

一种 S 频段双圆极化相控阵子阵天线设计

魏德肖, 陈 兵, 崔雪琪, 张 睿
(重庆航天火箭电子技术有限公司 重庆 400039)

摘要: 针对航天多目标测控领域中的相控阵天线, 设计了一种工作在 S 频段、尺寸为 116 mm×116 mm×16 mm 的双圆极化微带相控阵子阵天线。天线采用探针接触和电磁耦合两种馈电方式实现宽频带, 通过 90°极化电桥实现左、右旋同时双圆极化, 通过合理布设金属化接地孔提高阵元间隔离度。研究表明, 相控阵子阵天线在工作频带内的回波损耗 < 16.3 dB, 阵元间隔离度均 ≥ 15 dB, 顶点增益可达 8.3 dB, 方向图半功率波束宽度 > 35°, 电压驻波比 ≤ 1.43, ±60° 角域内的轴比 ≤ 2.1 dB, 仿真和测试结果一致性较高; 天线具有低剖面 (高度为 0.1 λ₀, λ₀ 为空气介质波长)、结构简单、易于加工等特点, 满足预期设计要求, 为多目标相控阵测控系统研制提供了技术依据和产品支撑。

关键词: S 频段; 相控阵; 双圆极化; 子阵天线

中图分类号: V556.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)02-0097-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210623001

引用格式: 魏德肖, 陈兵, 崔雪琪, 等. 一种 S 频段双圆极化相控阵子阵天线设计[J]. 遥测遥控, 2022, 43(2): 97-103.

Design of S-band dual circularly polarized phased array sub-array antenna

WEI Dexiao, CHEN Bing, CUI Xueqi, ZHANG Rui

(Chongqing Aerospace Rocket Electronic Technology Co., Ltd., Chongqing 400039, China)

Abstract: Aiming at the phased array antenna in the field of aerospace multi-target measurement and control, a dual circularly polarized microstrip phased array sub-array antenna with a size of 116 mm×116 mm×16 mm working in the S-band is designed. The antenna adopts two feeding modes of probe contact and electromagnetic coupling to achieve a wide frequency band; a 90° polarization hybrid is used to achieve simultaneous double circular polarization of left and right rotation. The research results show that the return loss of the sub-array antenna in the working frequency band < -16.3 dB, the same polarization isolation and the opposite polarization isolation ≥ 15 dB, the peak gain can reach 8.3 dB, the half-power beamwidth of the pattern > 35°, and the voltage standing wave ratio ≤ 1.43, the axial ratio within the range of ±60° ≤ 2.1 dB, the simulation and test results are in good agreement. At the same time, the antenna has the characteristics of low profile (height dimension is 0.1 λ₀, λ₀ is air medium wavelength), simple structure, easy processing, etc., meeting the expected design requirements. It provides technical basis and product support for the company's multi-objective phased array measurement and control system development.

Key words: S-band; Phased array; Dual circular polarization; Sub-array antenna

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210623001

Citation: WEI Dexiao, CHEN Bing, CUI Xueqi, et al. Design of S-band dual circularly polarized phased array sub-array antenna[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(2): 97-103.

引 言

随着航天技术的不断发展和航天活动的日益频繁, 航天测控也由传统的单波束、单目标测控体制逐步发展为多波束、多目标测控体制^[1,2]。而采用抛物面天线的传统单个地面测控站已经无法满足同时多目标测控任务的需求^[3,4], 采用相控阵天线加数字波束形成 DBF (Digital Beam Forming) 的架构可以实现同时多目标的测控^[5,6], 该架构的单站不仅可以实现全空域范围内任意分布多达十几个目标的测控, 还能够适应未来测控网络化的发展趋势, 是一种新型测控架构^[2]。而相控阵天线作为该新型测控架构的重要

组成部分，其重要性不言而喻。

文献[7]设计并研制了一种基于 H 形缝隙耦合馈电的微带双极化相控阵天线，两个正交极化的线天线一致性良好，回波损耗 < -10 dB；文献[8]采用切角方形贴片实现 S 波段单圆极化天线设计，天线高度为 14.7 mm、回波损耗 < -10 dB、圆极化轴比 < 6 dB；文献[9]设计了一种 S 频段宽波束圆极化微带天线，通过在天线的辐射贴片上附加寄生贴片和利用金属化过孔实现单边短路，单元增益约为 5 dB、电压驻波比 < 1.6；文献[10]设计了一种工作于 S 频段的多频缝隙微带天线，以基本矩形双频微带天线为基础，采用同轴馈电，在矩形贴片上加载圆形和矩形缝隙，回波损耗 < -22 dB、单元增益约为 4 dB。

本文设计的相控阵子阵天线是应用于多目标相控阵这一新型测控架构，其单元天线是采用双馈点探针接触和电磁耦合两种馈电方式的多层微带贴片天线。双馈点探针通过等幅、相差 90°极化电桥网络合成左旋、右旋同时双圆极化信号，之后再通过电磁耦合和分立辐射层完成对空间电磁波信号的辐射。相控阵子阵天线由四个完全相同的单元天线构成，子阵天线结构简单，易于实现，其工作频段内的回波损耗 < -16.3 dB，阵元间隔离度均 > 15 dB、顶点增益可达 8.3 dB、方向图半功率波束宽度 > 35°、电压驻波比 ≤ 1.43、±60°角域内的轴比 ≤ 2.1 dB，具有良好的圆极化特性，仿真和测试结果一致性较高；同时该天线具有低剖面（高度尺寸为 0.1 λ₀，λ₀ 为空气介质波长）、结构简单、易于加工等特点。

1 相控阵单元天线分析与设计

1.1 相控阵单元天线馈电网络特性

相控阵单元天线是采用双馈点探针接触和电磁耦合两种馈电方式的多层微带贴片天线。由于相控阵天线需要同时输出左旋和右旋双圆极化信号，因此相控阵单元天线的馈电网络采用如图 1 所示的 3 dB 90°电桥设计，通过双馈点正交馈电，最终将两路幅度相等、相差 90°的信号合成为双圆极化信号^[11-13]，该馈电网络结构简单，成本低廉，且易于加工实现。

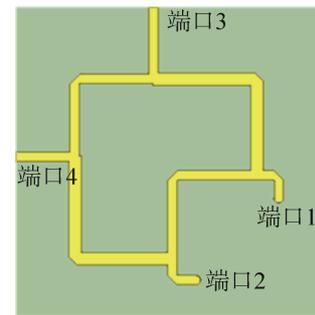


图 1 3 dB 90°极化电桥仿真模型

Fig. 1 3 dB 90° polarization bridge simulation model

图 2 为馈电网络的回波损耗曲线，从图中可以看出在 2.2 GHz~2.4 GHz 工作频段内 S11 和 S22 < -19.5 dB、S33 和 S44 < -11.8 dB；图 3 所示为馈电网络的端口隔离和插入损耗曲线图，从图中可以看出在 2.2 GHz~2.4 GHz 工作频段内各个端口的隔离度均 > 14 dB、插入损耗均 < 4 dB；图 4 所示为馈电网络 S13 和 S14 的相位曲线图，从图中可以看出在 2.2 GHz~2.4 GHz 工作频段内端口相位差在 89.4°~90°之间。馈电网络各项参数实测结果略逊色于仿真结果，但实测结果与仿真结果一致性较高。由此可见，该馈电网络性能优良，满足工程预期要求。

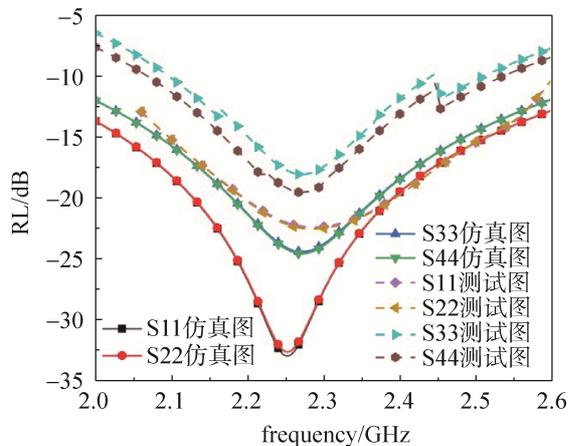


图 2 馈电网络回波损耗曲线

Fig. 2 Feed network return loss curve

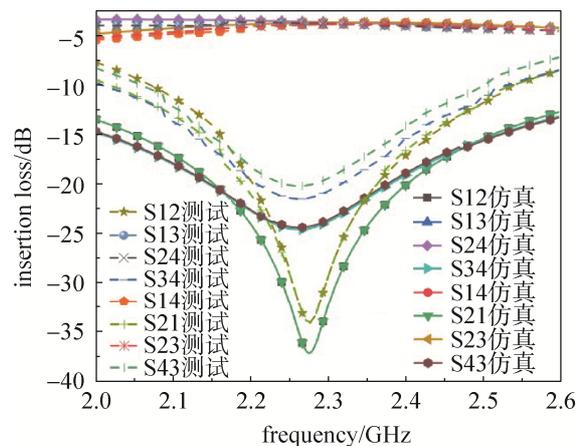


图 3 馈电网络端口隔离和插损曲线

Fig. 3 Feed network port isolation and insertion loss curve

1.2 相控阵单元天线特性

相控阵单元天线主要由独立辐射层和多层微带贴片天线两部分构成,采用在独立辐射层与多层微带贴片天线之间插入空气腔以提高天线工作带宽,其三维电磁仿真模型如图 5 所示,叠层拓扑如图 6 所示。独立辐射层 (PCB 板 4) 选用厚度为 0.79 mm、介电常数为 2.55、铜厚为 0.5 oz 的 Taconic 单面芯板。多层微带贴片天线由两块单面芯板 (PCB 板 1 和 PCB 板 2) 和一块双面芯板 (PCB 板 3) 通过半固化片混合压制而成,构成馈电网络带状线模型。多层微带贴片天线的两块单面芯板 (PCB 板 1 和 PCB 板 2) 均选用厚度为 0.79 mm、介电常数为 2.55、铜厚为 0.5 oz 的 Taconic 单面芯板,双面芯板 (PCB 板 3) 选用厚度为 3.18 mm、介电常数为 6.15、铜厚为 0.5 oz 的 Taconic 双面芯板。通过在馈电网络和辐射单元周围合理布设金属化接地孔提高组阵后阵元间隔离度;独立辐射层与多层微带贴片天线通过金属螺柱进行紧固,将独立辐射层和多层微带贴片天线固定在天线底面的金属板上;天线底面的金属板对天线起结构支撑作用,同时还兼有反射板的作用,以减小天线的后瓣,增大主瓣增益。

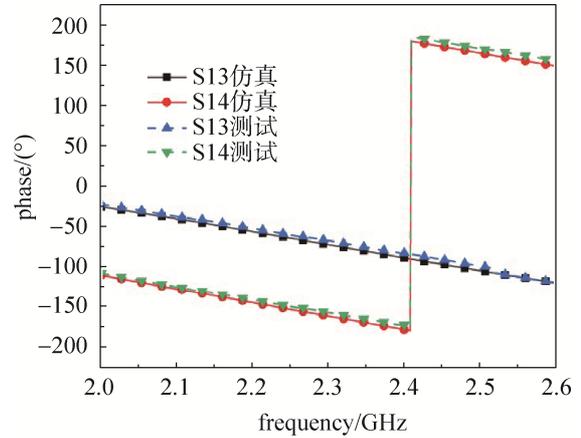


图 4 馈电网络相位曲线
Fig. 4 Phase curve of feeder network

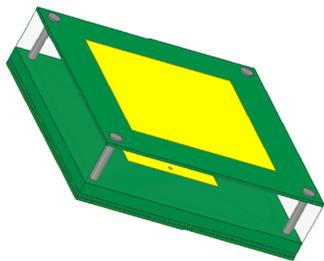


图 5 相控阵单元天线三维仿真模型
Fig. 5 3D simulation model of phased array unit antenna

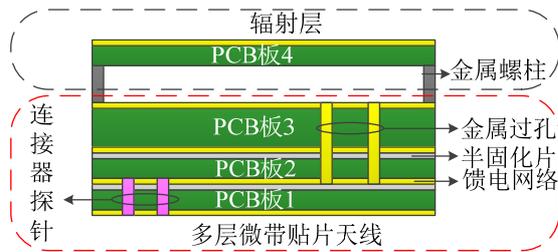


图 6 相控阵单元天线叠层拓扑
Fig. 6 Phased array unit antenna lamination topology

单元天线的多层微带贴片的初始尺寸可由公式 (1) [14]进行估算:

$$l = \frac{1.841c}{2\pi f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \tag{1}$$

式中: l 为贴片边长, c 为光在真空中的速度, f_0 为天线的工作频率, ϵ_r 为介质板的相对介电常数。

对图 5 所示的相控阵单元天线进行实物加工与暗室测试,相控阵单元天线产品实物如图 7 所示,指标特性如图 8~图 10 所示。图 8 所示为相控阵单元天线 S 参数曲线,从图中可以看出,该单元天线在 2.2 GHz~2.4 GHz 频段范围内回波损耗均 < -13.5 dB、端口隔离 > 12.8 dB;图 9 所示为相控阵单元天线轴比曲线,从图中可以看出该单元天线的轴比 < 1.2 dB;图 10 所示为相控阵单元天线方向图曲线,从图中可以看出该单元天线在 2.2 GHz、2.3 GHz 和 2.4 GHz 这三个频点下的增益曲线基本重合,其顶点增益均在 5.2 dB 以上,半功率波

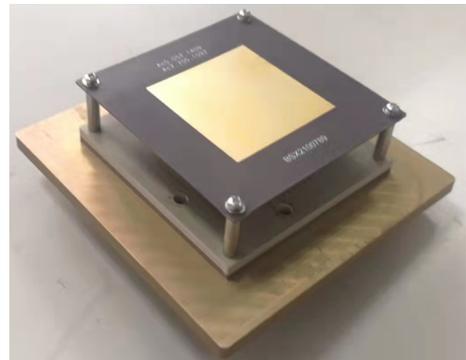


图 7 相控阵单元天线实物
Fig. 7 The production of phased array element antenna

束宽度 > 80°。相控阵单元天线各项参数实测结果虽略逊于仿真结果，但实测结果与仿真结果一致性较高。由此可见，该相控阵单元天线性能优良，满足工程预期要求。

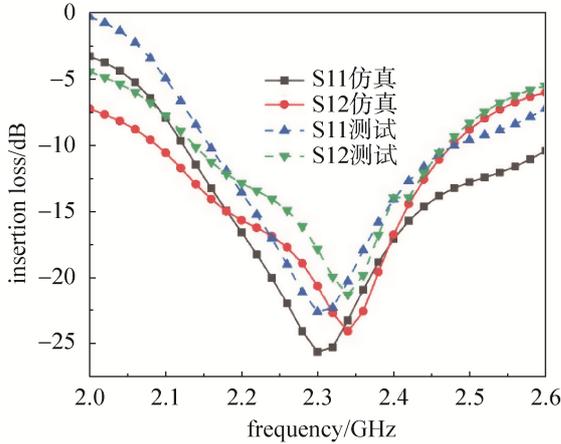


图 8 相控阵单元天线的 S 参数
Fig. 8 The S parameter of phased array element antenna

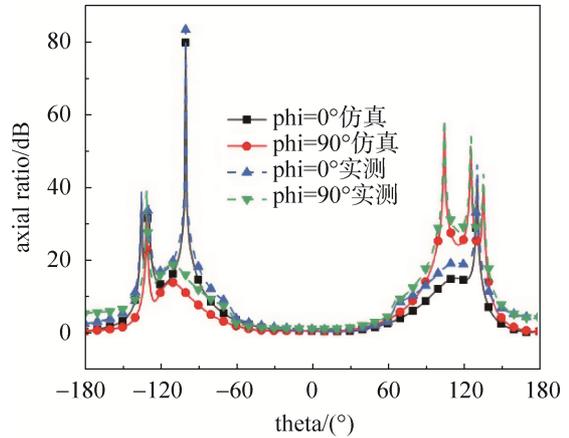


图 9 相控阵单元天线的轴比
Fig. 9 The axial ratio of phased array element antenna

2 相控阵子阵天线分析与设计

2.1 相控阵子阵天线设计

为了扩展相控阵子阵天线的轴比带宽，将 4 个完全相同的相控阵单元天线依次顺时针旋转 0°、90°、180°和 270°组成 2×2 阵列，构成相控阵子阵天线，其三维电磁仿真模型如图 11 所示。图 11(a)所示为相控阵子阵天线正面图，图 11(b)所示为相控阵子阵天线背面图，图 11(c)所示为相控阵子阵天线斜视图，图 11(d)所示为相控阵子阵天线侧视图。该相控阵子阵天线的激励通过背馈探针馈入 3 dB 90°极化电桥，经极化电桥输出同时得到左旋、右旋双圆极化信号，然后通过电磁耦合将多层微带贴片天线能量耦合到独立辐射层，再由独立辐射层完成对电磁波的空间辐射。

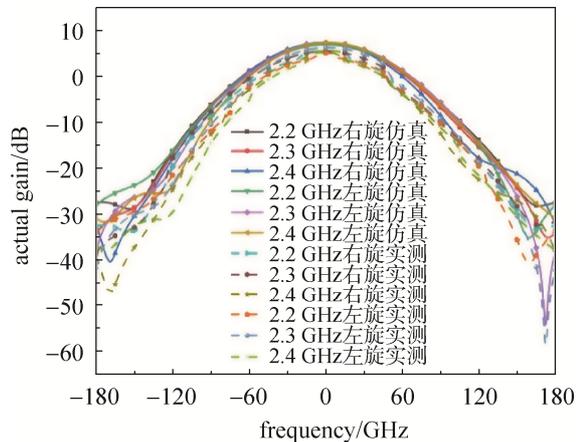
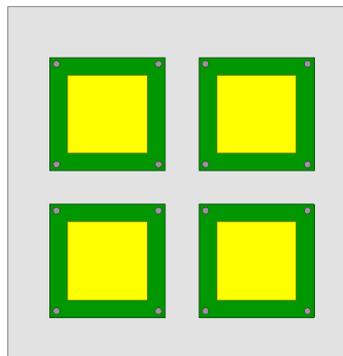
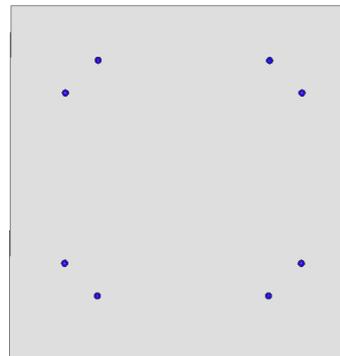


图 10 相控阵单元天线方向图
Fig. 10 The pattern of phased array element antenna



(a) 正面图
(a) Positive figure



(b) 背面图
(b) Back of the figure

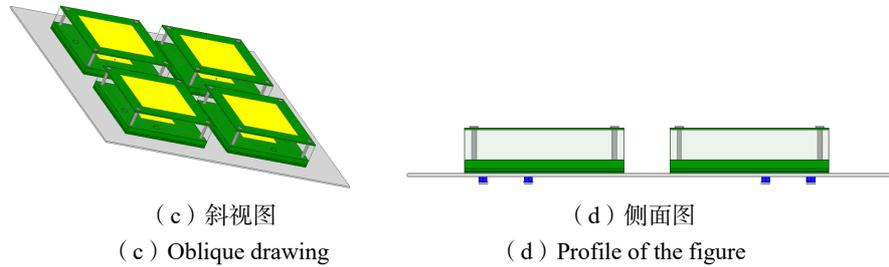


图 11 相控阵子阵天线三维仿真模型

Fig. 11 3D simulation model of phased array antenna

2.2 相控阵子阵天线特性

对图 11 所示的相控阵子阵天线进行实物加工与暗室测试,相控阵子阵天线产品实物如图 12 所示,指标特性如图 13~图 17 所示。图 13 所示为相控阵子阵天线八个端口的回波损耗曲线,从图中可以看出在 2.2 GHz~2.4 GHz 工作频段内八个端口的回波损耗均 < -16.3 dB;图 14 所示为相控阵子阵天线端口隔离度曲线,从图中可以看出在 2.2 GHz~2.4 GHz 工作频段内隔离度均 > 15 dB;图 15 所示为相控阵子阵天线方向图曲线,从图中可以看出在 2.2 GHz、2.3 GHz 和 2.4 GHz 这三个频点下顶点增益均可达 8.3 dB,方向图半功率波束宽度 $> 35^\circ$;图 16 所示为相控阵子阵天线八个端口的电压驻波比曲线,从图中可以看出在 2.2 GHz~2.4 GHz 工作频段内电压驻波比均 < 1.43 ;图 17 所示为相控阵子阵天线轴比曲线,从图中可以看出在 2.2 GHz、2.3 GHz 和 2.4 GHz 这三个频点下 $\pm 60^\circ$ 角域内轴比 ≤ 2.1 dB。此外,由图 14 端口隔离度曲线可以看出, S31、S51 和 S71 的隔离度明显优于 S41、S61 和 S81,这是由于 S31、S51 和 S71 属于交叉极化隔离。相控阵子阵天线各项参数实测结果虽略逊色于仿真结果,但实测结果与仿真结果一致性较高。由此可见,该相控阵子阵天线性能优良,满足工程预期要求。

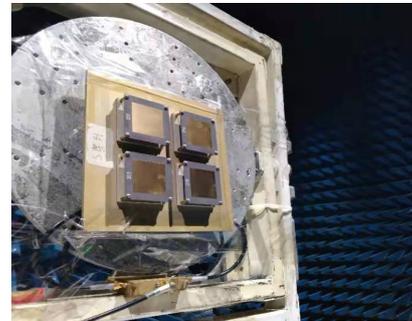


图 12 相控阵子阵天线实物

Fig. 12 The sub-array production of phased array antenna

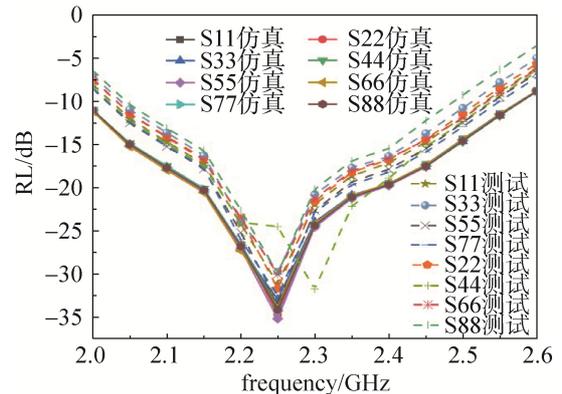


图 13 相控阵子阵天线回波损耗

Fig. 13 The return loss of the sub-array

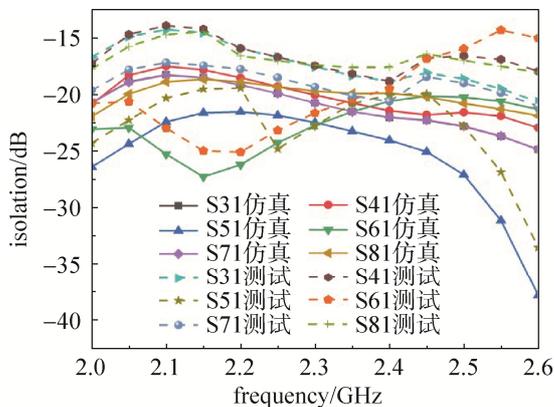


图 14 相控阵子阵天线隔离

Fig. 14 The isolation of the sub-array

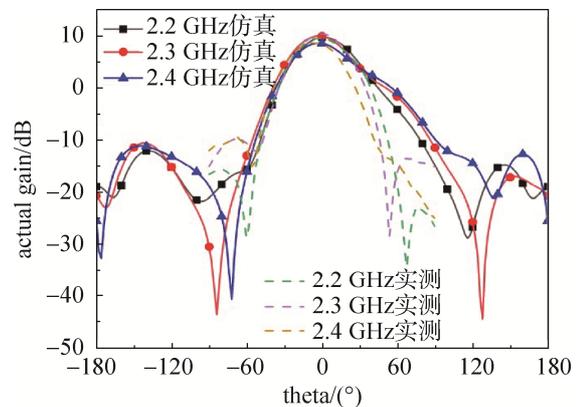


图 15 相控阵子阵天线方向图

Fig. 15 The pattern of the sub-array

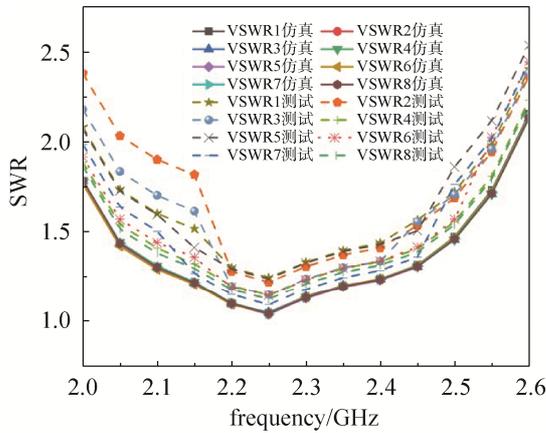


图 16 相控阵子阵天线电压驻波比

Fig. 16 Voltage standing wave ratio of the sub-array

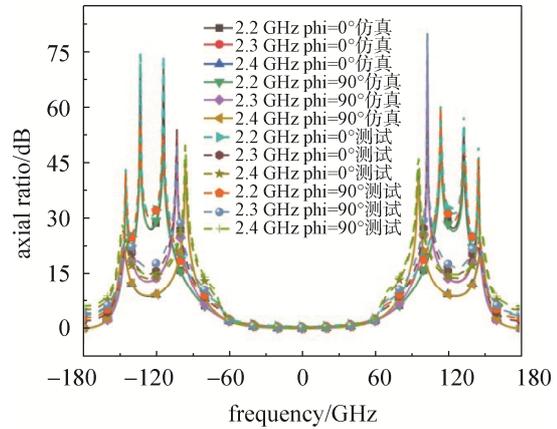


图 17 相控阵子阵天线轴比

Fig. 17 Axis ratio of the sub-array

3 结束语

本文设计的相控阵子阵天线是应用于多目标相控阵测控领域，该相控阵子阵天线由四个完全相同的相控阵单元天线依次顺时针旋转 0°、90°、180°和 270°组成 2×2 阵列。每个相控阵单元天线均采用探针接触和电磁耦合两种馈电方式实现宽频带；采用 90°极化电桥作为馈电网络实现左、右旋同时双圆极化；通过在馈电网络和辐射单元周围合理布设金属化接地孔提高阵元间隔离度。该相控阵子阵天线在工作频带内的回波损耗 < -16.3 dB、阵元间隔离度均优于 15 dB、顶点增益可达 8.3 dB、方向图半功率波束宽度 > 35°、电压驻波比 ≤ 1.43、±60°角域内的轴比 ≤ 2.1 dB，仿真和实测结果一致性较高；同时该相控阵子阵天线具有低剖面、结构简单、易于加工等特点，满足预期设计要求。

参考文献

- [1] 王瑞军, 谢京稳, 王鹏毅. 基于 UWB 的多目标测控通信技术[J]. 飞行器测控学报, 2010, 29(4): 7-11.
WANG Ruijun, XIE Jingwen, WANG Pengyi. A UWB-based multi-object TY&C and communication technology[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2010, 29(4): 7-11.
- [2] 俄广西, 柴霖, 刘云阁. 全空域多目标测控天线技术研究[J]. 电讯技术, 2015, 55(10): 1112-1117.
E Guangxi, CHAI Lin, LIU Yunge. Study on TT&C antenna for multi-target in hemispherical coverage[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(10): 1112-1117.
- [3] 陈传志, 董家宇, 陈金宝,等. 空间大型星载抛物面天线研究进展与展望[J]. 航空学报, 2021, 42(1): 523833-523833.
CHEN Chuazhi, DONG Jiayu, CHEN Jinbao, et al. Research progress and prospect of large spaceborne parabolic antenna [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2021, 42(1): 523833-523833.
- [4] 于海. 毫米波多波束自跟踪抛物面天线研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
YU Hai. Research on millimeter wave multi-beam self-tracking parabolic antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [5] 高军, 周禹龙, 杨群, 等. 一种低副瓣锐截止波束赋形阵列天线设计[J]. 西安电子科技大学学报, 2015, 42(2): 152-156.
GAO Jun, ZHOU Yulong, YANG Qun, et al. A design of low sidelobe sharp cutoff beamforming array antenna[J]. Journal of University, 2015, 42(2): 152-156.
- [6] 彭政谕. 阵列天线波束赋形技术研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
PENG Zhengyu. Research and application of array antenna beamforming technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [7] 张辉, 赵彬, 袁乃昌. 基于 H 形缝隙耦合的宽带双极化微带天线[C]//全国天线年会: 2009: 304-309.
ZHANG Hui, ZHAO Bin, YUAN Naichang. Broad band dual linear polarization H-shaped apertures-coupled microstrip antenna[C]//National Antenna Annual Meeting, 2009: 304-309.
- [8] 袁媛, 汪敏, 王道雨, 等. S 波段宽带圆极化微带天线设计[J]. 微波学报, 2017, 33(4): 36-40.
YUAN Yuan, WANG Min, WANG Daoyu, et al. Design of broad band circularly polarized microstrip antenna at S band[J].

- Journal of Microwaves, 2017, 33(4): 36–40.
- [9] 李荣, 吴景峰, 马志慧, 等. S波段宽波束圆极化天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(4): 625–629.
LI Rong, WU Jingfeng, MA Zhihui, et al. Design of an S-band wide beam circular polarized antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(4): 625–629.
- [10] 池涛, 路厚文. 一种适用于S波段的多频微带天线的研究与设计[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(9): 82–86.
CHI Tao, LU Houwen. Design of a multi-band microstrip antenna for S-band application[J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(9): 82–86.
- [11] 龚书喜. 微波技术与天线[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014: 118–122.
GONG Shuxi. Microwave Technology and Antenna[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014: 118–122.
- [12] 朱睿, 田宇兴, 杨耀庭, 等. 800~2500 MHz宽带3 dB电桥设计[J]. 光通信研究, 2008, 148(4): 67–69.
ZHU Rui, TIAN Yuxing, YANG Yaoting, et al. Design of 800~2500 MHz 3 dB hybrid[J]. Study On Optical Communications, 2008, 148(4): 67–69.
- [13] 李东亚, 薛红喜. 新型3 dB电桥的设计[J]. 电讯技术, 2009, 49(11): 90–93.
LI Dongya, XUE Hongxi. Design of a new-type 3 dB hybrid[J]. Telecommunications Engineering, 2009, 49(11): 90–93.
- [14] ZHOU W L, QU S W, YANG S W. Wide-angle scanning phased array based on long slot antenna[C]// IEEE Proceedings of 2019 Photonics and Electromagnetics Research Symposium, Xiamen, 2019: 1–7.

[作者简介]

- 魏德肖 1989年生, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为相控阵前端技术和微波、毫米波电路。
陈兵 1981年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天测控总体技术。
崔雪琪 1993年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为相控阵天线及其他种类天线的设计工作。
张睿 1965年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为测控通信系统设计。

(本文编辑: 杨秀丽)