宽频圆极化天线的设计[J]. 电子测量技术,2018,41(24):23-26.
- [4] 刘凡,赵晓燕,赵宏志,等. 一种新型双圆极化平面微带缝隙天线[J]. 西安电子科技大学学报,2020,47(3):86-91.
- [5] CHENG Y, LIU H. A novel concentric annular-ring slot dual-band circularly polarized microstrip antenna [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2018, 2018: 7560567.
- [6] CHEN T T, ZHANG J G, HUA L. Microstrip open-slot antenna with wideband dual-frequency and dual-sense circular polarization [J]. Progress In Electromagnetics Research M, 2019, 83: 131-140.
- [7] XU R. A simple design of compact dual-wideband square slot antenna with dual-sense circularly polarized radiation for WLAN/Wi-Fi communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(9): 4884-4889.
- [8] LIANG C F. A low-profile and wideband circularly polarized patch antenna based on TM11 and TM21[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(8): 4439-4446.
- [9] JAIVERDHAN. Broadband circularly polarized compact MIMO slot antenna based on strip and stubs for UWB applications [J]. Electromagnetics, 2021, 41(3): 185-195.
- [10] ULLAH U, KOZIEL S. A geometrically simple compact wideband circularly polarized antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(6): 1179-1183.
- [11] MIDYA M. Broadband circularly polarized planar monopole antenna with G-shaped parasitic strip [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(4): 581-585.
- [12] 傅世强,刘璐,房少军. 新型顺序旋转四馈电圆极化叠层微带天线设计[J]. 电子元件与材料,2021,40(10):1047-1051.
- [13] 严冬,程威,郭琪富,等. 一种适用于5G网络的宽带圆极化天线设计[J]. 电子元件与材料,2020,39(9):83-89.
- [14] HAO L C. Novel square slot circularly polarized antenna with broadband characteristics [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering, 2022, 32(1): e22921.
- [15] DING X X. Meta-surface loading broadband and high-aperture efficiency dual circularly polarized patch antenna [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering, 2021, 31(3): e22525.

### 作者简介

王志强,硕士研究生,主要研究方向为射频器件设计。

E-mail: z2279684122@163.com

段玥晨,博士,副教授,主要研究方向为多物理场耦合。

E-mail: duanyc1984@zzu.edu.cn

周鹏(通信作者),工程师,主要研究方向为射频器件设计,医疗器械。

E-mail: zhou19920086@163.com