

KuKa双频宽带一体化天线设计

吕娅娜, 钞 婷, 王淑萍, 杨 洋, 王超琨, 刘 鹏, 邓阳光

西安航天天绘数据技术有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年8月4日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月4日

摘 要

为适应宽带通信的需要, 如低轨宽带卫星和高轨遥测卫星, 针对传统环焦天线在宽频带、低旁瓣和多频段应用中的局限性, 本文提出了一种基于多目标优化算法与非均匀有理B样条(NURBS)曲面参数化的反射面环焦天线赋形设计方法。通过结合几何光学法(GO)和物理光学法(PO)建立初始模型, 引入粒子群优化(PSO)算法优化口面场分布, 并采用NURBS曲面实现反射面二次赋形。设计KuKa双频宽带一体化环焦天线仿真与实验, 结果表明该方法可显著提升天线效率($\geq 75\%$)、降低第一旁瓣电平(≤ -16 dB), 并实现Ka/Ku双频段覆盖(驻波比 ≤ 1.45), 验证了设计方法的有效性。

关键词

KuKa宽带, 环焦天线, 赋形, 高效率, 粒子群优化(PSO), NURBS曲面

KuKa Dual-Band Broadband Integrated Antenna Design

Yana Lyu, Ting Chao, Shuping Wang, Yang Yang, Chaokun Wang, Peng Liu, Yangyang Deng

Xi'an Aerospace Tianhua Data Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Aug. 4th, 2025; accepted: Aug. 27th, 2025; published: Sep. 4th, 2025

Abstract

To meet the needs of broadband communication, such as low-orbit broadband satellite and high-orbit remote sensing satellite, for the limitations of traditional circularly focused in wideband, low side lobe and multi-band applications, this paper proposes a circularly focused antenna pattern design method based on a multi-objective optimization algorithm and non-uniform B-spline (NURBS) surface parameterization. By combining geometric optics (GO) and physical optics (PO) methods to establish an initial model, introducing the particle optimization (PSO) algorithm to optimize the far-field distribution, and using NURBS surface to achieve secondary shading of the reflective surface.

文章引用: 吕娅娜, 钞婷, 王淑萍, 杨洋, 王超琨, 刘鹏, 邓阳光. KuKa 双频宽带一体化天线设计[J]. 天线学报, 2025, 14(3): 52-62. DOI: 10.12677/ja.2025.143005

The simulation and experimental results of the KuKa dual-band broadband integrated circular focusing antenna show that this method can significantly improve the antenna efficiency ($\geq 75\%$), reduce the first side lobe level (≤ -16 dB), and achieve Ka/Ku dual-band coverage ($VSWR \leq 1.45$), which verifies the effectiveness of the design method.

Keywords

KuKa Broadband, Focal-Plane Antenna, Shaping, High Efficiency, Particle Swarm Optimization (PSO), NURBS Surface

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着 5G、6G 等新一代通信技术的成熟, KuKa 双频天线在智能交通、智慧城市、航空航天等领域发挥的作用越来越大。反射面设计面临宽频带、兼容性等诸多难题, 同时为了应对越来越复杂多样的工作环境, 对反射面天线的辐射性能提出了更高的要求[1]。因此, 具有小型化、高增益和低副瓣性能的反射面天线被研究学者越来越多地重视起来。

Ku 和 Ka 频段由于其工作频段高, 相比低频段更适合小型化设计。目前, 国外 Ku、Ka 卫星通信天线得到普遍应用, 技术相对成熟。美国 Viasat 专注于卫星通信; 以色列 Gilat Satellite 公司提供多种卫星通信天线产品, 产品面向全球电信运营商、企业等用户; 韩国 Intellian Technologies 公司产品涵盖船载、车载、机载等多种移动卫星通信天线[2][3]。国内中国电科 54 所张博等人研究了一种宽带 Ku/Ka 频带馈源网络的设计[4]; 39 所研究了不同类型馈源在运用副反射面再赋形技术后, 双频天线整体电气性能的变化情况[5]。此外, 部分企业也做了大量研究, 实现 KuKa 双频便携天线的基本功能。由于频率横跨两个频段, 目前 KuKa 双频天线存在天线效率偏低、副瓣差、全频覆盖难等问题。

本文在现有研究的基础上, 提出了一种融合粒子群(PSO)算法与 NURBS 曲面的赋形设计方法。利用赋形环焦天线原理, 对天线口面场分布函数进行优化, 设计高效率、低旁瓣天线。并通过 0.9 米环焦天线进行仿真验证, 设计一种 KuKa 双频宽带一体化环焦天线, 天线效率由 60%提升到 75%。且 Ka 和 Ku 可同时或分时工作, 兼顾理论严谨性与工程实用性。

2. 环焦天线赋形

2.1. 环焦天线赋形原理

双反射面天线由主反射面、副反射面和馈源构成, 主要有环焦天线、卡塞格伦天线和格里高利天线。馈源(通常选择宽带波纹喇叭), 经副反射面反射后, 被主反射面截获将能量辐射到主反射面上, 经主反射面再次反射出去, 即能量从馈源辐射到自由空间, 需要经过主、副反射面两次反射。但卡塞格伦天线、格里高利天线的焦点在轴线, 馈源存在对来自副面反射信号的初级遮挡和副面对主反射面反射信号的分级遮挡, 而且容易造成较高的天线副瓣电平和电压驻波比, 因为初级遮挡大于次级遮挡, 所以容易造成初级遮挡。

反射面焦轴向远离对称轴的方向偏移于环焦天线的主反射面, 反射面上由焦点变为环状焦环。天线副瓣电平、电压驻波比偏高等弊端已被克服。典型代表是椭圆副面环焦反射面。

环焦天线的主反射面是焦轴偏移的旋转抛物面，副反射面是长轴与抛物面对称轴成 α 角的椭圆的一部分绕抛物面对称轴旋转 360° 形成的。如图 1 所示，椭圆面的一个焦点 F 位于抛物面的焦环上，另一个焦点 o 和馈源的相位中心 o 重合，馈源与主反射面共用同一轴线 AA ，与旋转抛物面的焦轴平行[6]-[8]。旋转椭圆面的焦点构成一个圆环。

虽然环焦天线具有较强的电气敏感性，但馈源喇叭的照射角可选择 $\leq 45^\circ$ 的较大范围，因此天线的副反射面与馈源喇叭的距离较近，且副反射面不必单独作为支撑结构，可与馈源喇叭连接固定支撑，使前者造成的结构不稳定、电气性能不稳定的问题得到改善。对于 Ku、Ka 频段天线较为适应。

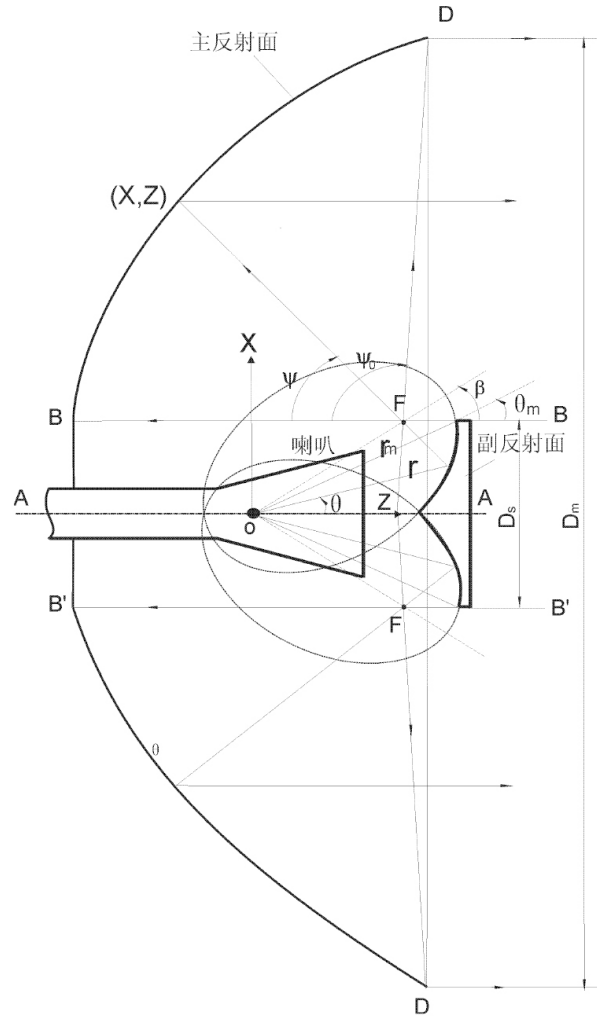


Figure 1. Circular focusing antenna working principle diagram
图 1. 环焦天线工作原理图

环焦天线赋形要遵循的三大定律为：能量守恒定律、等路程条件以及 Snell 定律[6]。在点 (x, z) 反射波的功率密度为：

$$F^2(\psi) = \frac{f^2(\theta)}{Ar^2} \left| \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1' \rho_2'} \right| = - \frac{f^2(\theta) \sin \theta d\theta}{AR(R - \rho_2 + \rho_2') \sin \psi d\psi} \quad (1)$$

式中： $f^2(\theta)$ 表示初级馈源的功率方向图。当 $R \gg |\rho_1|$ ， $R \gg \rho_2$ 时，上式可简化为：

$$F^2(\psi) = -\frac{f^2(\theta)\sin\theta d\theta}{AR^2 \sin\psi d\psi} \quad (2)$$

上式决定 ψ 与 θ 关系的一阶微分方程，其解为：

$$\int_0^\psi F^2(\psi) \sin\psi d\psi = \int_{\theta_0}^{\theta_M} f^2(\theta) \sin\theta d\theta \bigg/ (AR^2) \quad (3)$$

式中：

$$AR^2 = \int_{\theta_0}^{\theta_M} f^2(\theta) \sin\theta d\theta \bigg/ \int_0^{\psi_M} F^2(\psi) \sin\psi d\psi \quad (4)$$

上式为波束赋形公式。其中 $f^2(\theta)$ 称为源函数； $F^2(\psi)$ 为经环焦反射镜反射后期望得到的赋形波束功率方向图，可称为给定的目标函数。以选定的边界值 θ_0 、 θ_M 和给定的源函数、目标函数与边界值 ψ_M 代入波束赋形公式可解出 $\psi(\theta)$ 的值。

天线辐射特性的优劣，除与源场有关外，天线辐射特性的优劣也是决定天线口面场分布函数的另一个重要因素(馈源方向图)。口面场功能的优选既要考虑天线获得高效率，又要考虑天线辐射方向图旁瓣包络的要求[9]-[11]。确定天线口面场分布函数 $E(x)$ 的过程基本上是优化天线辐射特性的过程。通常用均匀分布可最大化增益，但旁瓣较高；渐变分布(如泰勒、切比雪夫分布)可降低旁瓣，但牺牲效率。

2.2. NURBS 曲面二次赋形

将初始主副反射面参数化为 NURBS 曲面，通过调整控制点位置实现反射面精细赋形。采用物理光学法(PO)和物理绕射理论(PTD)快速计算辐射性能，并引入粒子群多目标优化算法进一步提升效率与旁瓣性能。

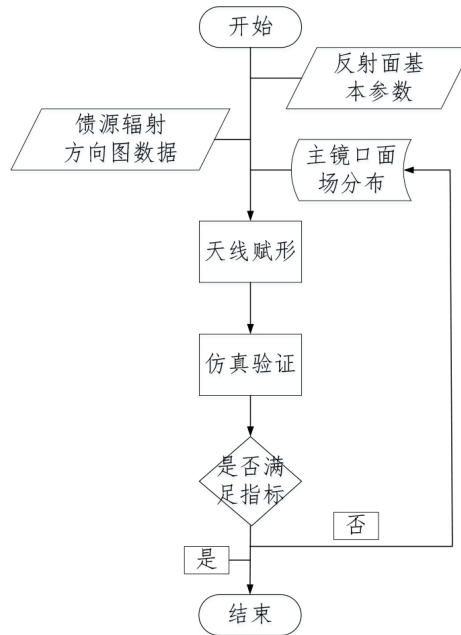


Figure 2. Circular focusing antenna pattern design flow chart

图 2. 环焦天线赋形设计流程图

如图 2 所示为环焦天线赋形设计的流程图。选择合适的主镜口面场分布，带入赋形函数得到主副面

曲线,进而在软件中仿真迭代,直至达到目标需求。赋形后的双反射面产生边缘锥削分布的口径场。本文研究新的指数型主镜面场分布,以扩宽天线方向图带宽,在抑制旁瓣电平、减小零星间干扰的同时,提高天线效率[12]-[14]。

2.2.1. NURBS 曲面的数学基础与特性

非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面是计算机辅助几何设计(CAGD)中的核心工具,通过引入权重因子和非均匀节点向量,能够精确表示任意复杂曲面,其数学表达式为:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}} \quad (5)$$

其中: $P_{i,j}$ 为控制点网格,决定曲面的基本形状; $w_{i,j}$ 为权重因子,调节控制点对曲面的影响强度($w_{i,j}$ 越大,曲面越靠近 $P_{i,j}$); $N_{i,p}(u)$ 和 $N_{j,q}(v)$ 为 p 次和 q 次 B 样条基函数,由节点向量 $U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+p+1}]$ 和 $V = [v_0, v_1, \dots, v_{m+q+1}]$ 定义[15] [16]。

2.2.2. 二次赋形的定义与技术流程

二次赋形指在初始反射面(如传统环焦天线的旋转抛物面)基础上,通过 NURBS 曲面参数化进行精细形状优化,以改善天线电磁性能(如效率、旁瓣、多频段兼容性)。其核心流程如下:

1) 初始反射面 NURBS 参数化

首先构建控制点网格。将初始主反射面(如直径 $D_m = 900\text{mm}$ 、 $D_s = 110\text{mm}$ 、 $f/(D_m - D_s) = 0.3$ 的抛物面)离散为 $(n+1) \times (m+1)$ 控制点网格,取 $n = m = 10$ (即 11×11 控制点)。

初始控制点坐标由解析几何公式确定:

$$P_{i,j} = \left(x_{i,j}, y_{i,j}, \frac{x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2}{4F} \right) \quad (6)$$

其中 F 为焦距, $(x_{i,j}, y_{i,j})$ 为口面离散点坐标。

其次设计节点向量。采用非均匀节点向量,在曲率变化大的区域(如副反射面边缘)加密节点,提高局部形状表示精度;三次 NURBS 曲面节点向量:

$$U = \{0, 0, 0, 0, u_4, u_5, \dots, u_{14}, 1, 1, 1, 1\} \quad (7)$$

其中 $u_4, u_5, \dots, u_{14}$ 按余弦规律分布。

对控制点调整量设置约束: $|\Delta P_{i,j}^2| \leq 0.01 D_m$, 避免过度变形。

2) 电磁性能与曲面形状的映射关系

反射面形状变化通过几何光学法(GO)影响射线轨迹,进而改变口面场分布 $E_{x,y}$;口面场再通过物理光学法(PO)计算辐射方向图,建立“控制点调整 - 口面场变化 - 性能指标”的映射链[17]。

3) 多目标优化与迭代赋形

首先选择需要优化的变量为控制点坐标 $P_{i,j}$ (通常仅优化 z 方向坐标,保留初始面的旋转对称性)、权重因子 $w_{i,j}$;目标函数为:

$$f = w_1 * (1 - \eta) + w_2 * SLL + w_3 * VSWR \quad (8)$$

其次选择优化算法。梯度类算法:如序列二次规划(SQP),适合局部精细调整,但需初始解接近最优;全局优化算法:如遗传算法(GA)或粒子群优化(PSO),适合复杂多峰问题(如多频段赋形);混合策略:先用 GA/PSO 进行全局搜索,再用 SQP 局部细化,平衡效率与精度。基于各种算法的优缺点,本文选择粒子群优化算法[18] [19]。

2.3. 粒子群(PSO)算法优化口面分布函数

粒子群优化(PSO)算法在天线口面场分布优化中,通过模拟鸟群觅食行为迭代搜索最优场分布,其核心是将口面场参数转化为粒子位置,以天线性能(如效率、旁瓣)为目标函数,通过粒子群的协作与竞争实现优化。以下从原理、流程、关键技术及案例展开说明:

采用几何光学法确定主副反射面初始参数,包括主面直径 D_m 、副面直径 D_s 、焦径比 F/D 等。引入 PSO 算法优化一维口面场分布,目标函数为:

$$\min(SLL)_s, t, \eta \geq 75\% \quad (9)$$

其中, SLL 为第一旁瓣电平, η 为天线效率。通过三阶样条函数参数化口面场,优化变量包括样条控制点坐标($p_0, p_1, \dots, p_5$)。

分别设置 Ka 频段和 Ku 频段的效率与旁瓣目标,采用多目标 PSO (MOPSO)生成最优解集,根据工程需求选择折中方案。通过设置权重或前沿处理效率与旁瓣的权衡,优化得到合适的系数,提高天线口面效率的同时,降低天线第一旁瓣。

优化后口面场分布如图 3 所示:

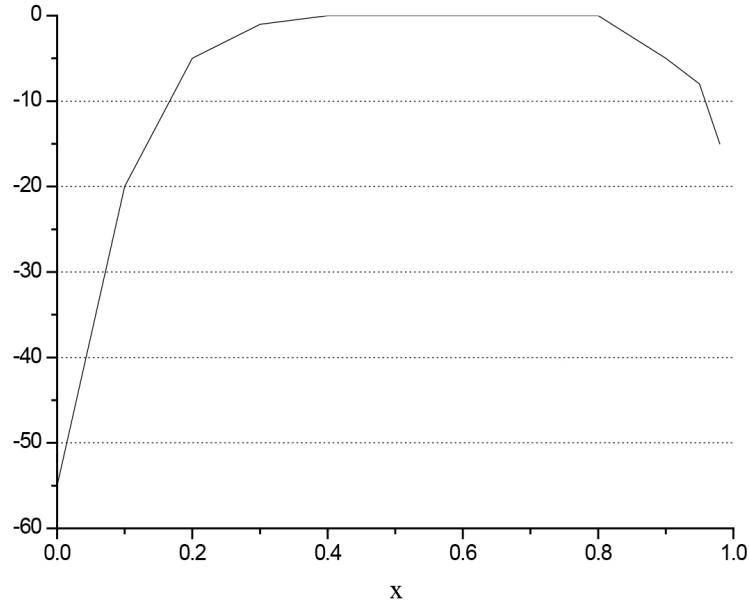


Figure 3. Antenna aperture field distribution function

图 3. 天线口面场分布函数

将指数型函数和反三角函数结合在一起,拟合口面场分布:

$$E(x) = \begin{cases} E_1(\bar{x})/E_1(\bar{x}_1)(\bar{x} \leq \bar{x}_1) \\ E_2(\bar{x})/E_2(\bar{x}_1)(\bar{x}_1 < \bar{x} \leq 1.0) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\bar{x} = X/R_m$, $\bar{x}_1 = X_1/R_m = 0.5$ 或 $\bar{x}_1 = 0.4$ 。

$$E_2(\bar{x}) = 1.0 - A \exp(B(\bar{x}^2 - 1.0)) \quad (11)$$

$$E_1(\bar{x}) = C + D \operatorname{tg}^{-1} \left(130.0 \left(\bar{x} - 1.1 \frac{R_s}{R_m} \right) \right) \quad (12)$$

式中：A、B、C、D 为选定的系数。

3. 赋形结果验证与工程实现

3.1. 电磁仿真验证

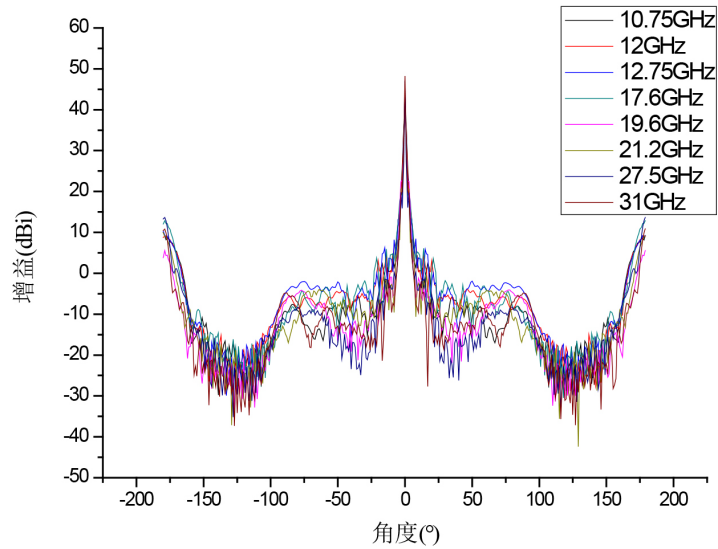


Figure 4. Antenna simulation pattern
图 4. 天线仿真方向图

Table 1. Comparison of antenna simulation efficiency and side lobe performance between no-shape and shape
表 1. 未赋形与赋形时天线仿真效率及副瓣性能对比

频率/GHz		12	14	19.45	29.5
Nurbs 二次赋形	效率/%	78.4	78.2	78.6	78.2
	副瓣/dB	-18	-20	-19.3	-18.2
初始分布	效率/%	62.7	60.5	61.4	62.3
	副瓣/dB	-12.8	-13.1	-13.4	-12.7

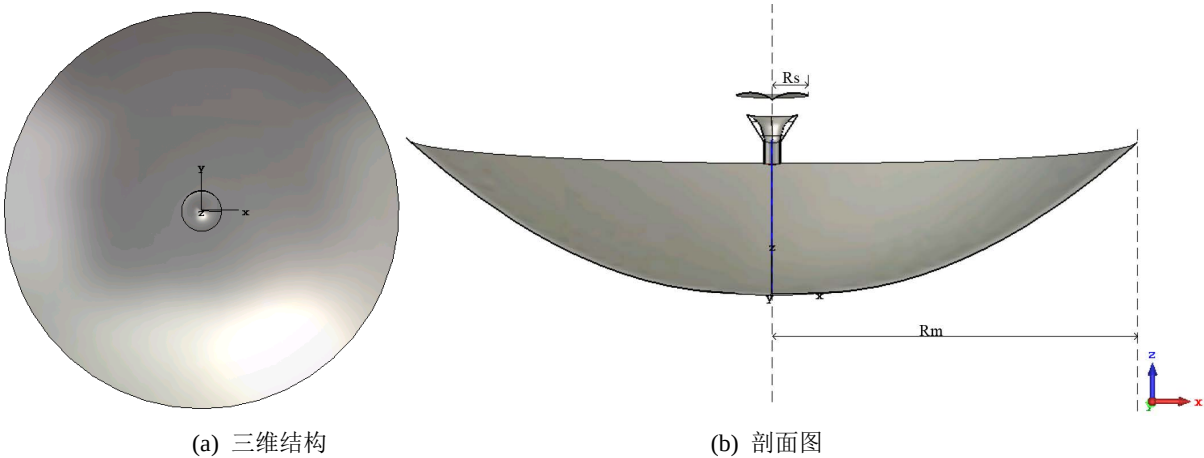


Figure 5. Circular focal antenna model diagram
图 5. 赋形环焦天线模型图

使用电磁仿真软件对赋形后的反射面进行全波仿真，对比优化前后性能，如表 1 所示传统环焦天线效率为 65%，旁瓣为-12 dB；NURBS 二次赋形后，效率为 78%，旁瓣为-18.2 dB。

图 4 为天线在不同频点的仿真方向图，图 5 为赋形环焦天线的俯视图和剖面图。

3.2. 天线实测结果

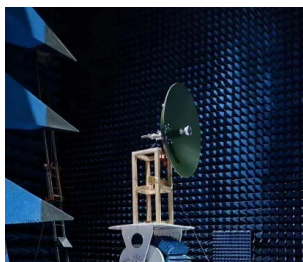


Figure 6. Antenna processing physical picture

图 6. 天线加工实物图

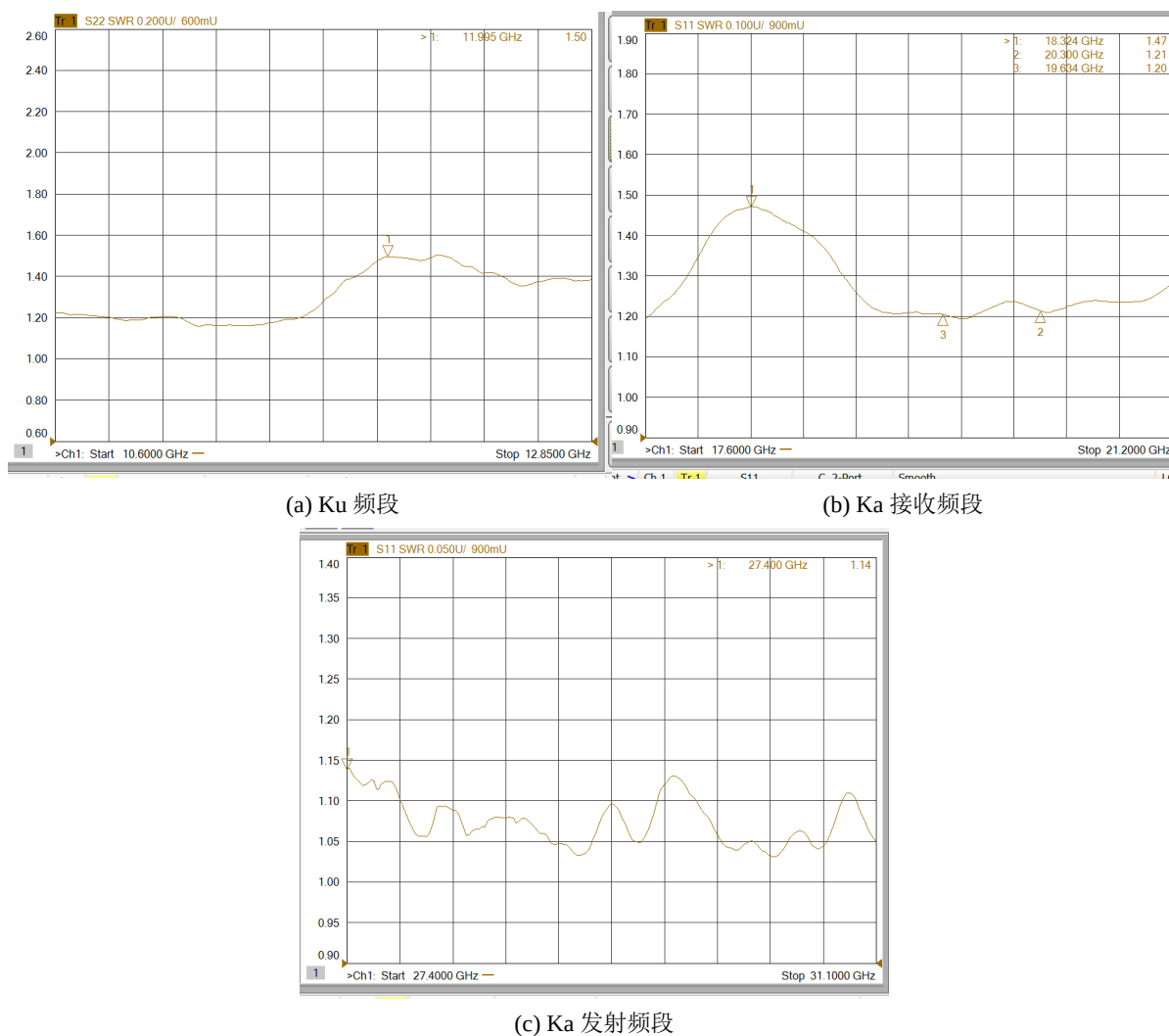


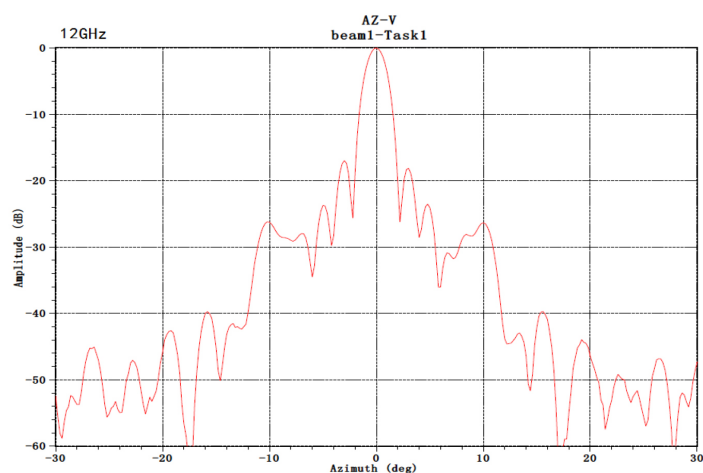
Figure 7. Antenna standing wave ratio

图 7. 天线测试驻波比

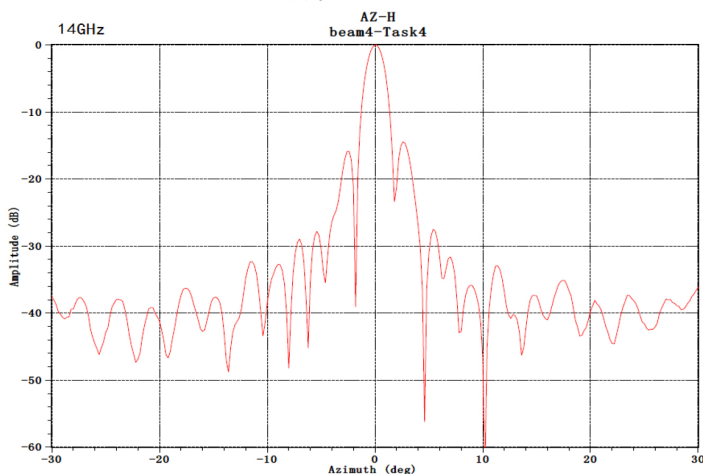
计算曲面曲率变化率, 确保满足反射面加工精度, 天线加工模型如图 6 所示。

天线的测试驻波比如图 7 所示, 全频带内驻波比 $\leq 1.45:1$ 。

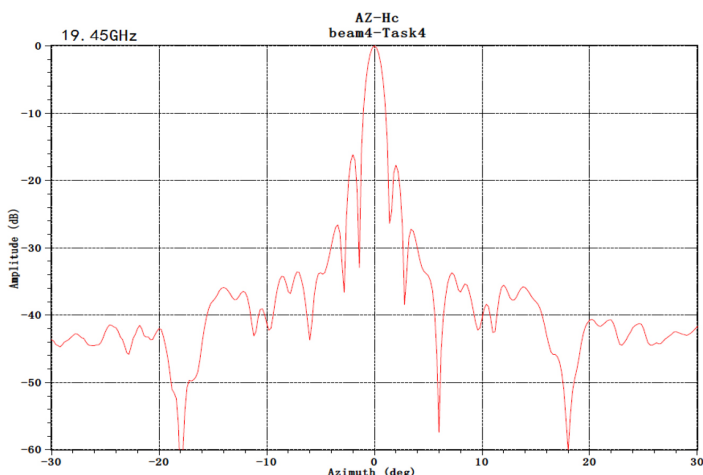
天线的测试方向图如图 8 所示。



(a) $f = 12 \text{ GHz}$



(b) $f = 14 \text{ GHz}$



(c) $f = 19.45 \text{ GHz}$

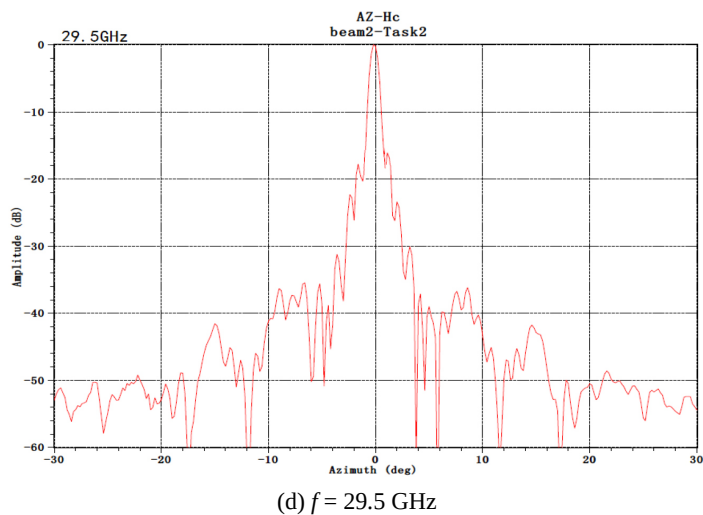


Figure 8. Antenna test pattern

图 8. 天线测试方向图

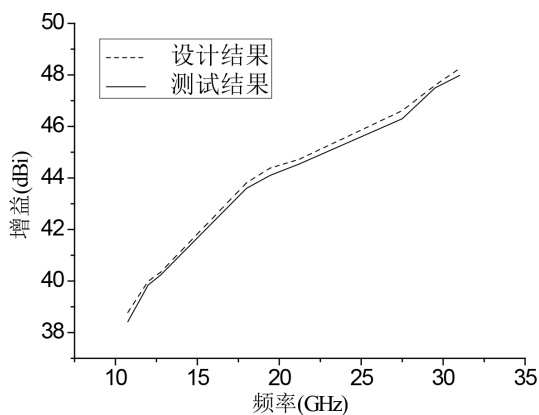


Figure 9. Antenna simulation and test gain diagram

图 9. 天线仿真及测试增益图

经多次优化后,在满足副瓣的前提下,天线仿真效率达 70% 以上,天线仿真及测试增益图如图 9 所示,表 2 给出不同频点的测试结果。

Table 2. Comparison of antenna test efficiency and side lobe performance

表 2. 天线测试效率及副瓣性能对比

频率/GHz		12	14	19.45	29.5
实测结果	效率/%	71	71.4	71.1	71
	副瓣/dB	-16	-15	-17.8	-16.2
仿真结果	效率/%	78.4	78.2	78.6	78.2
	副瓣/dB	-18	-20	-19.3	-18.2

从以上结果可以看出,该赋形环焦天线在 Ku、Ka 全频带内天线效率高于 70%,天线第一副瓣 $\leq -15 \text{ dB}$,驻波比 $\leq 1.5:1$ 。表明该赋形技术可实现提升效率、降低副瓣的目标。

4. 结论

本文开展赋形算法的研究,优化口面场分布,并成功应用到 0.9 米 KuKa 双频环焦天线中,天线效率由 60%提升到 78%以上、副瓣达到-18 dB。合理运用赋形技术不仅可以提高信号的方向性和传输效率,还对减少交叉极化干扰、改善天线极化纯度和提高系统性能有着显著的影响,可以实现更加高效和可靠的无线通信系统。

参考文献

- [1] 李昌泽. 赋形反射面天线的研究与综合[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [2] Kindt, R.W. and Vouvakis, M.N. (2010) Analysis of a Wavelength-Scaled Array (WSA) Architecture. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **58**, 2866-2874. <https://doi.org/10.1109/tap.2010.2052566>
- [3] Targonski, S.D. (2006) A Multiband Antenna for Satellite Communications on the Move. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **54**, 2862-2868. <https://doi.org/10.1109/tap.2006.882177>
- [4] 张博, 李振生. 一种宽带 Ku/Ka 频带馈源网络的设计[J]. 无线电通信技术, 2025, 51(2): 419-426.
- [5] 刘亮, 王珂. 副反射面再赋形技术在环焦天线中的应用[C]/中国电子学会. 2023 年全国天线年会论文集(上). 西安: 中国电子科技集团公司第三十九研究所, 2023: 222-224.
- [6] Moreira, F.J.S. and Bergmann, J.R. (2011) Shaping Axis-Symmetric Dual-Reflector Antennas by Combining Conic Sections. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **59**, 1042-1046. <https://doi.org/10.1109/tap.2010.2103028>
- [7] Kim, Y. and Lee, T. (2009) Shaped Circularly Symmetric Dual Reflector Antennas by Combining Local Conventional Dual Reflector Systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **57**, 47-56. <https://doi.org/10.1109/tap.2008.2009648>
- [8] Wu, J., Wang, C. and Guo, Y.X. (2020) A Compact Reflector Antenna Fed by a Composite S/Ka-Band Feed for 5G Wireless Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **68**, 7813-7821. <https://doi.org/10.1109/tap.2020.3000858>
- [9] Kim, W. (2008) Low-Loss Feedome Design for Axially Displaced Ellipse (ADE) Reflectors. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **7**, 721-724. <https://doi.org/10.1109/lawp.2008.2008450>
- [10] 刘兴隆, 杜彪. 多频段环焦型椭圆波束天线优化设计[J]. 电波科学学报, 2022: 37(3): 497-504.
- [11] 郝张成, 吴逸文. 微波毫米波平面共口径天线[J]. 微波学报, 2022, 38(5): 80-90.
- [12] 刘洋董涛王昕 Ku/Ka 双频共口径微带阵列天线设计[J]. 中国空间科学技术, 2012, 10(5): 17-20.
- [13] 张军, 李杼, 苏萌. Ku/Ka 四波段共馈低剖面赋形天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 12(6): 1033-1037.
- [14] 蓝海. 基于遗传算法的双频共口径稀疏天线阵列[J]. 固体电子学研究与进展, 2024, 44(4): 310-314.
- [15] He, D., Yu, Q., Chen, Y. and Yang, S. (2021) Dual-Band Shared-Aperture Base Station Antenna Array with Electromagnetic Transparent Antenna Elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **69**, 5596-5606. <https://doi.org/10.1109/tap.2021.3061151>
- [16] 刘敏. 一种应用于卫星通信的小型双频天线设计[J]. 空间电子技术, 2023, 20(6): 75-80.
- [17] Satellite, S.J. (2016) Communications on the Move. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **54**, 262-264.
- [18] 冉桔庆. 高增益双极化天线阵列及双频多极化共口径技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2024.
- [19] 王雅星. 基于 K/Ku 波段圆极化共口径天线的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 银川: 宁夏大学, 2024.