



·高功率微波技术·

# 用于 5G 移动设备的双频双圆极化毫米波天线设计

杨 旋, 姚代波, 杨承坤, 郭庆功

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

**摘 要:** 设计实现了一种宽带双频双圆极化的毫米波单馈天线, 天线同时在 n257(26.5~29.5 GHz)、n260(37.0~40.0 GHz) 波段工作。与传统的圆极化天线相比, 天线采用上下堆叠的不规则贴片实现了双频双圆极化, 提高了信号收发隔离度; 通过增加弯曲的寄生贴片, 天线拓展了圆极化轴比带宽; 金属边框上的矩形缝隙用来改善天线增益和带宽。测试结果表明, 天线低频和高频的相对阻抗 (<-10 dB) 带宽分别达到 20.4% 和 17.0%, 相对轴比 (<3 dB) 带宽分别达到 14.9% 和 11.4%。天线带宽覆盖 n257、n260 波段, 可以用于 5G 移动设备与低轨卫星的通信。

**关键词:** 双频双圆极化; 毫米波; 低轨卫星通信; 5G 移动设备; 宽带

中图分类号: TN827.4

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230216

## Design of broadband dual-band dual circularly polarized millimeter wave antenna for 5G mobile devices

Yang Xuan, Yao Daibo, Yang Chengkun, Guo Qinggong

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** A broadband dual-band dual circularly polarized millimeter wave single-fed antenna is designed. The antenna operates in n257(26.5–29.5 GHz) and n260(37.0–40.0 GHz) bands simultaneously. Compared with the traditional circularly polarized antenna, irregular patches stacked up and down are used to realize dual-band dual-circular polarization and improve the isolation of signal reception and transmission. By adding a curved parasitic patch, the antenna extends the axial ratio bandwidth. Rectangular gaps in the metal-frame are used to improve the antenna gain and expand the antenna bandwidth. The measurement results show that the relative impedance (<-10 dB) bandwidth at low frequency and high frequency are 20.4% and 17.0% respectively, and the relative axial ratio (<3 dB) bandwidth of dual-band dual-circular polarization are 14.9% and 11.4% respectively. The antenna bandwidth covers n257 and n260 bands, which can be used for communication between 5G mobile devices and LEO satellites.

**Key words:** dual-band dual circularly polarized, millimeter wave, LEO satellite communication, 5G mobile equipment, broadband

随着近年来第五代移动通信(5G)技术的发展,无线设备和移动应用数量指数增长,当前的无线频谱变得拥挤,可供使用的频率资源稀缺。毫米波(MM-Wave)波段在解决上述问题方面引起了巨大的关注,毫米波设施能够支持更好的数据速度、更高的聚合容量、更低的延迟,以及由于带宽增加而带来的许多新功能<sup>[1-4]</sup>。

由于毫米波频段的信号易衰减的特点,在地面进行毫米波信号传输需要建设大量的基站,成本过高且偏远地区很难覆盖到信号,采用低轨卫星(LEO satellite)直接与移动设备直接进行通信逐渐受到人们的关注<sup>[5-6]</sup>。低轨卫星与地面设备通信多采用双频双圆极化天线,以提高极化效率和信号接收发射的隔离度<sup>[7-11]</sup>。文献[8]提出了一种基于不对称槽环和L形微带的双频双圆极化天线,天线相对阻抗带宽分别为14.7%和28.4%,相对轴比带宽(轴比AR<3 dB所对应的工作带宽)分别为8.8%、4.5%,结构简单但带宽性能较窄。文献[11]提出了一种宽带双频双圆极化方形缝隙天线,天线的 $S_{11}$ 相对阻抗带宽为114.7%,相对轴比带宽分别为60.2%(1.8~3.3 GHz)和32.7%(4.6~

\* 收稿日期:2023-07-11; 修订日期:2023-09-12  
基金项目:国家自然科学基金项目(U19A2054)  
联系方式:杨 旋, abc15237979332@163.com。  
通信作者:郭庆功, guoqingong@scu.edu.cn。

6.4 GHz), 性能极佳, 但由于其结构复杂且线宽较细, 无法搬移到毫米波频段工作。文献 [12] 提出了嵌入金属框架中的双频双圆极化堆叠贴片  $1 \times 4$  天线阵列, 重点讨论了天线 28/38 GHz 的双圆极化辐射特性, 但是结构复杂, 且论文中无双圆极化辐射实验数据。现阶段, 移动设备毫米波天线的研究多数针对毫米波天线与 sub-6G 天线的共口径和天线克服金属边框遮挡等问题<sup>[13-18]</sup>, 少数涉及毫米波通信的双圆极化天线很难兼顾较简单的单馈电结构与较宽的双频轴比带宽<sup>[7-11]</sup>。相比于其他研究, 本文既采用较为简单的天线结构, 通过单馈电来实现双频双圆极化辐射, 为后续简化发射机接收机电路设计提供基础, 且双频的阻抗带宽和轴比带宽保持一个较宽水平, 同时极大改善了金属边框对天线辐射的遮挡问题。

本文设计了一种宽带双频双圆极化的毫米波单馈天线。采用上下  $\pm 45^\circ$  倾斜堆叠的不规则微带贴片实现双频双圆极化, 提高了信号收发隔离度。通过与弯曲寄生贴片的耦合, 拓展了轴比带宽。最终将天线集成至 5G 移动设备的金属边框上, 通过加载矩形缝隙用来改善天线增益, 并拓展天线带宽。天线可以用于 5G 移动设备与低轨卫星的毫米波通信。

## 1 天线设计

### 1.1 天线设计原理

天线由最下层介质金属地的矩形缝隙耦合激励, 通过异形结构将频率接近的简并模  $TM_{10}$  和  $TM_{01}$  模正交分离以产生圆极化辐射。天线辐射圆极化波的条件是在天线辐射表面, 存在两个空间上正交的电流, 以产生两个空间上正交的线极化电场分量, 并且两者振幅相等, 相位差  $\phi = \pm 90^\circ$ , 天线演变过程如图 1 所示。

ANT1 采用单层贴片, 圆极化性能不佳。ANT2 引入下层贴片来辐射高频圆极化波, 同时与上层贴片耦合提高低频圆极化性能。ANT3 在下层贴片周围印刷两个寄生弯曲贴片, 弯曲的寄生贴片显著提高了天线的圆极化轴比带宽。其原因是寄生贴片通过与辐射贴片的耦合, 增加了电流的扰动路径, 促使  $TM_{10}$  和  $TM_{01}$  简并模的分离和正交, 提高了双频的轴比带宽。天线演变对轴比带宽的影响如图 2 所示。

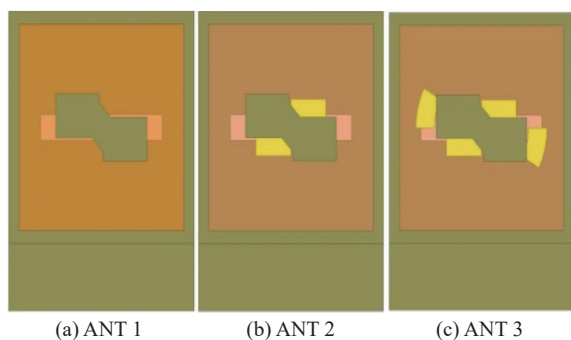


Fig. 1 Evolution of antenna

图 1 天线演变过程

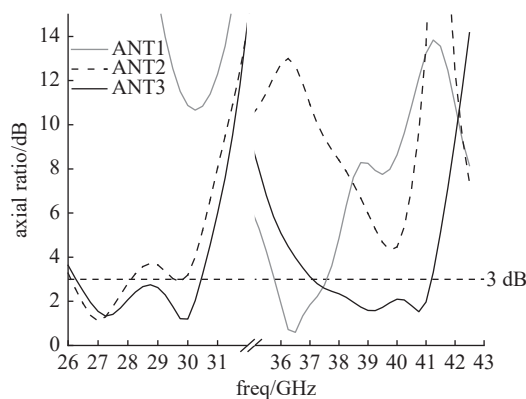


Fig. 2 Effect of antenna evolution on axial ratio bandwidth (AR BW)

图 2 天线演变对轴比带宽的影响

### 1.2 天线结构

天线结构如图 3 所示。该天线由三层罗杰斯 RO4003c 介质基板与相应的金属地板组成, 基板相对介电常数为 3.55, 三层介质基板的厚度分别为  $H_1=0.813$  mm、 $H_2=1.3$  mm 和  $H_3=0.508$  mm, 由贯穿的实心铜柱固定。天线结构从上到下(沿电磁波入射方向)分别为: 低频贴片和金属边框、第一层介质、高频贴片和寄生贴片、第二层介质、金属层、第三层介质、馈电线。上层与下层的贴片和相应的金属铜柱分别获得左旋圆极化(LHCP)的低频谐振和右旋圆极化(RHCP)的高频谐振。两层贴片在垂直方向呈  $\pm 45^\circ$  倾斜放置, 避免了辐射遮挡。天线尺寸参数如表 1 所示。

28 GHz 时天线上层贴片电场分布如图 4 所示。其瞬时电场  $E$  的方向在一个周期内顺时针旋转, 根据圆极化波产生的条件, 辐射正向的左旋圆极化波。38 GHz 时天线下层贴片电场分布如图 5 所示, 瞬时电场  $E$  的方向在一个周期内逆时针旋转, 辐射正向的右旋圆极化波。

为了将双频双圆极化天线应用到 5G 移动设备与低轨卫星的毫米波通信中, 将天线单元集成至 5G 移动设备的金属边框上, 边框尺寸约为传统智能手机边框尺寸(76 mm  $\times$  9.8 mm)。为便于加工和测试, 金属地板尺寸设置为 80 mm,

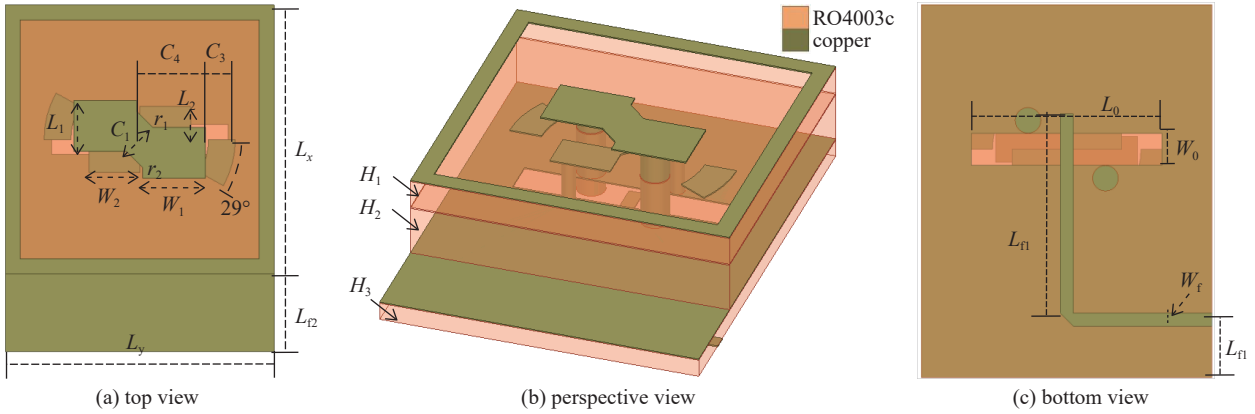


Fig. 3 Antenna element

图 3 天线单元

表 1 天线单元尺寸参数

Table 1 Dimension parameters of antenna

(mm)

$H_1$	$H_2$	$H_3$	$W_0$	$L_y$	$W_1$	$W_2$	$L_1$
0.813	1.3	0.508	1	9	2.1	1.7	1.7
$L_x$	$C_3$	$C_4$	$L_{k1}$	$W_f$	$L_2$	$L_{fl}$	$L_{l2}$
9.6	0.9	2.3	4.6	0.5	1.1	5.6	2.6
$C_1$	$r_1$	$r_2$	$L_{yout1}$	$L_0$	$L_{inx}$	$L_{iny}$	$L_{iny1}$
1.2	0.2	0.4	4.8	5.9	7.8	8.6	8.6

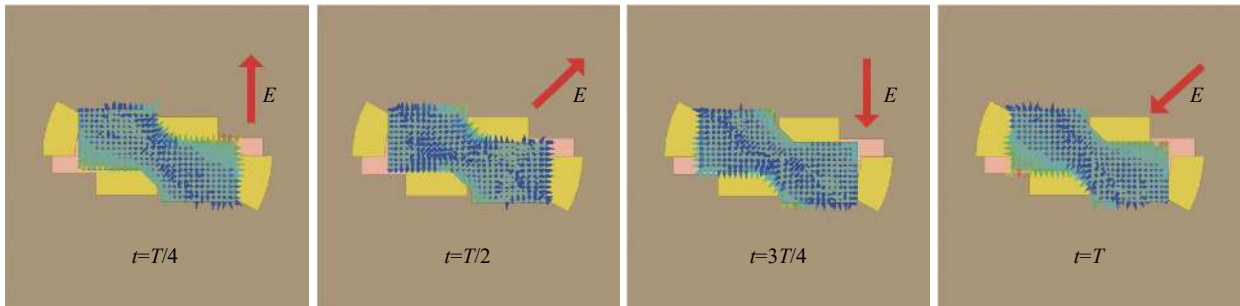


Fig. 4 Electric field distribution of the upper patch at 28 GHz

图 4 28 GHz 处上层贴片电场分布图

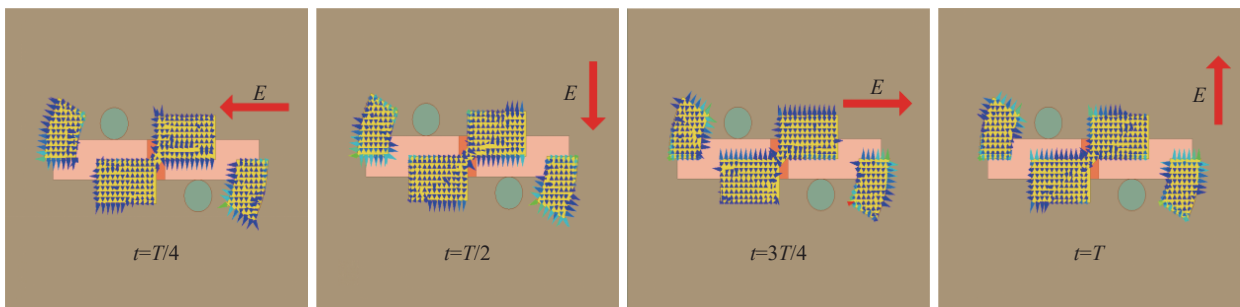


Fig. 5 Electric field distribution of the lower patch at 38 GHz

图 5 38 GHz 处下层贴片电场分布图

为传统手机长度的一半。适当调整天线尺寸, 通过在天线最顶层基板金属边框上加载两个矩形缝隙, 减少了边框对辐射的遮挡, 改善了天线增益和天线带宽。集成后的结构如图 6 所示, 天线结构尺寸参数如表 1 所示。

## 2 天线仿真与测试结果

加工并测试天线样品, 如图 7 和图 8 所示。测试仪器为安捷伦 E8363C 矢量网络分析仪和毫米波微波暗室。

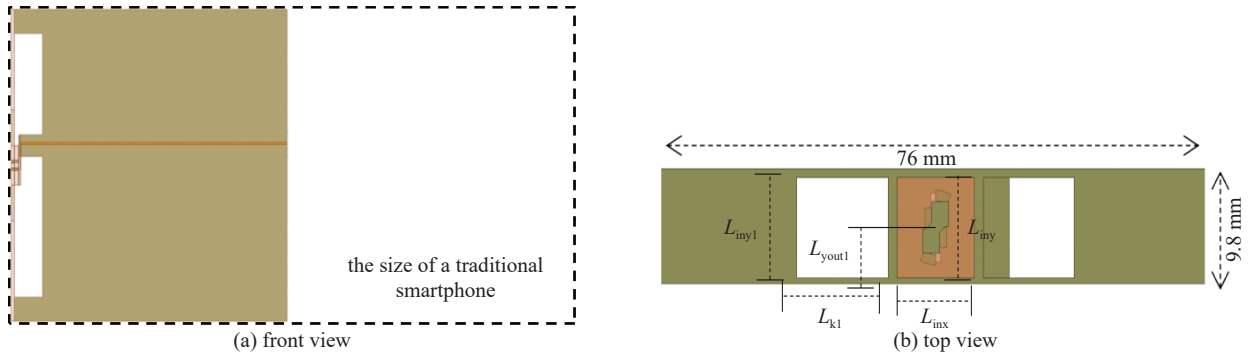


Fig. 6 Structure of the antenna integrated frame

图 6 天线集成边框结构图

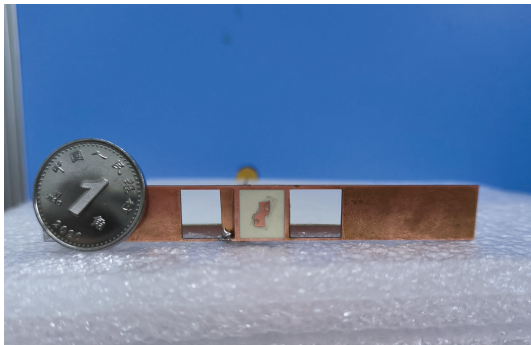


Fig. 7 Picture of antenna processing sample

图 7 天线加工样品图片

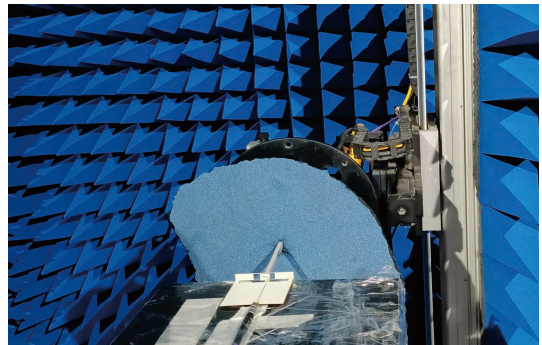


Fig. 8 Picture of antenna test scenario

图 8 天线测试场景图片

矢量网络分析仪校准后进行  $S$  参数的测量,  $S_{11}$  阻抗带宽仿真与测试结果如图 9 所示。使用微波暗室分别测出天线辐射电场水平分量和垂直分量, 合成可测得天线圆极化增益和方向图等参数。轴比带宽仿真与测试结果如图 10 所示, 天线增益和交叉极化的仿真与测试结果如图 11~图 14 所示。

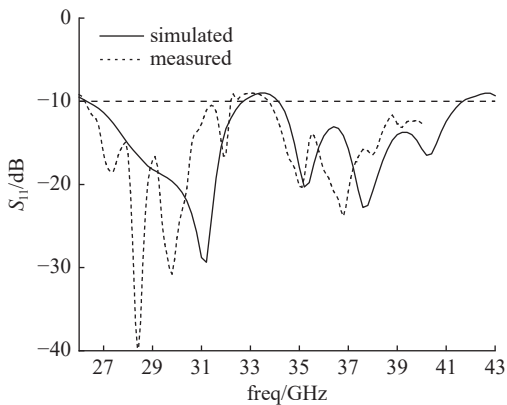


Fig. 9 Simulated and measured VSWR

图 9 驻波比的仿真与测试图

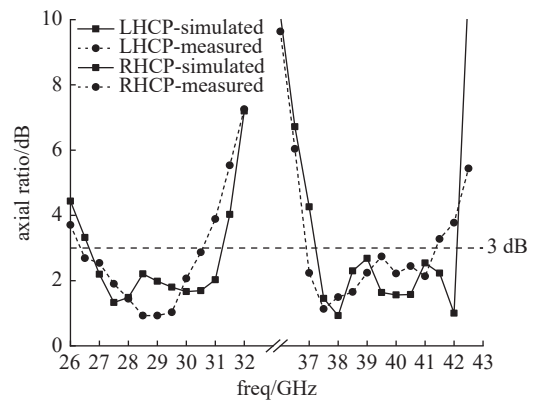


Fig. 10 Simulated and measured AR BW

图 10 轴比带宽的仿真与测试图

由测试分析可知, 天线相对阻抗带宽分别为 20.4%(26.23~32.20 GHz)和 17.0%(33.73~40.00 GHz), 由于矢量网络分析仪的测量范围限制, 阻抗带宽仅测量到 40 GHz, 实际高频带宽大于 17.0%。天线相对轴比带宽分别达到 14.9%(26.34~30.57 GHz)和 11.4%(36.90~41.37GHz), 与仿真结果对比, 减少了 1%和 0.9%, 基本覆盖 n257、n260 波段。天线带宽向低频偏移, 经过仿真验证, 原因是频率过高天线性能对加工精度要求极高, 三层基板在加工时没有充分压合产生误差, 导致轴比带宽和阻抗带宽频偏。28/38 GHz 时中心增益为 6.06/3.35 dBi, 相对仿真减少了 0.59/0.54 dBi。天线在两个频段的辐射效率分别是 65.1%、60.6%。

表 2 给出设计的天线和其他双圆极化天线的性能比较,  $\lambda_0$  表示天线中心频率对应的工作波长。天线采用对

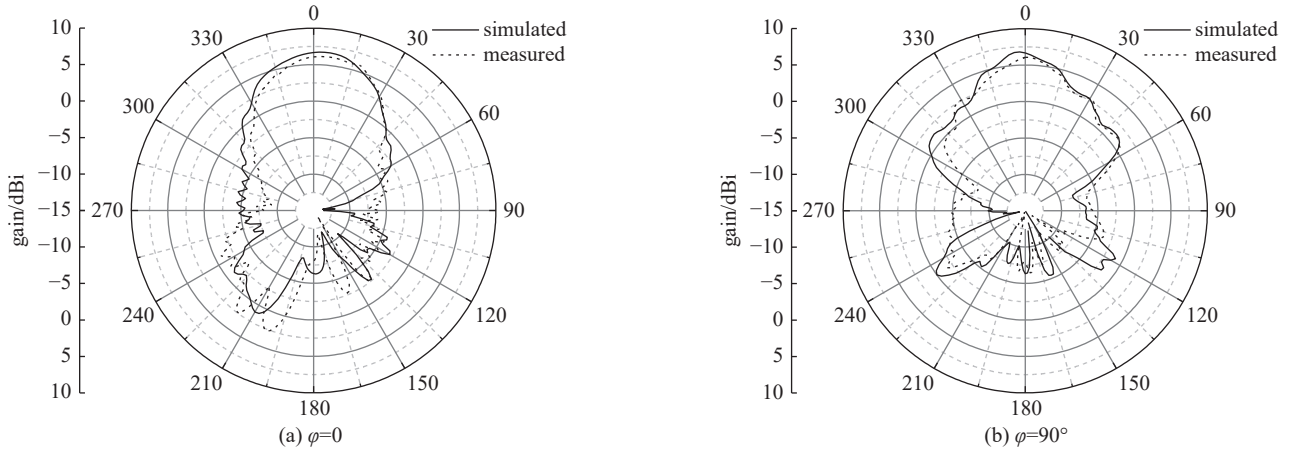


Fig. 11 The simulated and measured gain at 28 GHz

图 11 28 GHz 增益仿真与测试图

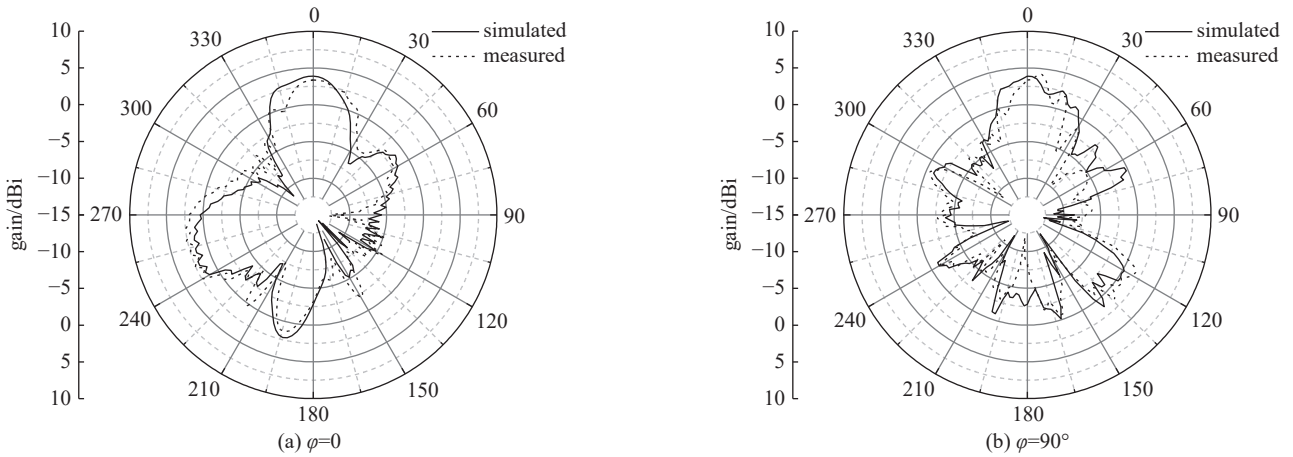


Fig. 12 Simulated and measured gain at 38 GHz

图 12 38 GHz 增益仿真与测试图

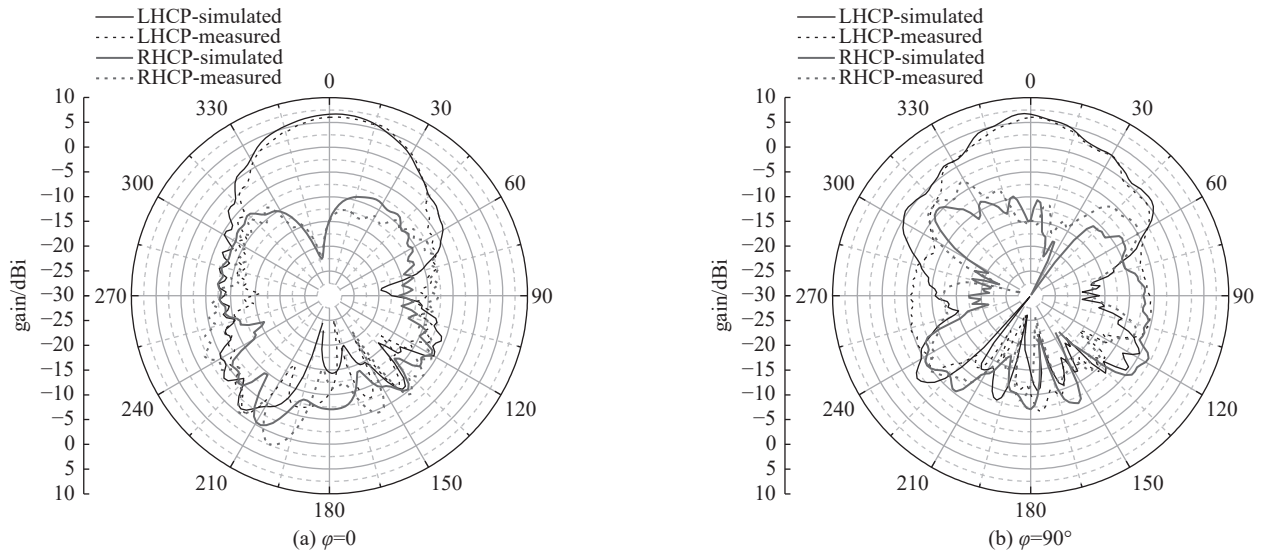


Fig. 13 Simulated and measured cross polarization at 28 GHz

图 13 28 GHz 交叉极化仿真与测试图

不规则堆叠贴片耦合馈电的方式, 在低频和高温同时获得了相对宽的轴比带宽和阻抗带宽。文献 [10] 的反射面双圆极化天线阵列的轴比带宽和增益参数良好, 但由于天线为反射面结构且组成大规模阵列, 无法用于 5G 移动设备。

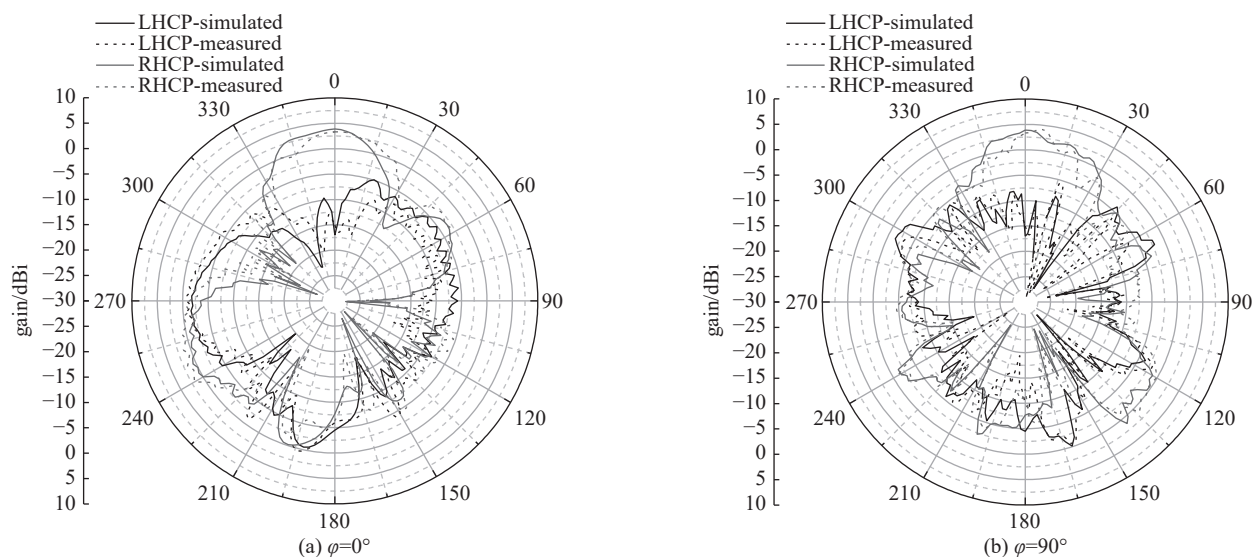


Fig. 14 Simulated and measured cross polarization at 38 GHz

图 14 38 GHz 交叉极化仿真与测试图

表 2 不同双圆极化天线结果比较

Table 2 Comparison of the proposed antenna with the other dual-circular-polarized antennas

antennas	year	operating frequency/GHz	relative impedance BW/%	relative 3 dB AR BW/%	relative size/ $\lambda_0$	feed mode
Ref [7]	2018	2.55/6.0	14.7/28.4	8.8/4.4	0.22×0.22	single feed
Ref [8]	2019	2.4/5.2	20.4/12.6	16.6/5.7	0.30×0.32	single feed
Ref [9]	2022	5.15/6.32	27.5	2.7/4.4	—	single feed
Ref [10]	2022	18.9/28.5	—	26.4/24.6	0.69×0.69	reflecting surface
this work	—	28/38	20.4 /17.0	14.9/11.4	0.89×0.84	single feed

### 3 结 论

设计了一种宽带双频双圆极化毫米波单馈天线,其工作带宽覆盖 n257(26.5~29.5 GHz)、n260(37.0~40.0 GHz) 波段。天线采用不规则微带贴片天线和相应的金属通孔获得圆极化谐振;通过引入弯曲的寄生贴片和缝隙耦合馈电,拓宽了轴比带宽。实测相对阻抗带宽分别达到 20.4%、17.0%,左右旋的相对轴比带宽分别达到 14.9%、11.4%, 28 GHz 时增益为 6.06 dBi, 39 GHz 时增益为 3.55 dBi。天线的双频双圆极化特性提高了毫米波信号收发的隔离度,可以用于 5G 移动设备和低轨卫星的直接通信。

#### 参考文献:

- [1] Zhao Kun, Ying Zhihong, Zhang Shuai, et al. Antenna designs for mobile handsets with consideration of 3GPP requirements in FR2[C]//2021 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI). 2021: 343-344.
- [2] Zhang Junkai, Garg N, Holm M, et al. Design of full duplex millimeter-wave integrated access and backhaul networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(1): 60-67.
- [3] Chen Kuoming, Pan Yunhan, Lee T S. Low-complexity beam selection for hybrid precoded multi-user mmWave communications[C]//2018 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). 2018: 1-5.
- [4] Chang Yinchun, Hsu C C, Magray M I, et al. Wideband and low profile miniaturized magneto-electric dipole antenna for 5G mmWave applications[C]//2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). 2020: 697-699.
- [5] Zhao Yang, Liu Zhenyang, Fan Xing, et al. Design of a Ka broadband satellite communication antenna for low-earth-orbit constellation[C]//2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). 2018: 1-4.
- [6] Chen Shanzhi, Sun Shaohui, Kang Shaoli. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. *China Communications*, 2020, 17(12): 156-171.
- [7] Ni Chao, Wu Weijun, Liu Qifeng, et al. A novel dual-band dual-sense circularly polarized slot antenna design[C]//2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). 2018: 1-3.
- [8] Kumar P, Dwari S, Saini R K, et al. Dual-band dual-sense polarization reconfigurable circularly polarized antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(1): 64-68.

- [9] Zeng Jianping, Guan Fang, Lin Fenghan. Control of characteristic mode excitation for wideband and dual-band circularly polarized U-slot patch antennas[C]//2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI). 2022: 229-230.
- [10] Farias R L, Peixeiro C, Heckler M V T. Single-layer dual-band dual-circularly polarized reflectarray for space communication[J]. [IEEE Transactions on Antennas and Propagation](#), 2022, 70(7): 5989-5994.
- [11] Xu Rui, Li J Y, Wei D J, et al. A very simple dual-band dual-sense circularly polarized square slot antenna[C]//2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. 2018: 123-124.
- [12] Huang Huanchu, Wang Yijin, Jian Xianjing. Novel integrated design of dual-band dual-polarization mm-wave antennas in non-mm-wave antennas (AiA) for a 5G phone with a metal frame[C]//2019 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). 2019: 125-128.
- [13] Yu Bin, Yang Kang, Sim C Y D, et al. A novel 28 GHz beam steering array for 5G mobile device with metallic casing application[J]. [IEEE Transactions on Antennas and Propagation](#), 2018, 66(1): 462-466.
- [14] Al Abbas E, Ikram M, Mobashsher A T, et al. MIMO antenna system for multi-band millimeter-wave 5G and wideband 4G mobile communications[J]. [IEEE Access](#), 2019, 7: 181916-181923.
- [15] Ikram M, Al Abbas E, Nguyen-Trong N, et al. Integrated frequency-reconfigurable slot antenna and connected slot antenna array for 4G and 5G mobile handsets[J]. [IEEE Transactions on Antennas and Propagation](#), 2019, 67(12): 7225-7233.
- [16] Ding Yanran, Cheng Yujian. A tri-band shared-aperture antenna for (2.4, 5.2) GHz Wi-Fi application with MIMO function and 60 GHz Wi-Gig application with beam-scanning function[J]. [IEEE Transactions on Antennas and Propagation](#), 2020, 68(3): 1973-1981.
- [17] Biswal S P, Sharma S K, Das S. Collocated microstrip slot MIMO antennas for cellular bands along with 5G phased array antenna for user equipments (UEs)[J]. [IEEE Access](#), 2020, 8: 209138-209152.
- [18] Zada M, Shah I A, Yoo H. Integration of sub-6-GHz and mm-wave bands with a large frequency ratio for future 5G MIMO applications[J]. [IEEE Access](#), 2021, 9: 11241-11251.