

Ku频段全金属圆极化平板天线设计

吴守天, 郑治, 郑雨阳

(天地信息网络研究院(安徽)有限公司, 安徽合肥 230088)

摘要:本文介绍一种Ku频段全金属圆极化平板天线的设计,采用多层金属波导腔体结构降低天线剖面,由上到下依次为辐射层、谐振层、功分馈电网络层,其中,辐射层为 4×4 个斜六边形开口波导腔体,将线极化信号扭转为圆极化波辐射;谐振层利用梅花状波导腔体有效展宽了天线的阻抗带宽,功分馈电网络层为紧凑型一分四波导功分器。通过电磁仿真软件Ansoft HFSS进行仿真设计,仿真结果表明,该天线相对阻抗带宽为21.8%,在工作频带内,驻波小于2.3 dB轴比带宽为5.4%,天线效率大于80%。根据仿真设计结果,加工了一套 12×12 单元天线阵列,对阵中天线单元进行测试,测试结果与仿真结果符合较好。

关键词:高效率;高增益;圆极化;平板天线**中图分类号:**TN821 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2337(2021)06-0717-05

Design of Ku-Band All-Metal Circularly Polarized Planar Antenna

WU Shoutian, ZHENG Zhi, ZHENG Yuyang

(Institute of Space Integrated Ground Network, Hefei 230088, China)

Abstract: In this paper, a Ku-band all-metal circularly polarized planar antenna is presented. The antenna is a multilayer structure of waveguide cavity with low profile, mainly including three parts: the radiation layer, the resonant layer, and the feed-network layer, from top to bottom, respectively. The radiation layer is composed of 4×4 oblique-hexagon open waveguide cavity to change the linearly polarized signal to circularly polarized wave. The resonant layer uses the plum-blossom waveguide cavity to enhance the impedance bandwidth. The feed-network layer is a compact four-way power divider. Using Ansoft HFSS to design and simulate, the results show the relative impedance bandwidth is 10.3% with VSWR below 2, the relative axial ratio bandwidth is 5.4%, and the radiated efficiency is higher than 80%. On basis of the simulated results, we fabricate a 12×12 array. The elements in the array are measured. Compared with simulations, the measurements reveal good agreement.

Key words: high efficiency; high gain; circular polarization; planar antenna

0 引言

随着现代雷达、卫星通信的飞速发展,电磁频谱资源越来越紧张,在广泛使用的微波频段低端,电磁干扰也越来越严重,因此电子信息系统的工作频段不断向Ku、Ka等较高频段发展。Ku频段无线通信系统具有很多优点,如具有全天候、大容量、双向实时性、任意地形、任意气象条件下不间断传输信号的特点,成为通信领域最具发展前景的方向之一^[1]。

天线作为通信和雷达等电子信息系统的前端,对系统性能有着至关重要的影响。随着波束覆盖范围的扩大,以及对高速目标在各种极化方

式和气候条件下跟踪测量的需要,单一线极化方式已远难满足要求^[2],圆极化天线能降低多径效应导致的时延扩散,降低码间串扰,减少电离层引起的法拉第旋转效应和极化失配导致的极化损耗,同时收发天线之间的相对位置可以更加灵活,被广泛应用于通信、雷达、电子对抗、遥测遥感、天文及电视广播等领域。

目前,应用比较广泛的Ku频段圆极化天线有微带贴片天线、波导缝隙天线、喇叭天线等^[3-6]。微带贴片天线在尺寸、成本、极化实现方面有一定优势,且易于组阵、集成与共形,但由于在Ku频段损耗包括介质损耗、欧姆损耗、辐射损耗等比较大,难以实现高天线效率;波导缝隙天线具有效率高、结构紧凑、机械强度高等特性,但局限于天线体制,组阵

后无法实现二维宽角扫描;喇叭天线属于行波天线,工作带宽较宽,定向性强,但剖面高体积大的缺点无法满足新一代高速移动平台的要求。

为了获得高效率高增益的圆极化辐射性能,兼顾低剖面、强应力的结构优势,金属平板天线是较佳的选择。文献[7]介绍了一种全波导结构的双极化平板天线,采用分子扩散焊工艺加工,实现了双线极化的阵列构成,该天线辐射单元为十字槽,缝隙耦合馈电,天线工作带宽为 11%;这种全波导阵列天线由于没有介质损耗,总效率很高,整个频段内大于 70%,然而文章并没有给出圆极化的合成方式和预估性能。文献[8]设计一种 16×16 元高增益双圆极化平板天线,使用具有宽频特性的波导口径作为辐射单元,通过加载隔板来实现双圆极化。天线工作带宽大于 16%,工作频带内效率大于 60%。这种全波导双圆极化天线具有宽带高增益特性,但隔板圆极化器的引入大大增加剖面高度,复杂的馈电网络降低了总效率。

针对现有全金属平板天线存在的问题,本文提出一种结构紧凑、材料单一、易于集成的全金属圆极化平板天线。该天线工作于 Ku 频段,由多层金属波导腔体一体化加工而成,加工难度低,环境适应性高,采用直接在辐射层实现圆极化的方式,降低了天线的剖面,具有高效率、高可靠性、高机械强度等优点。

1 天线单元设计

本文设计的圆极化平板天线的天线单元结构如图 1 所示,该天线由上到下依次为辐射层、谐振

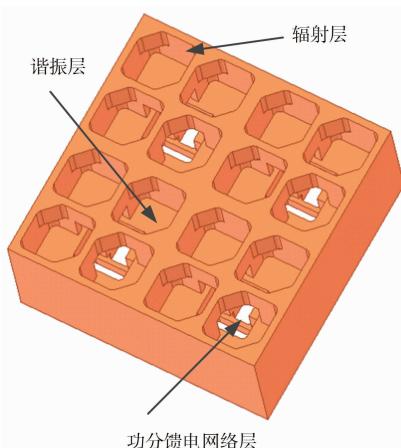


图 1 天线单元三维立体结构示意图

层及功分馈电网络层,各层皆为波导腔体结构,利用辐射层 4×4 元斜六边形开口波导腔直接实现圆极化,通过优化谐振层的梅花状波导腔体及功分馈电网络层的输出端口台阶大小,获得优良的阻抗匹配和圆极化性能。天线整体厚度小于半个波长。

1.1 辐射层设计

辐射层结构如图 2 所示,采用 4×4 元呈沿斜 45° 方向均匀分布的六边形波导腔体,将嵌入的信号分离形成相互正交相差 90° 的 TE_{10} 模与 TE_{01} 模,在辐射面满足形成圆极化波的条件。相邻六边形波导腔体间距 $d_m = 12.2$ mm,每个六边形波导腔体的边长 $w_m = 11.5$ mm。由于每 2×2 元六边形波导腔体对应一个谐振层馈电波导,相当于在辐射口面加载金属栅隔,有效抑制瓣瓣,同时提高了口径效率。

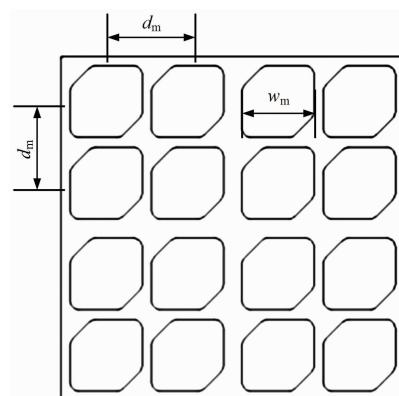


图 2 辐射层平面示意图

1.2 谐振层设计

谐振层结构如图 3 所示,由调节匹配的梅花状波导腔体和尺寸较小的方形波导腔组成。梅花状波导腔体的每个边中点处对称分布了 4 个同样尺寸的膜片,起到阻抗变换和模式变换的作用,大大提高天线的阻抗带宽,同时容性膜片易激励起高次模,与主模混合在辐射口径实现更加均匀的电场分布,提高天线口径效率。腔体方形波导腔连接底层波导馈电网络的功分端口,实现阻抗匹配与能量馈入。为了实现最佳匹配效果,经过参数优化后最终得到梅花状波导腔的膜片长度 $m_a = 5.2$ mm,宽度 $m_b = 1.4$ mm,方形波导腔的边长 $m_s = 10.4$ mm。

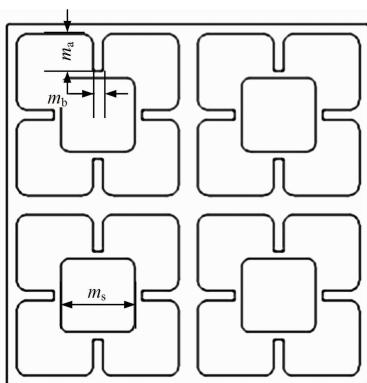


图3 谐振层平面示意图

1.3 功分馈电网络层设计

功分馈电网络层结构如图4所示,采用结构紧凑的一分四E面波导功分器,在功分馈电网络的功分口设计了三层台阶改善匹配,每个台阶的长度相同,都为 $m_s=10.4\text{ mm}$,宽度从上到下依次为 $m_{t1}=8.2\text{ mm}$ 、 $m_{t2}=6\text{ mm}$ 、 $m_{t3}=5.4\text{ mm}$,输入总口为标准波导口。

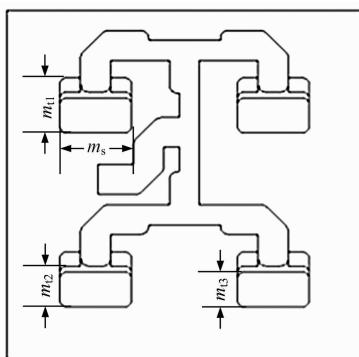


图4 功分馈电网络层平面示意图

利用高频电磁仿真软件HFSS对所设计的天线单元进行仿真计算与优化,端口驻波的仿真结果如图5所示,可以看到,其端口驻波在14.6~18.2 GHz的频率范围内小于2,相对阻抗带宽为

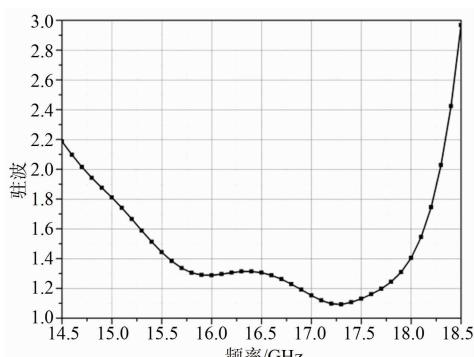


图5 天线单元端口驻波的仿真结果

21.95%;天线在各频点的法向轴比仿真结果如图6所示,可以看出,在15.8~16.7 GHz的频率范围内轴比小于3 dB,相对轴比带宽为5.45%。

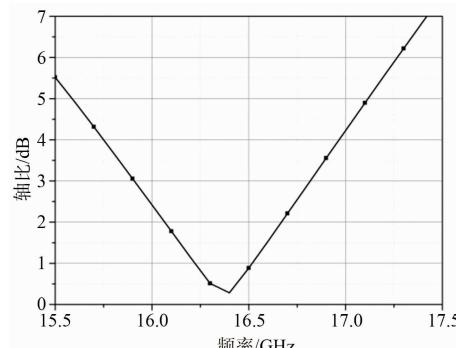


图6 天线单元法向轴比带宽仿真结果

2 天线组阵及测试

基于已设计的4×4元圆极化平板天线单元,将其在两维平行扩展成12×12单元平板天线阵列,扩展后的阵列结构如图7所示。天线阵列的单元间距为52 mm,采用矩形均匀布阵形式,便于整体加工装配,易于集成T/R组件。该阵列由纯金属腔体组成,机械强度高,功率容量大,适合作为可拓展模块应用于大规模相控阵天线系统。

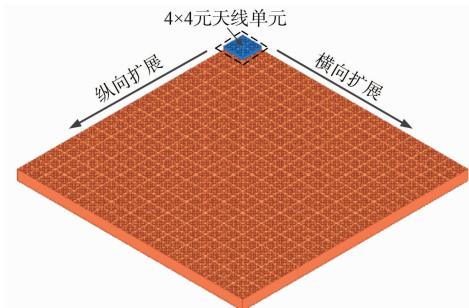


图7 天线阵列三维立体结构示意图

12×12单元平板天线阵列的加工实物如图8

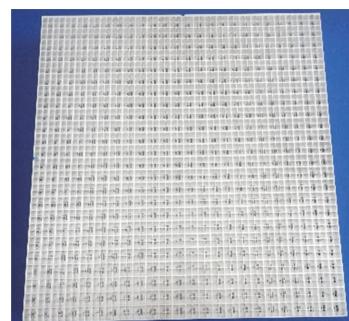


图8 12×12单元全金属圆极化平板天线实物图

所示,采用真空钎焊焊接技术,精密机械加工一体化成型,加工流程简单易操作,成品率与可靠性高。

在平面近场暗室内对平板天线阵中采样单元的各项电性能指标进行了测试,各个随机抽样单元在阵中的分布位置如图 9 所示,测试结果如图 10~图 14 所示。可以看出,8 个随机抽样单元在工作频带内有源驻波低于 2,带内天线效率大于

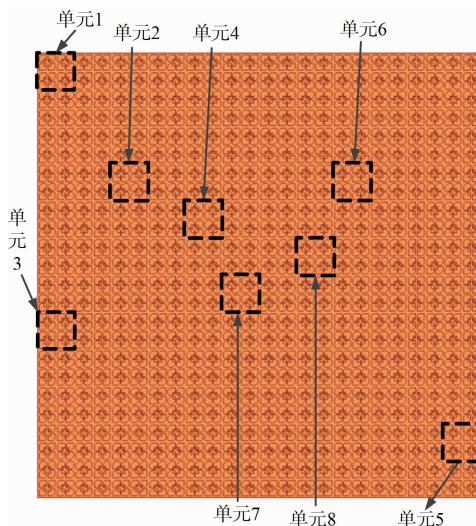


图 9 随机抽样单元位置分布示意图

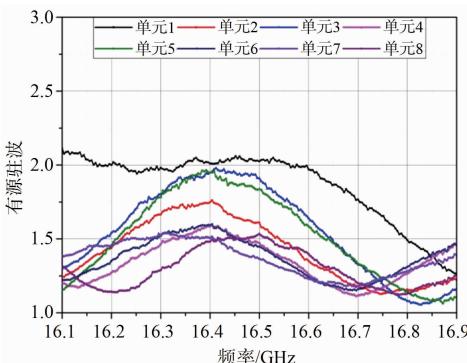


图 10 阵中随机采样单元有源驻波测试结果

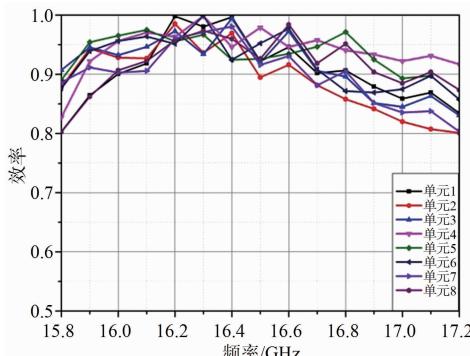


图 11 阵中随机采样单元天线效率测试结果

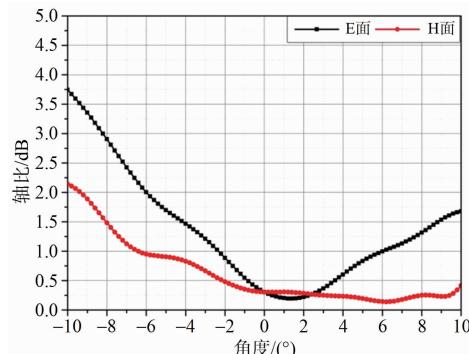


图 12 单元 7 中心频点法向轴比测试结果

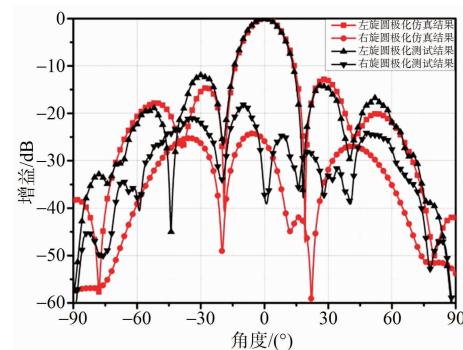


图 13 单元 7 中心频点 H 面方向图仿真与测试结果

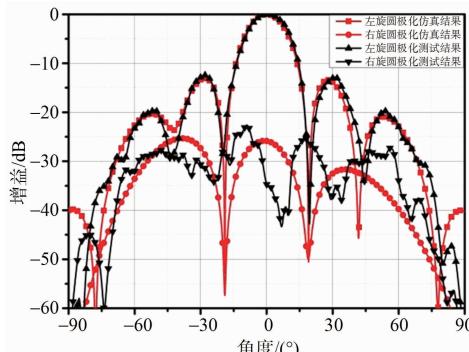


图 14 单元 7 中心频点 E 面方向图仿真与测试结果

80%,天线辐射左旋圆极化波,中心频点波束宽度 16.7°,法向的测试轴比低于 1 dB,测试结果与仿真结果符合较好。

3 结束语

本文介绍了一种工作在 Ku 频段的全金属圆极化平板天线,采用多层波导腔结构,利用 4×4 元斜六边形开口波导腔直接实现圆极化,基于 4×4 元天线单元组成 12×12 单元天线阵列,分层精密机械加工,真空钎焊焊接成形。对阵中单元进行测试,结果表明天线辐射左旋圆极化波,工作带宽

内有源驻波小于2,轴比低于3 dB,效率高于80%。该平板天线具有高效率、低剖面、结构稳定、高功率容量等特点,在新一代雷达、通信系统中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] AL-SAEGH A M, SALI A, MANDEEP J S, et al. Channel Measurements, Characterization, and Modeling for Land Mobile Satellite Terminals in Tropical Regions at Ku-band[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2000, 66(2):897-911.
- [2] 张洪涛,汪伟,张智慧,等.一种新颖的圆极化波导阵列天线设计[J].雷达科学与技术,2014,12(3):329-332.
ZHANG Hongtao, WANG Wei, ZHANG Zhihui, et al. Design of a Novel Circular-Polarization Waveguide Antenna Array[J]. Radar Science and Technology, 2014, 12(3):329-332. (in Chinese)
- [3] FIGUEIREDO J F, DO NASCIMENTO V L. Broadband Microstrip Antenna Array with Circular Polarization on Ku Band[C]//2019 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasilia, Brazil: IEEE, 2019:1-5.
- [4] HUANG Jianquan, LIN Wei, QIU Feng, et al. A Low Profile, Ultra-Lightweight, High Efficient Circularly-Polarized Antenna Array for Ku Band Satellite Applications[J]. IEEE Access, 2017, 5:18356-18365.
- [5] GARCIA-MARIN E, MASA-CAMPOS J L, SANCHEZ-OLIVARES P, et al. Evaluation of Additive Manufacturing Techniques Applied to Ku-Band Multilayer Corporate Waveguide Antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(11):2114-2118.
- [6] SHISHLOV A, VILENKO I, DENISENKO V, et al. Ku/Ka-Band Antenna Terminals for Satellite Communications[C]// 2019 International Conference on Engineering and Telecommunication, Dolgoprudny, Russia: IEEE, 2019:1-5.
- [7] KIM D J, ZHANG M, HIROKAWA J, et al. Design and Fabrication of a Dual-Polarization Waveguide Slot Array Antenna with High Isolation and High Antenna Afficiency for the 60 GHz Band[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2014, 62(6):3019-3027.
- [8] WU J, CHENG Y J, FAN Y. Millimeter-Wave Wideband High-Efficiency Circularly Polarized Planar Array Antenna[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2016, 64(2):535-542.

作者简介:



吴守天 男,1996年生于安徽合肥,硕士研究生,主要研究方向为卫星通信天线。

郑治 男,1985年生于辽宁本溪,高级工程师,主要研究方向为雷达、通信天线。

郑雨阳 男,1992年生于安徽六安,工程师,主要研究方向为卫星通信天线。

(上接第716页)

作者简介:



杨凯洁 男,1990年3月生,陕西富平人,工程师,现为航天工程大学博士研究生,主要研究方向为SAR欺骗干扰。



冉达 男,1989年2月生,湖南石门人,博士,航天工程大学讲师,主要研究方向为SAR成像及目标识别。



叶伟 男,1969年12月生,江苏铜山人,博士,航天工程大学教授、博士生导师,主要研究方向为雷达电子对抗。



马方方 女,1990年2月生,河南商丘人,硕士,军事科学院系统工程研究院后勤科学与技术研究所工程师,主要研究方向为物联网技术、信号处理。