

一种高效率低副瓣圆极化帽形天线设计

钞 婷, 张 琳, 邓阳光, 杨 洋, 王淑萍, 叶广健

西安航天天绘数据技术有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2026年8月1日; 录用日期: 2026年8月25日; 发布日期: 2026年9月1日

摘 要

文章设计了一款工作于K/Ka频段的帽形馈源及宽带馈电网络, 并将其作为照射器应用于0.8米标准环焦反射面。测试结果显示, 该天线在17.7~21.2 GHz、27.5~31 GHz电压驻波比均小于1.4:1, 天线效率大于65%, 第一副瓣电平优于-14.9 dB。

关键词

高效率, 低副瓣, 圆极化, 帽形馈源, 反射面天线

Design of a High-Efficiency, Low-Sidelobe, Circularly Polarized Hat-Shaped Antenna

Ting Chao, Lin Zhang, Yangguang Deng, Yang Yang, Shuping Wang, Guangjian Ye

Xi'an Aerospace Remote Sensing Data Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: August 1, 2026; accepted: August 25, 2026; published: September 1, 2026

Abstract

This paper designs a hat-shaped feed operating in the K/Ka frequency bands along with broadband feeding networks, which are used as illuminators for a 0.8-meter standard ring-focus reflector. The test results show that the antenna achieves a voltage standing wave ratio of less than 1.4:1 in both the 17.7~21.2 GHz and 27.5~31 GHz frequency ranges, with an antenna efficiency greater than 65% and a first sidelobe level better than -14.9 dB.

Keywords

High-Efficiency, Low-Sidelobe, Circularly Polarized, Hat-Shaped Feed, Reflector Antenna



1. 引言

近年来,卫星通信技术飞速发展。然而,广泛应用于卫星通信系统的传统抛物面天线正面临严峻挑战。对于正馈单反射面结构而言,馈源及馈电网络位于反射面前方,造成口面遮挡;同时,受限于空间布局,难以配置复杂的馈电网络,实现多频共口径工作的难度较大[1];卡塞格伦和格里高利天线虽然避免了馈电网络的遮挡,但馈源对副反射面信号的初级遮挡及副面对主面反射信号的次级遮挡仍然存在,且对于小口径天线易造成初级遮挡大于次级遮挡,导致近轴旁瓣上升的问题;双偏置反射面天线虽然没有副面的遮挡,但对主面、副面、馈源三者的位移和姿态要求较高,结构设计难度大,在Ka频段动中通天线应用中优势不明显;副面母线为椭圆的环焦天线在卫星通信中具有独特的地位,其不存在馈电网络遮挡,天线系统结构稳定,但其副面需要金属支杆或者介质支撑结构固定,易造成副瓣增高、效率下降的问题。如何设计出高效率、低副瓣的天线仍是人们关注的焦点。帽型馈源是近几年小口径天线为减小副面撑杆遮挡提高天线增益经常使用的馈源形式,它的概念是在1986年由Per-Simon Kildal提出来的。帽型馈源的反射板较小,辐射方向图波束宽,用于小焦径比的反射面天线时结构紧凑。它采用圆波导基模进行激励,与传统抛物面天线相比,该天线通过在馈电波导与帽形副反射面间插入介质,避免了副面支撑杆的遮挡问题。其具有诸多优势:较低的交叉极化电平、较低的近轴旁瓣电平、较高的效率。经过数十年的发展,帽型馈源已实现从单一频段到双频、多频的跨越,其阻抗带宽与方向图带宽也从最初不足10%逐步展宽。由于其卓越的辐射性能,近年来,国内外学者对其进行了深入的研究[2][3]。2012年,Erik G. Geterud团队设计了一款工作于Ku频段相对带宽29.7%的经典帽形馈源[4]。同年,中电科54所孙立杰等人设计了一款在17%带宽内1.2以下驻波的Ku频段帽形馈源[5]。随后,南京航空航天大学的开敏、西安电子科技大学的柴玉汶等人都对帽形馈源进行了系统的研究[6][7]。但目前大部分的设计多在Ku频段,对Ka频段,尤其是3.5 GHz带宽的K/Ka频段设计较少[8]-[12]。且基本采用介电常数为2.53的交联聚苯乙烯,该材料刚性高,质地坚硬,但脆性大,受力容易碎裂,抗冲击性能差,在工程化设计中有诸多不便。基于此,本文设计了一种K/Ka双频段帽形馈源,工作频率覆盖17.7~21.2 GHz(接收)和27.5~31 GHz(发射),并将其作为0.8 m标准环焦反射面天线的照射器。馈源后端采用宽带四脊极化器与正交模耦合器,实现了宽带双圆极化设计[13]。经测试,所设计帽形馈源满足K/Ka频段收发各3.5 GHz带宽的使用要求。

2. 双频段低副瓣天线的设计

整套天线系统由三部分构成:一体化介质支撑帽形馈源、0.8 m标准环焦主反射面、宽带四脊圆极化馈电网络。本节依次阐述各部件理论设计、参数优化与电磁工作机理。

2.1. 帽形馈源的设计

帽形馈源由馈电圆波导、波纹型帽状副反射面及一体化介质支撑锥三部分组成,整体结构如图1所示。为解决传统交联聚苯乙烯介质材质脆易断裂的问题,本设计选用相对介电常数 $\epsilon_r = 2.1$ 的聚四氟乙烯一体成型介质支撑实现。

环焦天线要求馈源实现-10 dB等照射锥削,保证主反射面边缘照射均匀、降低边缘绕射副瓣,基于环焦焦径比 $F/D = 0.32$,通过几何光学照射公式初步计算馈源辐射半波束宽度:

$$\theta_{\text{edge}} = 2\arctan(D/4F)$$

带入口径 $D = 0.8 \text{ m}$ 、焦径比 $F/D = 0.32$ ，求得馈源所需半波束宽度 $\pm 88^\circ$ ，以此为约束确定帽形副反射面直径、波纹周期、介质锥高度初始尺寸，本文所设帽形馈源副反射面初始直径 3.3λ 、波纹周期 0.05λ 、介质锥高度 2.1λ 。

圆波导基模 TE_{11} 激励带宽需同时覆盖 K、Ka 双频段，根据波导截止波长公式确定主馈电波导内径，保证 $17.7\sim 31 \text{ GHz}$ 全频段仅传输 TE_{11} 单模，抑制高次模带来的交叉极化抬升，本文选用的波导半径 $R = 5.6 \text{ mm}$ 。

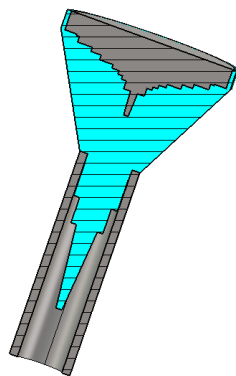
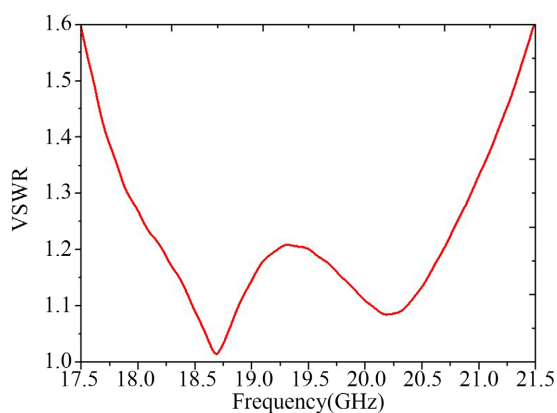
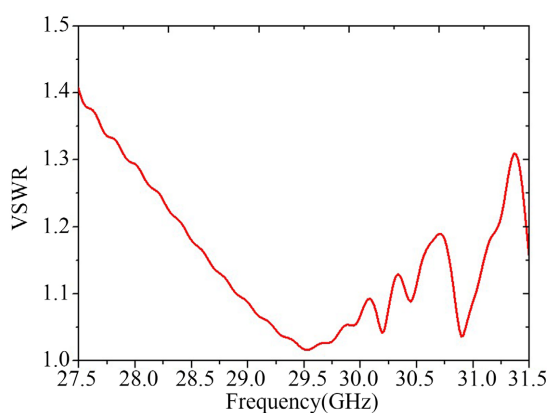


Figure 1. Structural diagram of the hat-shaped feed

图 1. 帽形馈源结构图



(a)



(b)

Figure 2. VSWR simulation curves of hat-shaped feed: (a) Receiving frequency band; (b) Transmitting frequency band

图 2. 馈源驻波仿真结果: (a) 接收频段; (b) 发射频段

计算得电压驻波比及方向图如图 2、图 3 所示。

图 2 给出了帽形馈源的电压驻波比仿真结果,从图中可以看出,在 17.7~21.2 GHz 与 27.5~31 GHz 频率范围内,馈源的电压驻波比小于 1.42:1。

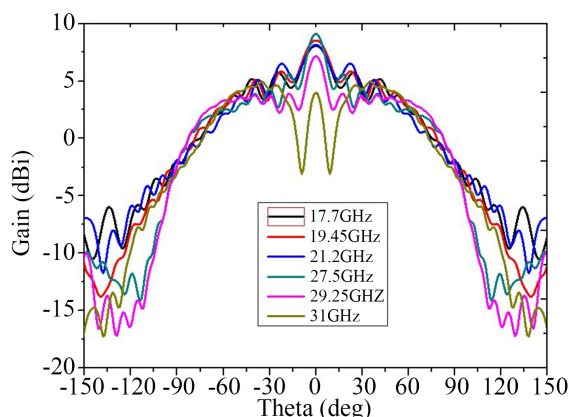


Figure 3. Simulated radiation pattern of hat-shaped feed

图 3. 帽形馈源的仿真辐射方向图

图 3 给出了帽形馈源的方向图仿真结果,从图中可以看出,帽形馈源的能量主要集中在 $\pm 89^\circ$ 之间,波束左右对称无畸变,适配小焦径比环焦反射面均匀照射要求。波纹副反射面配合介质支撑无金属支杆遮挡,消除支杆散射源,从辐射机理层面解决传统环焦天线近轴副瓣抬升问题。

2.2. 反射面天线的设计

选取口径 $D = 800$ mm 的标准环焦主反射面,焦径比 $F/D = 0.32$,将优化完成的帽形馈源置于环焦点位置构建整机电磁模型,结构模型如图 4 所示。

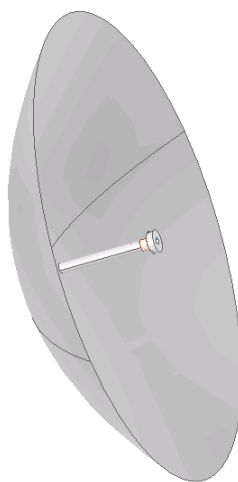


Figure 4. Structural model of the antenna

图 4. 天线结构模型

对 17.7 GHz、19.45 GHz、21.2 GHz、27.5 GHz、29.25 GHz、31 GHz 六个特征频点开展全波仿真,提取 0° 、 90° 正交切面远场方向图,如图 5 所示。

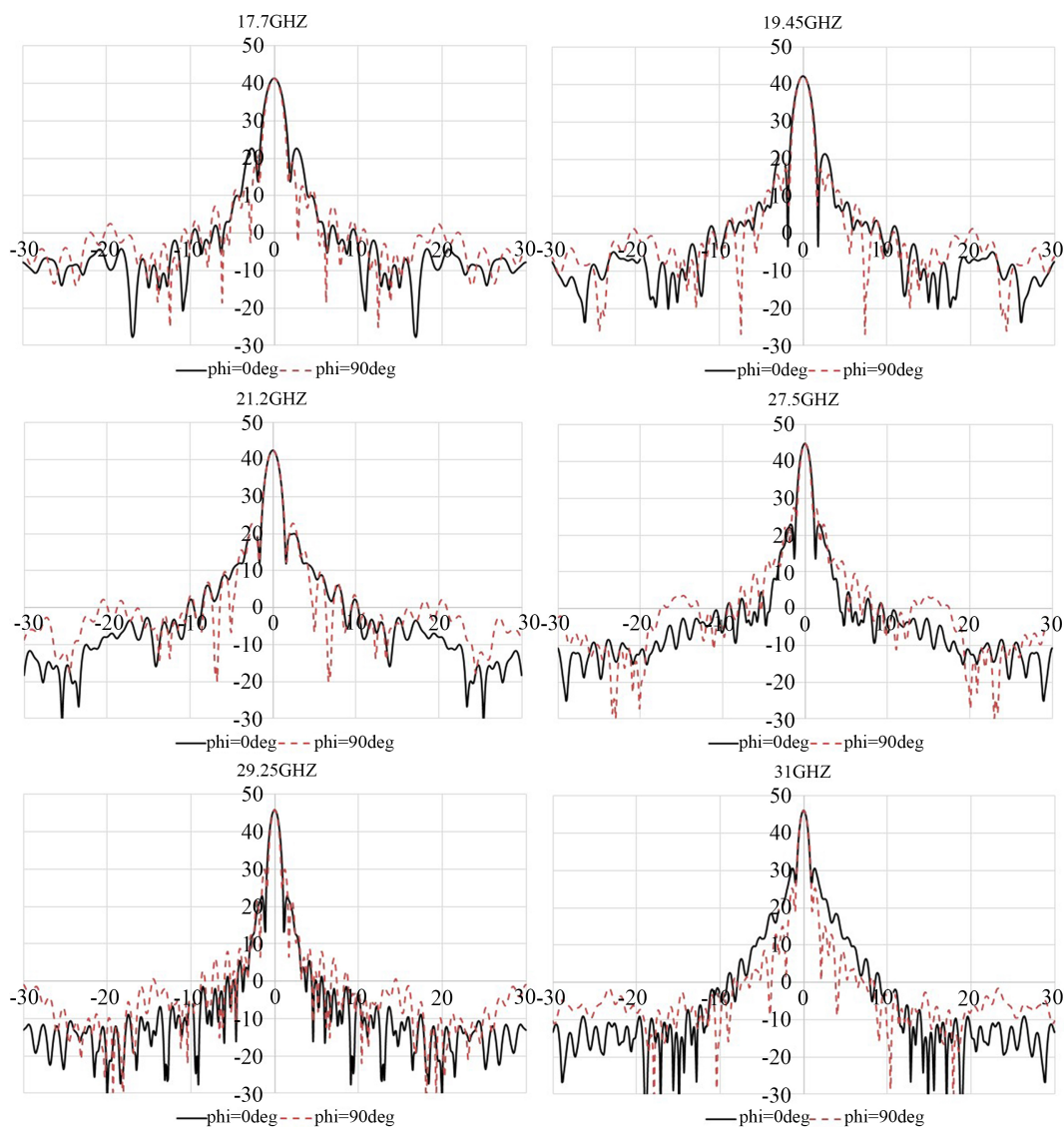


Figure 5. Simulated far-field patterns of orthogonal cut planes at full frequency points

图 5. 全频点下正交切面的模拟远场方向图

天线仿真增益及第一旁瓣电平结果统计于表 1:

Table 1. Simulated gain and first sidelobe level of antenna system

表 1. 天线系统仿真增益与第一副瓣电平

频点(GHz)	增益(dBi)	第一旁瓣(dB)	口面效率
17.7	41.44	-19.7	63.2%
19.45	42.41	-23.9	64.5%
21.2	42.9	-19.8	65.1%
27.5	44.97	-17.8	62.8%
29.25	45.78	-15.7	63.7%
31	46.18	-15.6	62.3%

由图 5 及表 1 的仿真结果可知, 所设计口径 0.8 米的反射面天线, 口面效率全部高于 62%, 双频段第一副瓣电平平均低于-15.6 dB, 低副瓣特性显著; 介质一体化帽形馈源无金属支杆遮挡, 避免遮挡损耗, 实现小口径天线高效率辐射。

2.3. 网络的设计

Ka 频段卫星通信采用圆极化方式, 所设计馈电网络由圆极化器、正交模耦合器及滤波器组成。其中, 圆极化器是一种将线极化转化为圆极化的器件, 目前应用的种类有铁氧体、微带和波导等, 本设计采用波导极化器。常见的波导圆极化器有螺钉极化器、介质插片极化器、波纹极化器、隔板极化器等。螺钉极化器的螺钉高度一般选取高斯分布和升高余弦分布, 在 0.5 dB 的轴比要求下, 工作带宽可达 15%; 介质插片极化器及波纹极化器的轴比带宽优于螺钉极化器; 隔板极化器虽然在轴比带宽上没有波纹极化器宽, 但其本身兼具正交模耦合器的功能, 应用比较广泛。上述极化器均有各自的优势, 但在工作带宽超过 50% 时, 上述极化器的轴比性能会急剧恶化。本文设计了一款四脊圆极化器, 四根台阶式金属脊沿波导轴向均匀分布, 可在宽频内维持两路正交模式 90° 恒定相位差。正交模耦合器(OMT)是馈源网络的重要组成部分, 其主要作用是分离和合成两个正交极化的信号, 也称极化双工器。它的形式有侧壁耦合 OMT、鳍线结构宽带 OMT、四脊结构宽带 OMT、Boifot 结构宽带 OMT、传统十字转门结构宽带 OMT 等结构类型。本方案中采用侧壁耦合 OMT, 直通口为发射频段通道, 耦合口为接收频段通道, 在接收频段通道外接高性能褶皱型低通滤波器, 实现收发极化端口高隔离度分离。整体网络三维模型如图 6 所示。

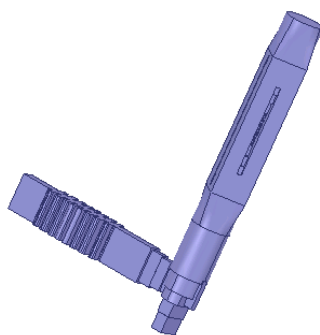
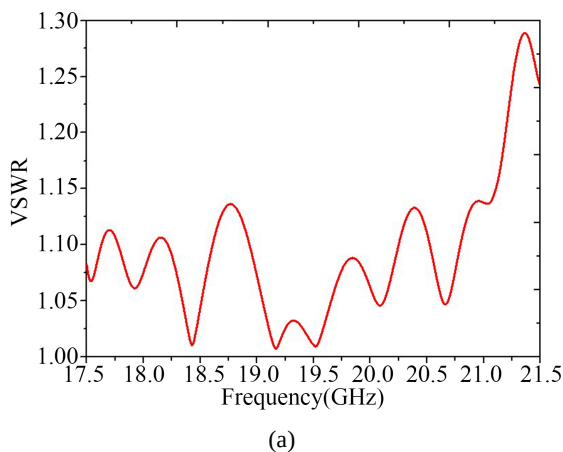


Figure 6. 3D model of broadband four-ridge circular polarization feed network
图 6. 宽带四脊圆极化馈电网络三维模型

经仿真计算, 得出结果如图 7 及图 8 所示:



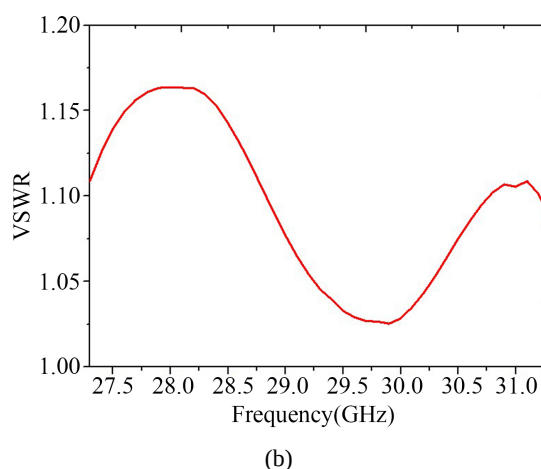


Figure 7. VSWR simulation curves of feed network: (a) Receiving frequency band; (b) Transmitting frequency band
图 7. 网络电压驻波比仿真图: (a) 接收频段; (b) 发射频段

图 7 为馈电网络电压驻波比仿真图, 从图中可以看出, 在 17.7~21.2 GHz 频率范围内, 所设计圆极化器电压驻波比最大值为 1.28:1; 在 27.5~31 GHz 频率范围内, 电压驻波比最大值为 1.20:1。馈电网络自身阻抗匹配特性优异, 不会引入额外驻波恶化整机指标。

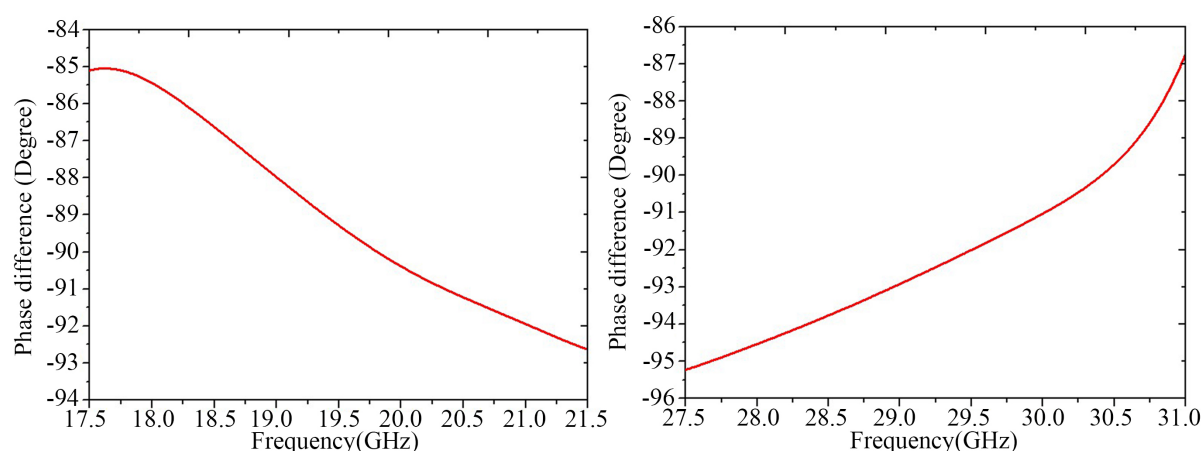


Figure 8. Phase difference simulation curves of four-ridge circular polarizer
图 8. 四脊圆极化器的相位差仿真曲线

图 8 为圆极化器相位差仿真图, 从图中可以看出, 在 17.7~21.2 GHz 频率范围内, 接收频段圆极化器相位差为 $90^\circ \pm 4.7^\circ$; 在 27.5~31 GHz 频率范围内, 发射频段圆极化器相位差为 $90^\circ \pm 5.2^\circ$ 。相位偏差控制在极小范围内, 保证全频段轴比性能。

综上, 所设计圆极化网络在 17.7~21.2 GHz 及 27.5~31 GHz 宽带频率范围内性能良好。

3. 天线实测结果

依据优化后仿真尺寸完成馈源、反射面、馈电网络机械加工、装配, 在微波暗室开展整机电性能测试, 测试项目包含端口驻波、远场增益、副瓣电平、圆极化轴比。测试结果如图 9、图 10 所示。

图 9 为天线电压驻波比测试图, 从图中可以看出, 天线电压驻波比小于 1.4:1, 与设计结果相符, 满足系统驻波指标要求。

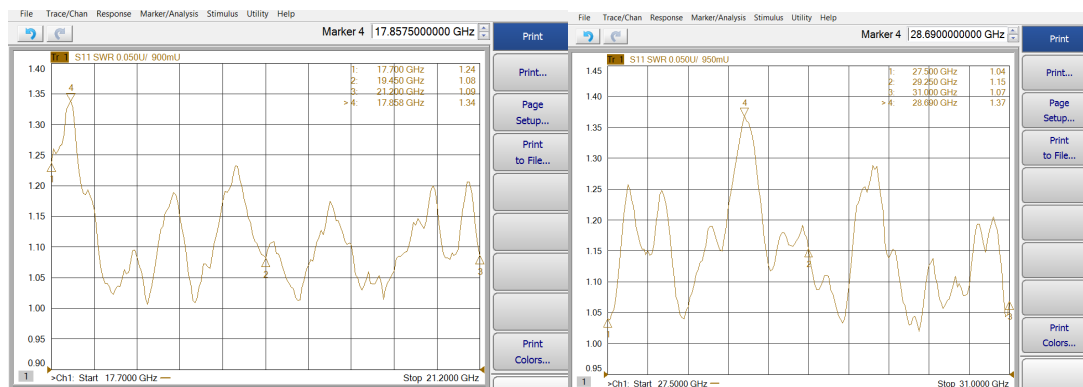


Figure 9. Measured VSWR curves of complete antenna port

图 9. 天线电压驻波比测试图

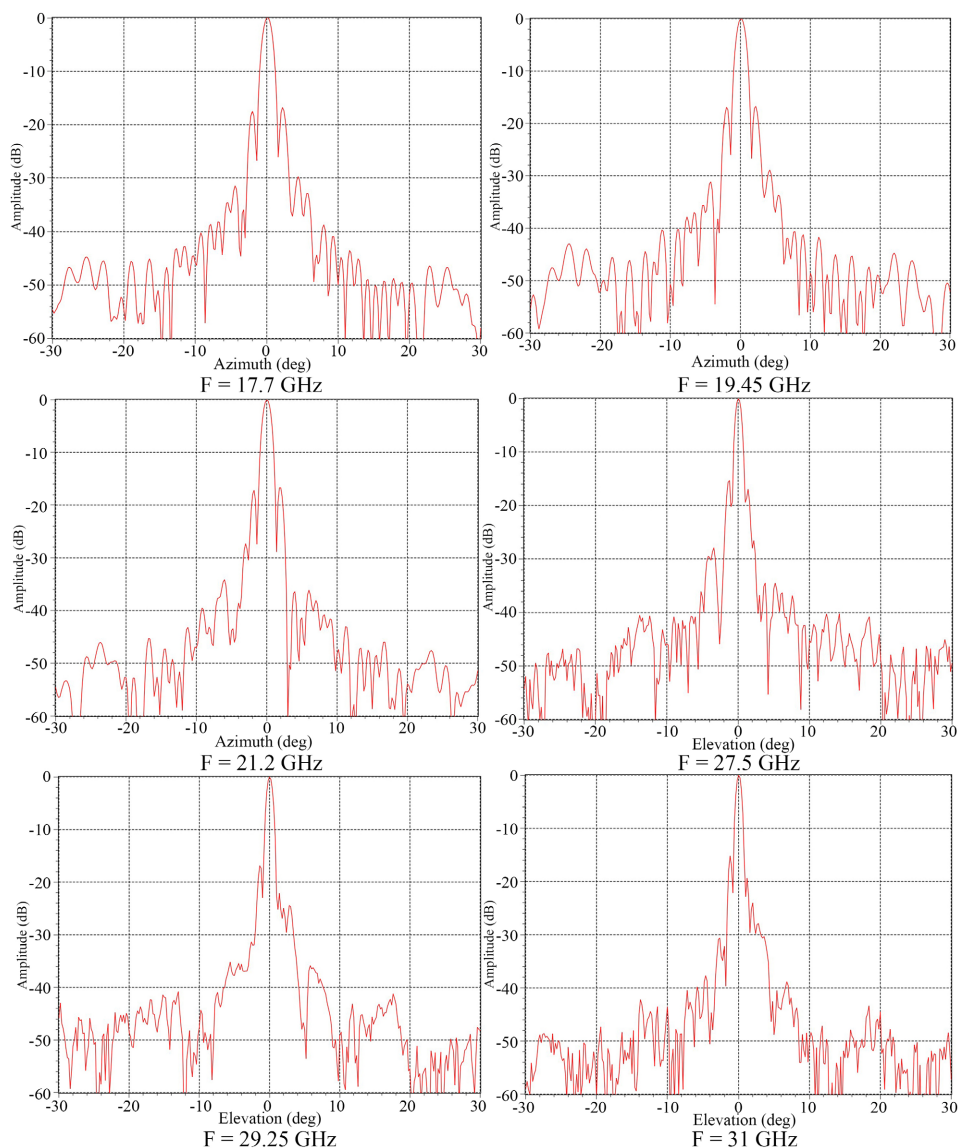


Figure 10. Measured far-field patterns of antenna at characteristic frequencies

图 10. 天线在特征频率下的实测远场方向图

图 10 为天线方向图测试结果，提取各频点实测增益、第一旁瓣、轴比指标，汇总于表 2：

Table 2. Measured electrical performance indexes of antenna system

表 2. 天线系统实测电性能指标

频点(GHz)	增益(dBi)	旁瓣(dB)	轴比(dB)	效率
17.7	40.66	-17.45	1.46	65.3%
19.45	41.84	-16.91	0.6	66.1%
21.2	42.13	-17.19	1.35	65.7%
27.5	44.3	-15.34	1.13	66.4%
29.25	45.21	-16.90	0.8	65.9%
31	45.62	-15.21	0.64	65.2%

对比仿真及实测指标，可见：

1) 增益整体实测低于仿真 0.56~0.78 dB：仿真模型假设金属无损耗、介质介电常数理想恒定；实物铝制反射面存在表面粗糙度欧姆损耗，聚四氟乙烯实际介电常数存在 ± 0.05 加工公差，装配间隙引入介质-空气混合层损耗，共同造成增益小幅度衰减。

2) 副瓣电平仿真与实测存在浮动偏差：仿真模型无机械装配偏移误差；实物馈源安装存在 ± 0.1 mm 轴向、径向偏移，改变主反射面照射锥削分布，造成高低频副瓣抬升或压低；同时，暗室测试环境存在微弱地面、支架杂散反射，叠加副瓣测试误差。

3) 实测整机效率整体高于仿真：仿真仅计算馈源照射效率，未计入馈电网络匹配增益补偿；实测整机包含低损耗四脊极化网络，端口匹配损耗极低，系统综合辐射效率小幅提升。

综合上述测试结果，所加工天线实物符合预期设计。

4. 结论

本文提出了一种基于帽形馈源的高效率、低副瓣圆极化反射面天线，工作于 Ka 频段，阻抗带宽达 3.5 GHz。在 17.7~21.2 GHz 及 27.5~31 GHz 频带内，轴比小于 1.46，全频带实测效率大于 60%。此外，该天线具有剖面低、制作方便的特点，具有良好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 刘胜文, 王超. 低旁瓣反射面天线设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(6): 246-251.
- [2] Yang, J. and Kildal, P.-S. (2000) Calculation of Ring-Shaped Phase Centers of Feeds for Ring-Focus Paraboloids. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **48**, 524-528. <https://doi.org/10.1109/8.843665>
- [3] Xie, L., Jiao, Y., Du, B., Zou, H., Shi, Y. and Ma, X. (2016) An Efficient Ring-Shaped Phase Center Calculation Method Based on a New Phase Efficiency Calculation Model. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **64**, 1489-1493. <https://doi.org/10.1109/tap.2016.2521902>
- [4] Geterud, E.G., Yang, J., Ostling, T. and Bergmark, P. (2013) Design and Optimization of a Compact Wideband Hat-Fed Reflector Antenna for Satellite Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **61**, 125-133. <https://doi.org/10.1109/tap.2012.2220113>
- [5] 孙立杰, 张文静, 杜彪, 董忠文. 一种 Ku 波段帽形组合馈源设计分析[J]. 无线电通信技术, 2012, 38(3): 47-50.
- [6] 开敏. Ka 双频段圆极化反射面天线研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [7] 柴玉汶. 多频段帽形馈源天线的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [8] 付光宇, 寇松江, 开敏. 一款 Ku 频段帽形馈源馈电环焦天线的设计[C]//2015 年全国微波毫米波会议论文集. 2015: 573-576.

- [9] 李泽卿. 超宽带馈源天线的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2025.
- [10] 伊向杰, 陈金龙, 石俊峰, 余铁军, 马汉清. 一种新型双频带帽型馈源反射面天线设计方法[J]. 火控雷达技术, 2020, 49(4): 69-73.
- [11] 薛博文. 多频段卫星通信天线[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
- [12] 张昊志. 中小口径反射面天线低旁瓣技术研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 中国电科网络通信研究院, 2025.
- [13] 王进, 杜彪, 孙立杰, 解磊. 宽带高性能四脊波导圆极化器设计[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 611-618.