

doi:10.3969/j.issn.1003-3106.2025.11.012

引用格式:李中伟,董润鹏.一种双频双圆极化对称阵子天线组件设计[J].无线电工程,2025,55(11):2243-2249.

[LI Zhongwei, DONG Runpeng. Design of a Dual Band Dual Circularly Polarized Symmetrical Dipole Antenna Component [J]. Radio Engineering, 2025, 55(11): 2243-2249.]

一种双频双圆极化对称阵子天线组件设计

李中伟,董润鹏

(中国人民解放军 91550 部队,辽宁 大连 116002)

摘要:针对传统测控领域接收与发射天线相互独立的问题,提出了一款双频双圆极化对称阵子天线组件。采用对称阵子天线实现双频工作特性,利用 3 dB 电桥实现双圆极化辐射特性,并在天线下方层叠式放置双工器实现接收频段与发射频段的高隔离度。基于此设计思路,在仿真分析的基础上加工天线样机并测试,结果表明所设计天线工作频带可覆盖 1.75~1.85 GHz 与 2.2~2.4 GHz,且在该频段内轴比均小于 3 dB,接收通道与发射通道间的抑制均达到 70 dB 以上。为实际工程中收发共用天线单元提供了可行性的设计方案。

关键词:双频段;双圆极化;对称阵子

中图分类号:TN273.5

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:1003-3106(2025)11-2243-07

Design of a Dual Band Dual Circularly Polarized Symmetrical Dipole Antenna Component

LI Zhongwei, DONG Runpeng

(Unit 91550, PLA, Dalian 116002, China)

Abstract: A dual band dual circularly polarized symmetric array antenna component is proposed to address the issue of independent receiving and transmitting antennas in traditional TT&C fields. A symmetrical array antenna is adopted to achieve dual band operation characteristics, while a 3 dB bridge is used to realize dual circularly polarized radiation characteristics, and a duplexer is stacked below the antenna to achieve high isolation between the receiving and transmitting frequency bands. Based on this design concept, an antenna prototype is manufactured and tested based on the simulation analysis. The results show that the designed antenna can operate in frequency bands covering 1.75~1.85 GHz and 2.2~2.4 GHz, and the axial ratio within these bands is less than 3 dB. The suppression between the receiving channel and the transmitting channel reaches over 70 dB. This provides a feasible design scheme for the shared antenna unit for transmitting and receiving in practical engineering.

Keywords: dual band; dual circularly polarized; dipole

0 引言

目前,通信测控设备逐步向小型化、便携化方向发展,天线作为接收和发射信号的装置,其结构也要更加紧凑。传统测控系统为接收天线与发射天线独立工作,将导致系统射频前端部分体积较大,不便装配且加工成本较高。因此设计出收发一体化天线对于减小射频前端部分体积具有重大意义^[1]。

由于测控系统接收频率与发射频率分布在 S 频段与 L 频段,传统的微带天线单元相对带宽仅有 3%^[2],难以满足用同一单元覆盖 2 个频段的要求,

若采用加载枝节^[3]或者在辐射贴片上开槽的方式^[4]可以实现双频特性,但由于天线单元表面电流发生变化会改变原有微带天线的辐射方向图;多层耦合微带天线能够实现多频段工作^[5-6],且结构较简单、能够满足低仰角增益需求,但多层耦合微带天线剖面较高,无法满足低剖面的要求;采用 Vivaldi 等超宽带天线形式可以在实现工作带宽的同时覆盖 L 频段与 S 频段,但是其剖面太高,安装使用环境十分受限^[7-8]。同时由于其工作带宽完全覆盖 L 频段与 S 频段,将导致天线接收到过多杂波,从而影响接

收稿日期:2025-04-14

收效率。此外若使用宽带天线单元,则对滤波器的指标会变得更加严苛。圆极化电磁波可以有效改善电磁信号在复杂环境中因反射、折射等造成的极化失配问题,大大改善信号传输的可靠性^[9],天线实现圆极化的方法主要包括:单馈点法、多馈点法、增加辐射元件、引入相位延迟器等方法^[10-12]。此外,由于接收频段与发射频段频率较近,为了去除接收信号与发射信号间的电磁干扰,需要在天线后边放置隔离器以提高发射端口与接收端口间的隔离度。在L、S频段滤波器的实现方式多样化,包括波导滤波器、LC滤波器、金属同轴滤波器等^[13-14];波导滤波器具备承载功率大的特性,但其尺寸较大,不适合结构紧凑的要求;LC滤波器尺寸较小,可以实现贴装,但是其所涉及元器件较多,这将导致插入损耗偏大且可靠性较低;金属同轴滤波器插损较小,功率容量适中,且可靠性较高。因此,对具有宽频带双圆极化辐射特性收发一体化天线的设计具有重要的研究意义。

针对上述研究背景,基于对称阵子天线设计了一款宽频带天线单元,采用3 dB电桥实现了双圆极化辐射特性,通过在天线下方堆放金属同轴滤波器实现无用信号的有效抑制。在仿真分析的基础上,加工了实物模型并进行测试,验证了该设计方案的可行性。

1 天线设计原理

1.1 天线单元宽频带圆极化特性实现机理

微带天线具有结构简单、剖面较低的优点,但是其频带较窄、低仰角增益值偏低,无法满足测控系统工作带宽与低仰角增益的要求,因此本文设计采用十字交叉阵子天线作为基础天线单元^[15]。常规十字交叉阵子天线工作带宽相对较窄,且工作剖面较高。为了实现宽频化与低剖面的设计要求,本文设计对交叉阵子天线进行了改进,采用渐变式辐射阵子臂来展宽工作带宽,使其工作带宽覆盖接收与发射频段,以实现双频段工作,辐射阵子臂与馈电网络间腔体通过加载高介电常数介质来降低天线总体剖面。图1给出了交叉阵子天线改进设计模型。

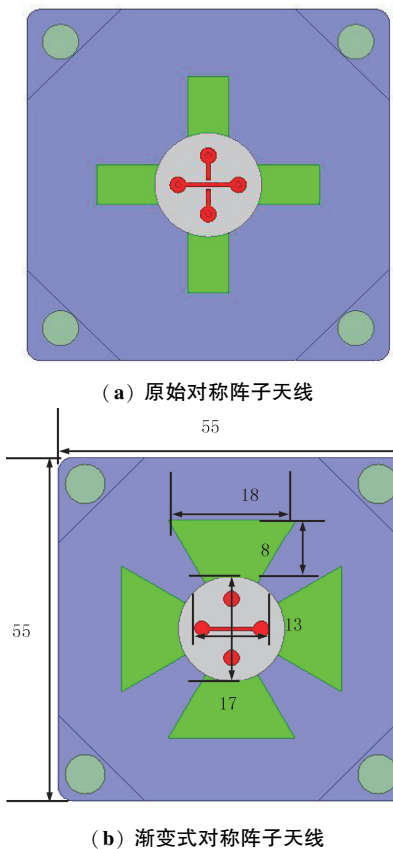


图1 交叉阵子天线改进设计模型

Fig. 1 Design of improved cross array antenna

由图1所示,将矩形对称阵子天线改为渐变型对称阵子天线,这种结构可以使天线阻抗在较宽范围内趋于平稳,有助于实现标准阻抗到自由空间阻抗的转变,从而扩展天线单元工作带宽。图2给出了天线改进过程中电压驻波比的变化情况,由图可知将辐射阵子改为渐变式后,天线单元工作带宽明显增加,可以完全覆盖1.5~2.5 GHz。

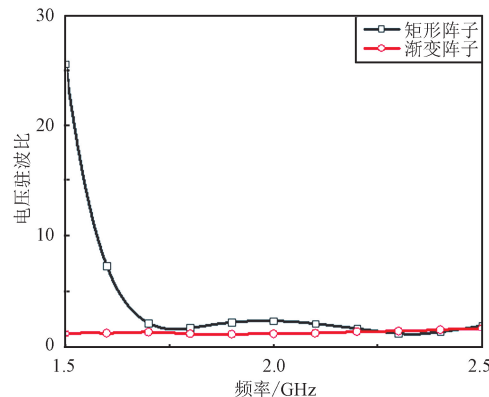


图2 天线电压驻波比变化曲线

Fig. 2 Antenna voltage standing wave ratio variation curve

正是由于圆极化电磁波具有出色的抗干扰能力,能有效抵御来自不同极化方向的干扰,保证通信的质量,因此要求测控天线在接收与发射频段均实现圆极化电磁波辐射。本文设计通过采用三分支定向耦合器实现对天线单元进行馈电,从而实现双圆极化辐射特性。传统三分支定向耦合器设计原理如图 3(a)所示,由于本文设计天线单元尺寸较为紧凑,因此对中间传输线部分进行曲折设计,仿真模型如图 3(b)所示。

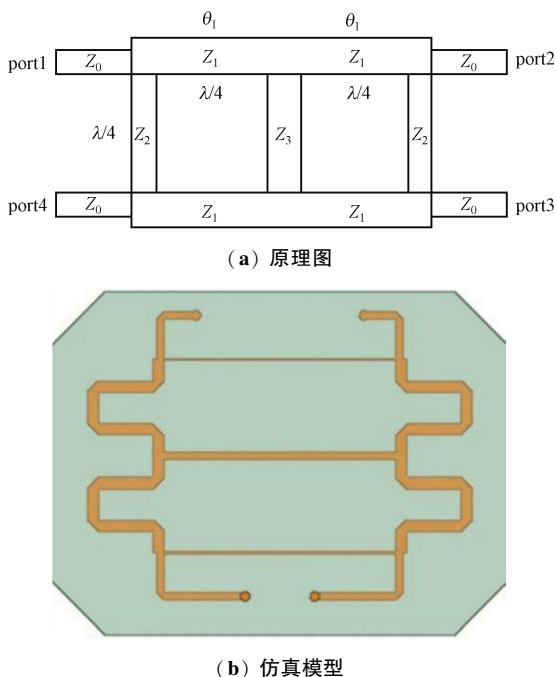


图 3 三分支定向耦合器模型

Fig. 3 Three branch directional coupler model

图 4 给出了三分支定向耦合器的仿真结果,可得其工作带宽覆盖 1.5~2.5 GHz,插入损耗小于 0.4 dB,且在频段内端口间隔离度优于 17 dB,满足馈电网络的设计需求。

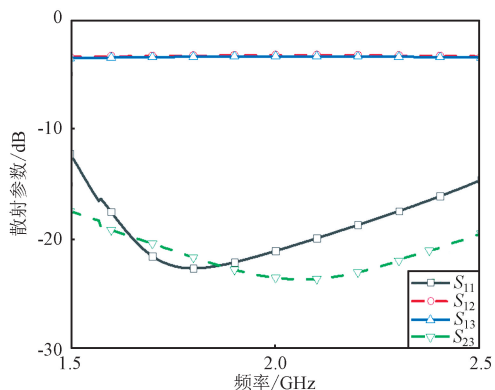


图 4 定向耦合器仿真结果

Fig. 4 Simulation results of the directional coupler

1.2 天线收发隔离实现机理

测控系统中收发共用天线既接收信号又发射信号,这就需要在天线下方安装双工滤波器,完成接收与发射信号的分离、杂波与干扰的滤除。双工器属于带通滤波器,分别实现接收与发射频带的通路,其原理如图 5 所示,包含 3 个端口,ANT 端口为共用端口, TX 为发射端口, RX 为接收端口。双工器在工作时需要将天线接收到的信号经过接收滤波器传送到射频系统,又要将从射频系统传送过来的发射信号经发射滤波器馈送至天线端口,要求二者独立完成且互不干扰。

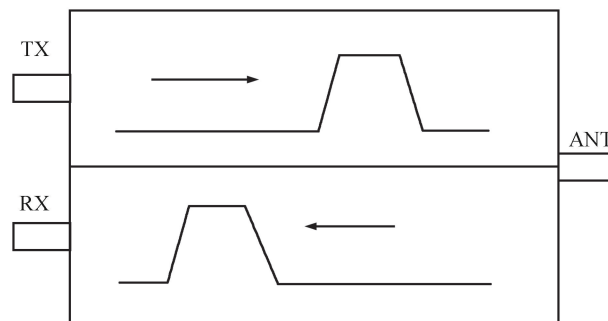
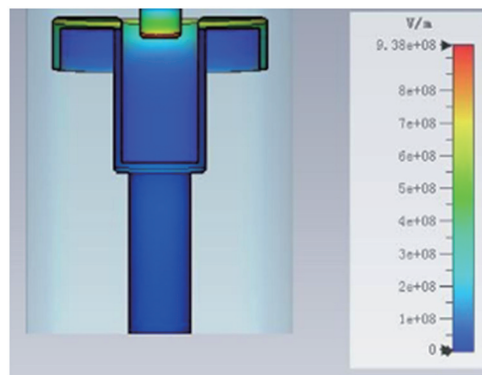


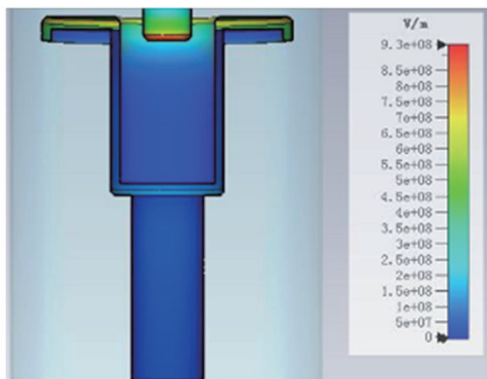
图 5 双工器原理框图

Fig. 5 Principle block diagram of duplexer

同轴腔体滤波器具有损耗低、易集成、可靠性高等优点,被广泛应用于使用要求较高的场合。根据接收与发射频段的中心频点及使用要求计算单腔谐振器尺寸并进行电磁仿真,图 6 分别给出了单腔仿真模型及场强分布情况,2 个模型在对应频段的无载 Q 值均达到了 1 500 V/m 以上,满足插入损耗较低的设计要求。



(a) 发射频点 Q 值仿真结果



(b) 接收频点 Q 值仿真结果

图 6 单腔仿真模型

Fig. 6 Single cavity simulation model

通过将谐振频率相同的多个谐振腔以耦合的方式级联起来,调节调谐杆组成窄带带通滤波器。级联滤波器调试简单,对腔体排列方式基本无要求,对带外的衰减曲线也没有波纹起伏的影响。根据切比雪夫滤波器相应形式对滤波器设计,最终设计接收滤波器为 5 阶,发射滤波器为 7 阶,双工器拓扑结构如图 7 所示。可以看出,由于接收与发射需要同时实现双圆极化特性,所以左旋圆极化与右旋圆极化为旋转对称关系。

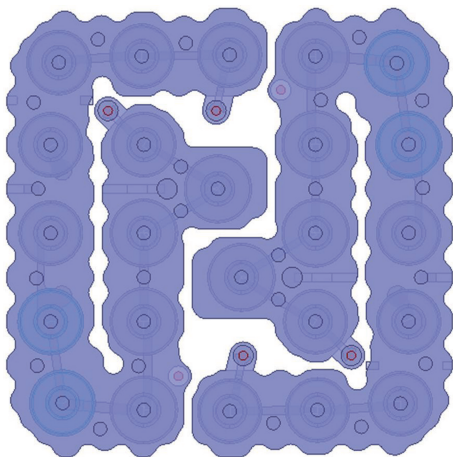


图 7 双工器拓扑结构

Fig. 7 Duplexer topology structure

由于双工器左右旋圆极化为对称关系,为减少冗余,仅给出一个极化类型接收端口滤波器与发射端口滤波器的仿真结果。如图 8 所示,从频率响应结果可以看出,L、S 频段双工器发射信号对接收信号的抑制达到了 120 dB、接收信号对发射信号抑制达到了 70 dB,通带内回波损耗均大于 20 dB,且发射通道损耗小于 0.9 dB、接收通道损耗小于 0.6 dB。

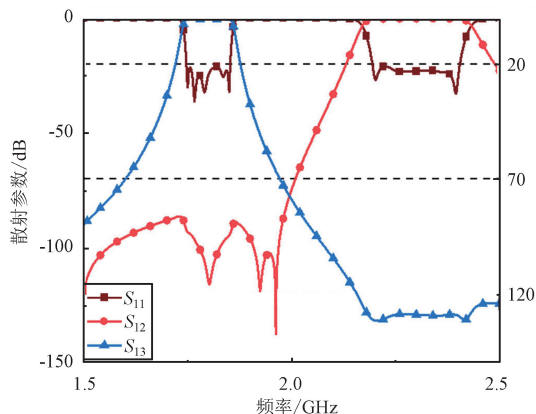


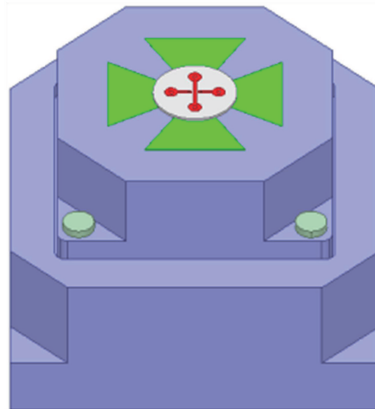
图 8 双工器频率响应仿真结果

Fig. 8 Simulation results of frequency response of duplexer

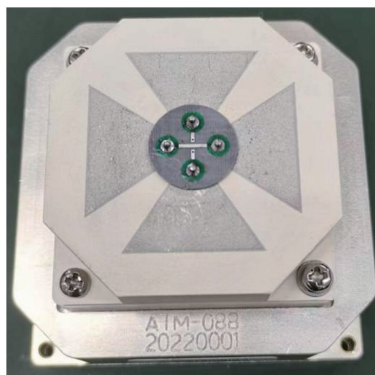
2 天线结构设计

2.1 天线单元结构

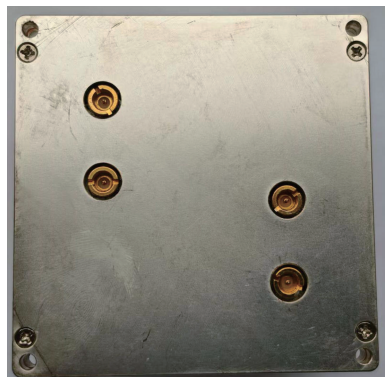
天线单元与双工器单独设计。天线主要由辐射叶、介质块、印制板、十字馈电盘等组成;双工器主要由金属腔体、谐振器、射频连接器构成。仿真与实物模型如图 9 所示,组件整体尺寸为 70 mm×70 mm×50 mm。



(a) 天线组件结构



(b) 实物模型正面



(c) 实物模型背面
图 9 天线组件结构

Fig. 3 Structure of the antenna component

如图 9 所示,天线辐射叶片刻蚀在介质块上,十字馈电盘与印制板上的定向耦合器通过金属柱连接。天线部分通过螺钉固定在双工器沉槽处,天线与双工器在内部采用焊针互联,双工器底部预留出 4 个 J.DMP 连接器接口与外部相接。

2.2 天线仿真与测试结果分析

为了检验设计方案的可行性,对仿真模型进行加工和测试,测试项目包括散射参数、归一化辐射方向图、增益值、轴比等。由于所设计天线组件的左旋圆极化和右旋圆极化其天线单元结构与双工器结构设计均为对称结构,为减少冗余,本文设计仅给出左旋端口处的仿真与测试结果。由上节可知,双工器通道内的抑制较高,因此对增益、轴比、方向图等结果进行展示时仅给出对应频段。

2.2.1 散射参数

图 10 为所设计天线组件的散射参数随频率的变化曲线。

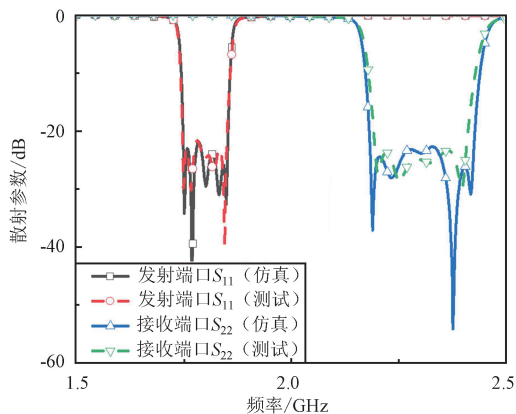


图 10 天线散射参数曲线

Fig. 10 Antenna scattering parameter curve

从图 10 可以看出,所设计天线左旋接收与发射端口反射系数在工作频段内均 < -20 dB,说明天线

部分与双工器部分阻抗匹配良好。由于双工器抑制度较高,发射通道对接收频段的抑制达到了 120 dB,在实际测试中电压传输系数已经淹没在噪声之中,故此处仅给出端口反射系数仿真与测试结果。

2.2.2 增益仿真及测试结果

天线的增益值代表了其接收与发射信号能力的强弱,通过比较法原理在微波暗室中对天线增益进行测量,结果如图 11 所示。

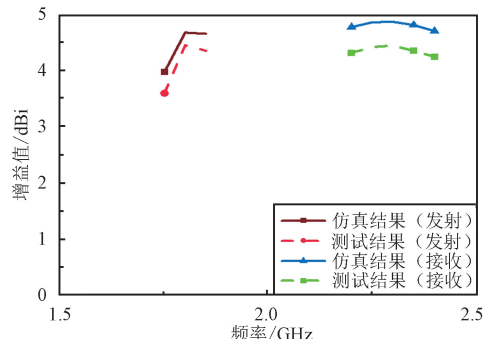


图 11 天线仿真与测试的增益值曲线

Fig. 11 Antenna simulation and test gain curve

由图 11 可以看出,天线组件在 1.75 ~ 1.85 GHz 频段发射增益值达到 3.5 dBi,在 2.2 ~ 2.4 GHz 频段内接收增益达到 4.2 dBi,满足工程中天线阵元的增益值需求。

2.2.3 轴比仿真及测试结果

轴比是衡量圆极化天线性能关键参数之一,其表征的是辐射圆极化电磁波行程轨迹的椭圆程度,通常用极化椭圆长轴与短轴之比表示。

由图 12 可以看出,所设计天线组件在接收频段 2.2 ~ 2.4 GHz 与发射频段 1.75 ~ 1.85 GHz 内轴比值均 < 1.8 dB,表明设计的天线具有良好的圆极化性能。

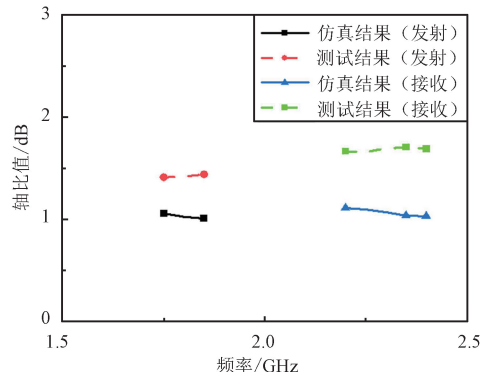


图 12 天线轴比仿真与测试结果

Fig. 12 Simulation and test results of the antenna axis ratio

2.2.4 归一化辐射方向图仿真与测试结果

天线辐射方向图是对天线辐射特性的图形化表示,表征了在距离天线一定间距处辐射场的归一化场强模值随扫描角度的变化规律,可清晰、直观地得

到天线辐射电磁波的性能和方向性,图 13 给出了所设计天线在发射与接收频段的归一化方向图。可以看出,仿真与测试的方向图结果吻合良好,表明所设计的天线具有稳定的辐射性能。

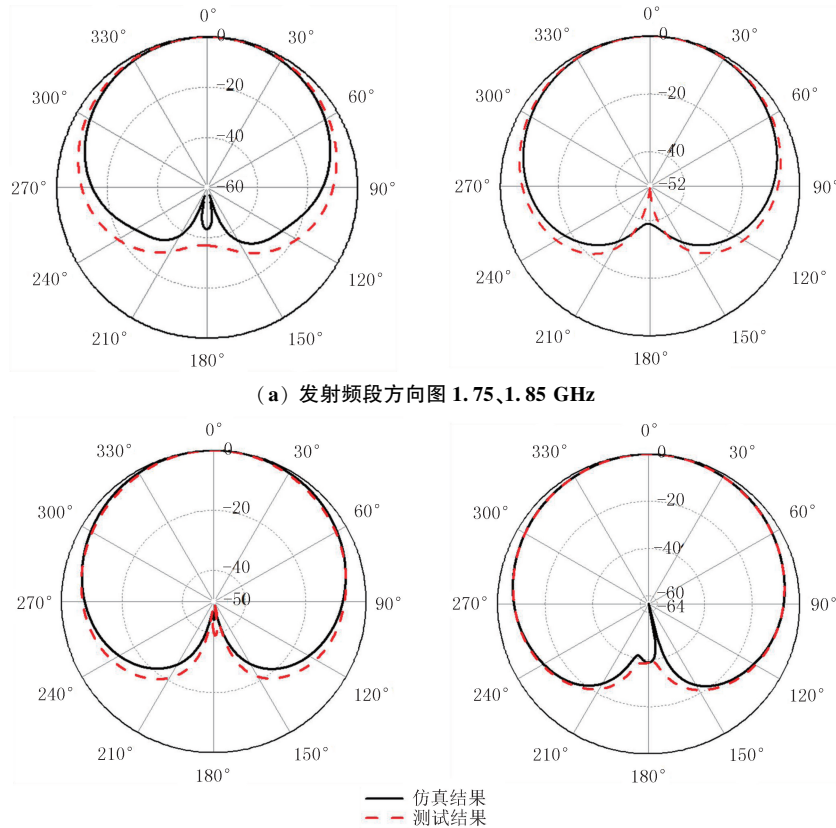


图 13 天线的归一化方向图

Fig. 13 Antenna normalized radiation patterns

为明显地展示本设计的先进性,表 1 给出了所设计成果与其他类似设计的对比结果。

表 1 所设计成果与类似设计对比

Tab. 1 Comparison of the proposed antenna and other similar designs

设计方案	频段/GHz	极化类型	滤波器类型	收发隔离/dB
[16]	1.71~2.82	双圆极化	—	—
[17]	1.83~1.89、 4.17~4.29	单圆极化	—	—
[18]	18.85~20.8、 29.5~30.9	双圆极化	—	—
[19]	f1±0.015、 f2±0.015、	单圆极化	微带滤波器	≥45
[20]	FRL~FRH、 FTL~FTH、	双圆极化	波导腔体 滤波器	≥50
所研制 天线	1.75~1.85、 2.2~2.4	双圆极化	同轴腔体 滤波器	≥70

由表 1 可以看出,所设计天线组件同时具备双圆极化类型与收发通道隔离较高的特性,表明该设计成果具有一定先进性。

3 结束语

通过对宽频带圆极化天线与双工器单独设计,并加工实物进行组合测试,可得所设计双频双圆极化对称阵子天线组件阻抗可完全覆盖接收频段 2.2~2.4 GHz 与发射频段 1.75~1.85 GHz,接收通道对发射频段的抑制达到了 70 dB,发射通道对接收频段的抑制达到了 120 dB,且在接收频带与发射频带轴比值均小于 1.8 dB,仿真与测试的归一化辐射方向图吻合良好,很好地实现了发射与接收天线一体化设计,为工程应用中解决安装结构紧凑,但同时完成发射与接收任务的情况提供了可行性的设计方案。

参考文献

- [1] 汪冲. 毫米波一体化天线研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [2] LO Y, SOLOMON D, RICHARDS W. Theory and Experiment on Microstrip Antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1979, 27(2): 137-145.
- [3] CHEN Y K, YANG S W, NIE Z P. Bandwidth Enhancement Method for Low Profile E-shaped Microstrip Patch Antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(7): 2442-2447.
- [4] 姜铭鑫. 基于开槽技术的小型多频微带天线的研究与设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.
- [5] MA L N, SHAO Z J, LAI J, et al. A Compact Dual-decoupling Scheme for Aperture-coupled and Probe-fed Closely-spaced Wideband Microstrip Antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(11): 9072-9077.
- [6] KIN J, OH J. Liquid-crystal-embedded Aperture-coupled Microstrip Antenna for 5G Applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(11): 1958-1962.
- [7] BHATTACHARJEE A, BHAWAL A, KARMAKAR A. Vivaldi Antennas: A Historical Review and Current State of Art[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2021, 13(8): 833-850.
- [8] SHI X R, CAO Y F, HU Y G, et al. A High-gain Antipodal Vivaldi Antenna with Director and Metamaterial at 1-28 GHz[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(12): 2432-2436.
- [9] TOK B Y, CAHILL R, FUSCO V. Understanding and Measuring Circular Polarization[J]. IEEE Transactions on Education, 2003, 46(3): 313-318.
- [10] 夏桥江, 蔡潇, 文舸一. 用于 Ka 波段卫星通信的双频段圆极化无源相控阵天线[J]. 无线电工程, 2024, 54(3): 687-694.
- [11] GOVINDARAJAN H, PAVONE S C, DI DONATO L, et al. Design of A Compact Dual Circular-polarized Antenna for L-band Satellite Applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(4): 547-551.
- [12] YE Q C, LI J L, ZHANG Y M. A Circular Polarization-reconfigurable Antenna with Enhanced Axial Ratio Bandwidth[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(6): 1248-1252.
- [13] 孙龙, 卢保军, 陈会永, 等. 一种高选择性宽带外抑制带通滤波器[J]. 无线电工程, 2021, 51(6): 514-518.
- [14] LI X. Continuously Tunable Substrate Integrated Coaxial Line Bandpass Filters with Liquid Crystal Technology[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63(5): 1421-1424.
- [15] TA S X, PARK I, ZIOLKOWSKI R W. Crossed Dipole Antennas: A Review[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015, 57(5): 107-122.
- [16] LI J F, XU T, WU D L, et al. A Dual-circularly Polarized Wideband Dipole Antenna with Stable Axial-ratio and Half-power Beamwidths[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(7): 1701-1705.
- [17] ZHANG H, HUANG Y, ZHANG Y D, et al. A Design of Dual-band Circularly Polarized Microstrip Antenna[C]// 2022 6th International Conference on Communication and Information Systems (ICCIS). Chongqing: IEEE, 2022: 12-16.
- [18] LIU Y, YUE Z Z, JIA Y T, et al. Dual-band Dual-circularly Polarized Antenna Array with Printed Ridge Gap Waveguide[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(8): 5118-5123.
- [19] 范彬彬. 卫星通信圆极化微带天线的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [20] 余子腾. Ku 波段卫星通信阵列天线研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.

作者简介

李中伟 男, (1976—), 硕士, 副高级工程师。主要研究方向: 无线电测控。

董润鹏 男, (1990—), 博士, 工程师。主要研究方向: 无线电测控。