



·高功率微波技术·

C/X 双频双圆极化共口径微带天线设计*

姚代波, 杨 旋, 郭庆功

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

摘 要: 设计实现了一款 C/X 双频双圆极化共口径微带天线, 在 C/X 频段均能以双圆极化方式工作, 有效提高了天线的口径利用率。采用寄生结构和 L 型探针耦合馈电拓展了天线的阻抗带宽; 以嵌套方式将 X 波段天线置于 C 波段天线的间隙处实现了共口径设计; 通过对称反相馈电技术实现了良好的交叉极化比。测试结果表明, C 波段的阻抗带宽和 3 dB 轴比带宽分别大于 23% 和 17%; X 波段的阻抗带宽和 3 dB 轴比带宽分别大于 28% 和 18%; 测试频点处的交叉极化比均大于 25 dB。

关键词: 双频双圆极化; 微带天线; 反相馈电; 共口径

中图分类号: TN827.4

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230224

Design of C/X dual band and dual circularly polarized shared-aperture microstrip antenna

Yao Daibo, Yang Xuan, Guo Qinggong

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

Abstract: A dual band dual circularly polarized shared-aperture microstrip antenna is designed and fabricated, which can operate in the dual circular polarization mode in the C/X band, and the aperture utilization rate of the antenna is effectively improved. The parasitic structure and the L-shaped probe are applied to improve the impedance bandwidth. The shared aperture design is realized by placing the X-band antenna in the gap of the C-band antenna. The good cross-polarization ratio is realized by the symmetrical inversed phase feeding technique. The measurement results show that the impedance bandwidth and 3 dB axial ratio bandwidth of C-band are greater than 23% and 17%, respectively. The impedance bandwidth and 3 dB axial ratio bandwidth of X-band are greater than 28% and 18% respectively. The cross-polarization ratio at the test frequency points is greater than 25 dB.

Key words: dual band dual circularly polarized, microstrip antenna, inversed phase feeding technique, shared-aperture

近年来,随着通信行业对更高数据传输速率需求的增长以及卫星制造、发射成本的降低,卫星通信技术得到了快速发展^[1-2]。作为卫星通信系统的关键组成部分之一,天线承担着发射和接收电磁信号的任务,其性能将直接影响整个卫星通信系统的性能^[3]。因此,与线极化天线相比,圆极化天线因其出色的抗极化失配和抗多径效应能力越来越受到人们的关注^[4-7]。文献 [4] 提出了一种基于多模谐振的宽带圆极化微带贴片天线,通过在主辐射贴片和寄生贴片下面引入短金属柱以激励 $TM_{1/2,0}$ 模、零阶模和 TM_{10} 模,从而在三模谐振下实现了高达 96% 的 -10 dB 阻抗带宽和 86% 的 3 dB 轴比带宽。文献 [7] 提出了一种基于双耦合线的双圆极化微带贴片天线,以工作在 TM_{01} 模式的矩形贴片天线为基本设计单元,引入单耦合线并以 90° 相位差激励贴片,从而产生圆极化辐射,在此基础上引入双耦合线实现了天线的双圆极化辐射。

在频谱资源日益紧张的今天,为了增加系统容量,提高频谱利用率,通常要求卫星天线能够以多频多极化的方式工作,而上述文献显然已无法满足这一需求。近年来,学者们将目光更多地看向了双频双圆极化天线^[8-13]。文献 [8] 在单层介质板上通过将工作于不同频段的两个贴片天线相连并利用顺序旋转馈电技术设计了一款双频双圆

* 收稿日期:2023-07-19; 修订日期:2023-09-08

联系方式:姚代波, yaodaibo@outlook.com。

通信作者:郭庆功, guoqingong@scu.edu.cn。

极化共口径天线,与采用传统馈电形式的双频双圆极化天线相比,具有更宽的轴比带宽;文献 [9] 提出了一款用于卫星通信的 C/X 波段双频双圆极化共口径天线。通过对 C 波段的四个角进行蚀刻圆角处理,以嵌套方式实现了与 X 波段天线的共口径设计;文献 [10] 以非对称缝隙环和 L 形微带线为实现双频双圆极化的条件,提出了一款极化可重构的双频双圆极化缝隙天线。现有文献虽然已经对双频双圆极化天线进行了比较深入地研究,但绝大多数是每个频段分别对应一种极化方式。

本文结合对称反相馈电技术和 3 dB 耦合器,设计了一款工作于 C/X 波段的宽带双频双圆极化天线,在每个工作频段均提供了左旋和右旋两种圆极化(两个频段共计四种)工作模式,进一步提高了天线的口径利用率。且实测结果表明,天线还拥有较宽的阻抗带宽和 3 dB 轴比带宽。

1 天线设计

1.1 基本理论

本文所涉及的 C/X 波段天线辐射单元形式均为微带贴片天线,式(1)和式(2)所示为计算矩形微带贴片尺寸的经验公式,由此经验公式初步确定微带天线的尺寸,借助软件仿真优化得到最终的尺寸。

$$W = \frac{c}{2f} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$L = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_c}} - 2\Delta L \quad (2)$$

式中: W 和 L 分别为微带天线的宽边和窄边的长度, $\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}$, $\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_r + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_r - 0.258)(W/h + 0.8)}$

1.2 天线单元设计

C 波段天线单元结构如图 1 所示。从下往上,辐射贴片和寄生贴片分别位于第 4 和第 5 层介质板的底部,通过对十字贴片末端进行阶梯的加载,实现了更宽频带内的阻抗匹配^[4],耦合馈电枝节位于第 3 层介质板的顶部,通过电磁耦合将能量耦合至辐射贴片。在馈电网络与馈电枝节的连接上,通过探针将馈电端口引至馈电网络层(第 1 层介质板的顶部)以充分考虑探针对单元辐射性能的影响。

X 波段天线单元结构如图 2 所示。方形贴片位于第 4 层介质板的顶部,馈电枝节位于第 4 层介质板的底部,通过电磁耦合将能量耦合至辐射贴片。在馈电网络与馈电枝节的连接上,通过探针将馈电端口引至馈电层(第 2 层介质板的底部)。C/X 波段天线单元的尺寸如表 1 所示。经仿真分析,C/X 波段天线单元性能良好。

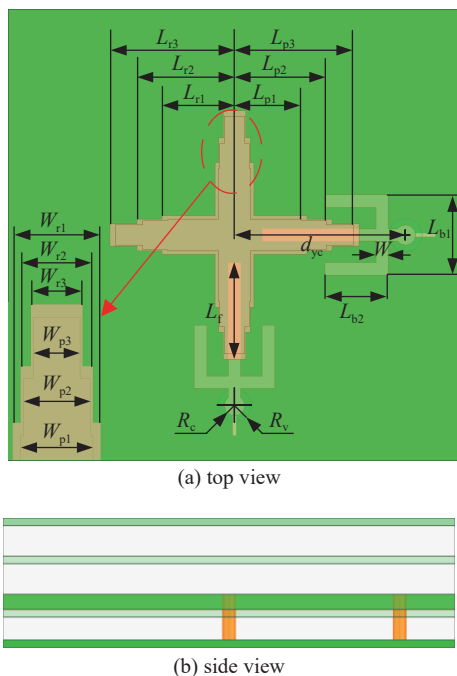


Fig. 1 C-band antenna element
图 1 C 波段单元结构

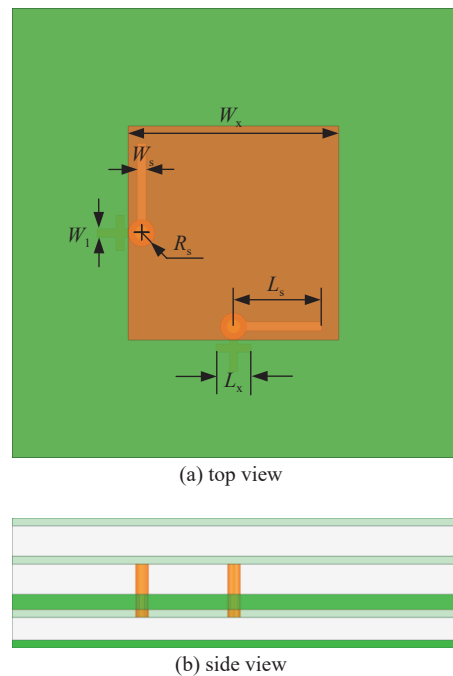


Fig. 2 X-band antenna element
图 2 X 波段单元结构

表 1 C/X 波段天线单元尺寸
Table 1 Dimensions of C/X band antenna element (mm)

L_{r1}	L_{r2}	L_{r3}	L_{p1}	L_{p2}	L_{p3}	L_{b1}	L_{b2}	L_f
6.4	8.6	11	5.9	8.1	10.5	7.1	5.6	8.5
W_{r1}	W_{r2}	W_{r3}	W_{p1}	W_{p2}	W_{p3}	d_{yc}	R_c	R_v
3.4	2.8	2	2.8	2.6	1.8	15.2	0.6	1
W	W_1	L_s	W_s	L_x	W_x	R_s		
1.1	0.36	4	0.4	1.6	10.5	0.2		

1.3 天线阵列结构设计

天线的整体结构如图 3 所示。天线从下往上共分为 8 层, 5 层介质和 3 层泡沫, 第 1、3、4、6、8 层为介质层, 材料均为 F4BK255, 介电常数 $\epsilon_r=2.55$; 第 2/5/7 层为起支撑作用的泡沫层, 其介电常数与空气非常接近。C 波段馈电网络位于第 1、2 层之间, X 波段馈电网络位于 2、3 层之间。天线阵列结构的主要参数如表 2 所示。

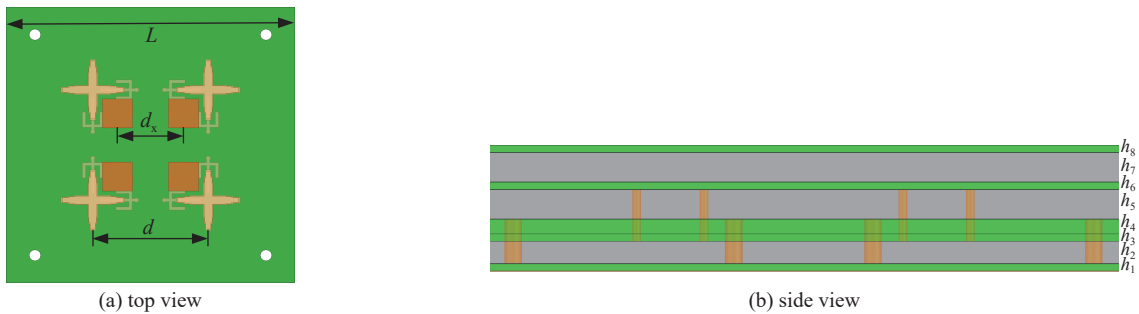


Fig. 3 Structure of antenna array

图 3 天线阵列结构

表 2 天线阵列结构的各项参数
Table 2 Dimensions of antenna array (mm)

h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	L_s	d_c	d_x
0.5	1.5	0.5	1	2	0.5	2	0.5	100	40	23

如图 3(a)所示, C/X 波段各自的四个单元呈镜像对称关系。这是因为, 金属馈电探针的引入使得单元的交叉极化比恶化, 直接以常规方式组阵无法实现良好的阵列交叉极化。文献 [15] 通过反相馈电技术实现了良好的交叉极化比, 本文借鉴了该方法进行馈电网络的设计, 以弥补金属馈电探针引起的交叉极化性能恶化。

结合图 3(b)以及 1.2 中对天线单元设计的描述可以知道, 两个频段天线的辐射单元和馈电网络均位于不同层, 目的是尽可能降低同频辐射单元和馈电网络以及双频单元之间的互耦影响。

1.4 馈电网络设计及圆极化原理分析

图 4 所示为天线的馈电网络, 两个频段实现圆极化的原理相同。以 C 波段为例, 根据反相馈电技术的原理, 端



Fig. 4 Feed network of the antenna

图 4 天线阵列的馈电网络

口 V1 和 V2、V3 和 V4、H1 和 H2、H3 和 H4 幅度相等, 相位相差 180° , 因此四个垂直极化端口和四个水平端口将分别产生垂直极化辐射和水平极化辐射。在上述基础上, 通过一个 3 dB 定向耦合器将垂直和水平极化连接在一起, 使垂直和水平极化等幅且有 90° 的相位差。与此同时, 合成的垂直和水平极化在空间上也是正交的, 因此能够满足圆极化的条件, 天线能够辐射圆极化波。port1 和 port2 分别对应 C 波段的右旋和左旋圆极化, port3 和 port4 分别对应 X 波段的右旋和左旋圆极化。

2 仿真及测试结果分析

图 5 所示为天线实物及测试环境。使用三维电磁仿真软件 (Ansoft HFSS15.0) 进行天线模型的仿真、优化, 加工实物并使用安捷伦矢量网络分析仪和微波暗室分别对天线的 S 参数、轴比和辐射方向图进行测量。

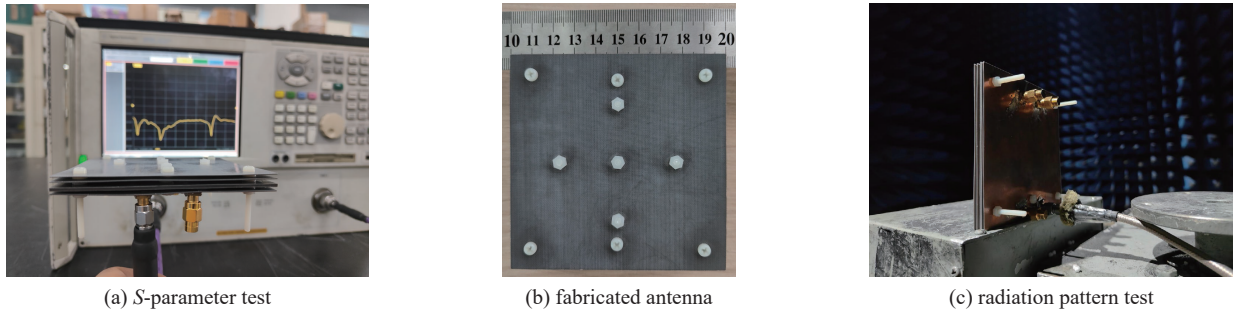


Fig. 5 Antenna and test environment

图 5 天线实物及测试环境

图 6 所示为天线各端口 S 参数的仿真-实测结果。对于 C 波段, 其仿真和实测的右旋圆极化阻抗带宽分别为 $4.85 \sim 6.03$ GHz (21.69%) 和 $4.68 \sim 6.07$ GHz (25.86%); 左旋圆极化的阻抗带宽分别为 $4.85 \sim 5.99$ GHz (21.03%) 和 $4.75 \sim 6.00$ GHz (23.26%)。上述结果表明, 实测与仿真结果吻合良好, 且实测结果整体略优于仿真结果。这是因为, 探针直径和馈电网络与探针连接处的焊盘直径对阻抗有较为明显的影响。焊接时, 多余的焊锡附着于焊盘和探针上, 导致天线的输入阻抗发生变化, 进而使得天线带宽发生了变化。

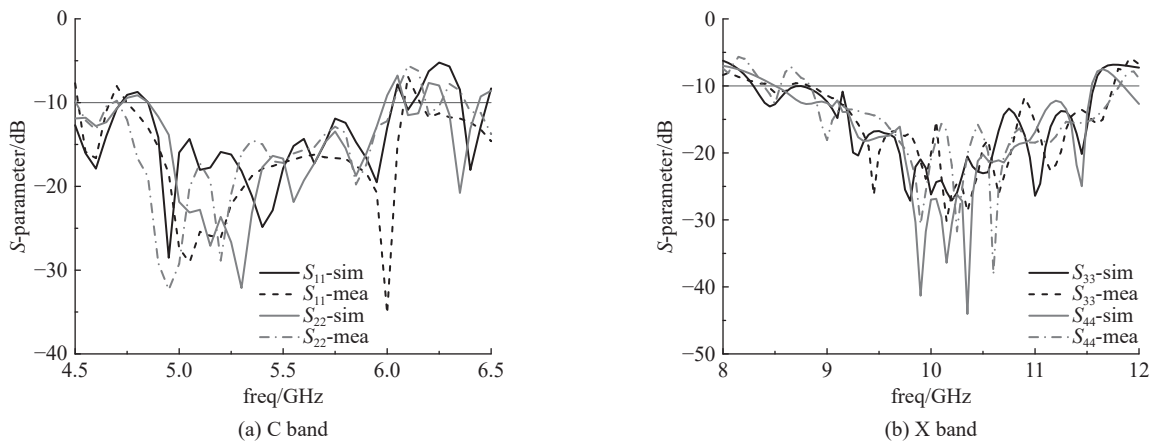


Fig. 6 Simulated and measured S -parameter

图 6 S 参数仿真-测试结果

对于 X 波段, 其仿真和实测的右旋圆极化阻抗带宽分别为 $8.29 \sim 11.57$ GHz (33.03%) 和 $8.80 \sim 11.75$ GHz (28.71%); 左旋圆极化的阻抗带宽分别为 $8.50 \sim 11.55$ GHz (30.42%) 和 $8.85 \sim 11.80$ GHz (28.57%)。结果表明, 实测与仿真结果具有良好的一致性。由于在 8.75 GHz 附近仿真的 S 参数只略小于 -10 dB, 因此实测时很容易因为焊接和加工误差等原因导致该处的 S 参数大于 -10 dB, 实测结果也印证了这一猜测。

图 7 所示为天线轴比带宽的仿真-实测结果。C 波段右旋圆极化的仿真和实测结果分别为 $4.89 \sim 5.97$ GHz (19.89%) 和 $4.94 \sim 5.98$ GHz (19.04%); 左旋圆极化的仿真和实测结果分别为 $4.97 \sim 6.01$ GHz (18.94%) 和 $5.04 \sim 6.02$ GHz (17.72%)。X 波段右旋圆极化的仿真和实测结果分别为 $8.94 \sim 11.07$ GHz (21.29%) 和 $8.98 \sim 10.95$ GHz (19.77%); 左旋圆极化的仿真和实测结果分别为 $8.90 \sim 10.89$ GHz (20.11%) 和 $8.97 \sim 10.82$ GHz (18.70%)。

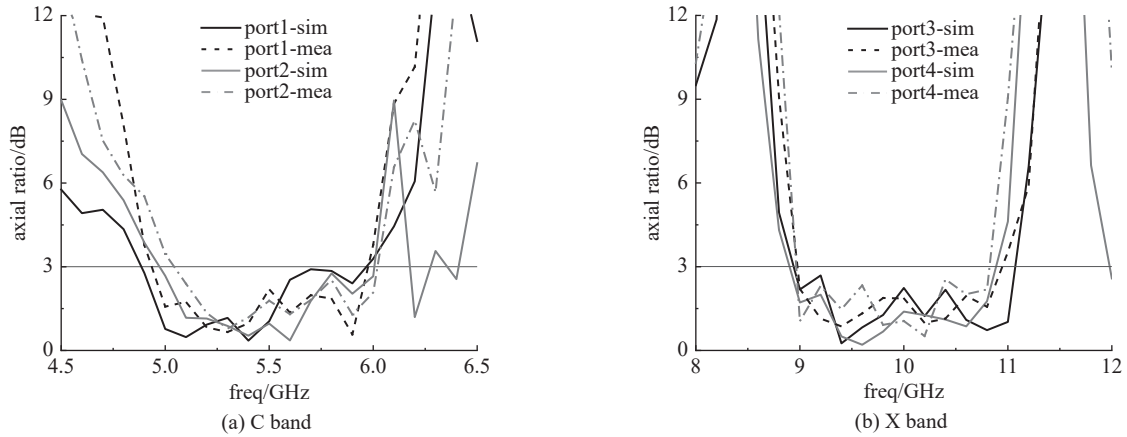


Fig. 7 Simulated and measured axial ratio

图 7 轴比仿真实测结果

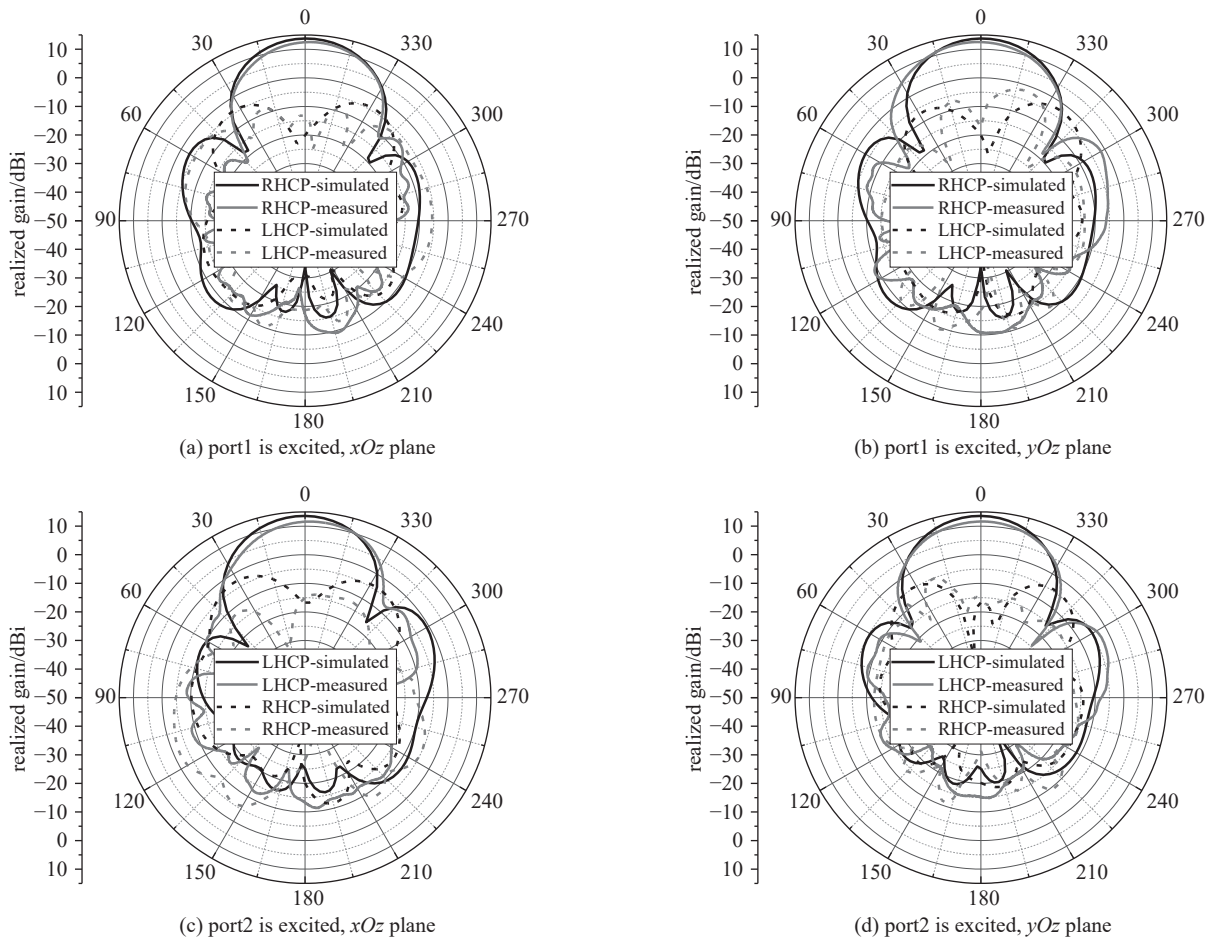


Fig. 8 Radiation pattern at 5.4 GHz of C-band

图 8 C 波段 5.4 GHz 处的辐射方向图

图 8 所示为 C 波段在 5.4 GHz 处的辐射方向图。可以发现, 实测与仿真结果基本一致, 交叉极化比均大于 25 dB; 实测方向图增益比仿真低 1 dB 左右, 且有一定角度的偏移, 这是因为实际测试时要考虑空间和线缆损耗, 且由于条件限制, 不能保证发射天线和待测天线完全对准。图 9 所示为 X 波段在 9.4 GHz 处的辐射方向图。可得到与 C 波段天线类似的结论, 此处不再赘述。

表 3 对比了该设计与其他文献设计的双频双圆极化天线的性能, λ_0 表示天线中心频率对应的工作波长。对比可见, 本文所设计的天线在阻抗和 3 dB 轴比带宽以及带内的极化方式上具有一定的优势, 寄生结构的使用和空气层的引入使剖面高度不占优。

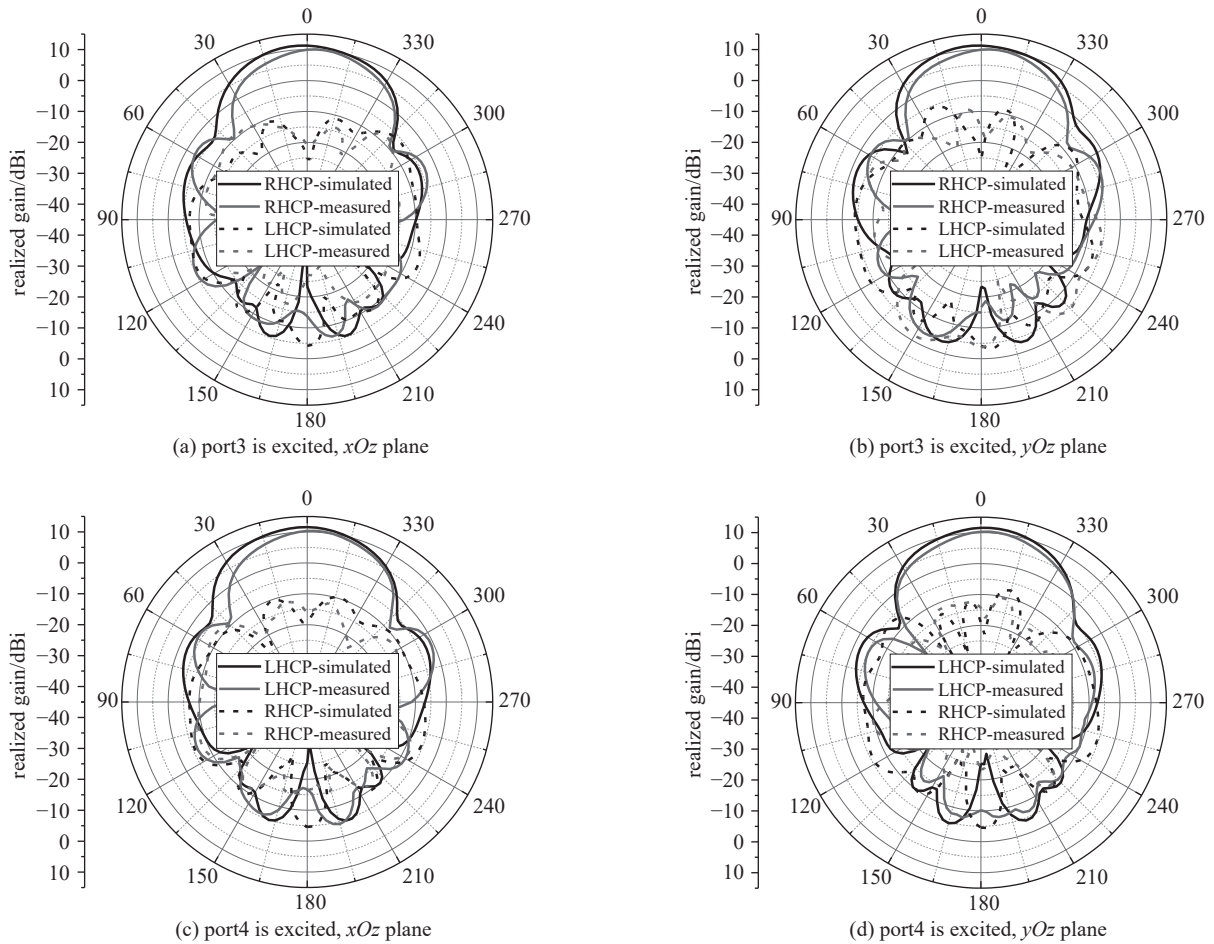


Fig. 9 Radiation pattern at 9.4 GHz of X-band

图 9 X 波段 9.4 GHz 处的辐射方向图

表 3 与其他圆极化天线的比较

Table 3 Comparison with other dual-band dual circularly polarized antennas

antennas	bands	polarization	impedance bandwidth/%	3 dB AR bandwidth/%	gain/dBi	aperture efficiency/%	size/ λ_0
Ref [8]	X/Ku	RHCP/LHCP	8.3/18.9	14.2/14.9	17.5/18.3	52.2/31.8	2.25×2.25×0.02
Ref [9]	C/X	LHCP/RHCP	21.0/21.2	13.2/12.8	14.5/17.5	59.4/55.6	1.83×1.83×0.08
Ref [10]	S/C	RHCP/LHCP	20.4/12.6	16.6/5.7	1.9/1.3	—	0.30×0.30×0.01
this work	C/X	LHCP/RHCP; LHCP/RHCP	23.3/25.9; 28.6/28.7	17.7/19.0; 19.8/18.7	13.7/13.7; 12.3/12.9	57.6/57.6; 45.5/52.2	1.62×1.62×0.14

3 结 论

本文采用嵌套的共口径结构, 结合对称反相馈电技术和 3 dB 耦合器, 设计了一款 C/X 波段双频双圆极化天线, 在天线工作的两个频段内均提供了左旋和右旋圆极化工作模式, 提高了天线的口径利用率。通过加载阶梯结构、寄生贴片及 L 型探针耦合馈电等方式, 扩展了天线的阻抗带宽; 通过反相馈电技术实现了良好的交叉极化比。实测结果表明, 天线在两个频段内均具有超过 20% 的阻抗带宽和超过 15% 的 3 dB 轴比带宽; 测试频点处的交叉极化比均大于 25 dB, 拥有良好的极化分辨能力, 在卫星通信领域具有潜在的应用价值。

参考文献:

[1] Zheng Yuyang, Liu C C, Ding Yanran. A shared-aperture broadband circularly polarized antenna for satellite communications and navigation[C]//2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. 2019: 1755-1756.
 [2] Al-Saedi H, Abdel-Wahab W M, Raeis-Zadeh S M, et al. Active phased-array antennas for Ka/K mobile satellite communications[C]//2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM). 2018: 1-3.
 [3] Li Jiawang, Hu Yun, Xiang Lei, et al. Broadband circularly polarized magnetolectric dipole antenna and array for K-band and Ka-band satellite communications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(7): 5907-5912.

- [4] Hu Wei, Li Changjiang, Liu Xuekang, et al. Wideband circularly polarized microstrip patch antenna with multimode resonance[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(4): 533-537.
- [5] Yang Yuhang, Sun Baohua, Guo Jingli. A single-layer wideband circularly polarized antenna for millimeter-wave applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(6): 4925-4929.
- [6] Bai Guo, Liu Yuanzhi, Liao Cheng. A compact wideband dual circularly polarized microstrip patch antenna array for X-band satellite communication systems[C]//2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). 2021: 1-3.
- [7] Zhao Zhipeng, Liu Feng, Ren Jian, et al. Dual-sense circularly polarized antenna with a dual-coupled line[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2020, 19(8): 1415-1419.
- [8] Zhang Jindong, Wu Wen, Fang Dagang. Dual-band and dual-circularly polarized shared-aperture array antennas with single-layer substrate[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(1): 109-116.
- [9] Mao Chunxu, Gao S, Wang Yi, et al. Dual-band circularly polarized shared-aperture array for C-/X-band satellite communications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(10): 5171-5178.
- [10] 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.
- [11] Zhao Zhipeng, Ren Jian, Liu Ying, et al. Wideband dual-feed, dual-sense circularly polarized dielectric resonator antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(12): 7785-7793.
- [12] Wang Wenwei, Chen Chunhong, Wang Shiyan, et al. Switchable dual-band dual-sense circularly polarized patch antenna implemented by dual-band phase shifter of $\pm 90^\circ$ [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(10): 6912-6917.
- [13] Ji Shuosheng, Dong Yuandan, Wen Sichao, et al. C/X dual-band circularly polarized shared-aperture antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(12): 2334-2338.
- [14] Li Ke, Dong Tao, Xia Zhenghuan. A broadband shared-aperture L/S/X-band dual-polarized antenna for SAR applications[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 51417-51425.
- [15] Zhang Zhaoming, Zhang Tianling, Guo Chao, et al. S-band dual circularly polarized microstrip patch antenna array for satellite communication[C]//2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). 2017: 1-3.