

一种小口径低副瓣卡塞格伦天线优化设计与仿真

孙振龙, 窦晓雷, 王永亮

南京恩瑞特实业有限公司总体部, 江苏 南京

收稿日期: 2025年8月15日; 录用日期: 2025年9月7日; 发布日期: 2025年9月16日

摘 要

针对小口径天线低副瓣的需求, 提出了一种卡塞格伦天线的设计方案。天线主反射面 0.8 m , 为减少遮挡副反射面口径, 取 $1/7$ 主反射面口径为 0.115 m ; 通过副反射面处增加扼流结构, 改善初级反射场分布以及优化馈源支撑结构, 馈源与副反射面采用PIM硬质泡沫支撑, 给出了天线的设计思路。通过大量的电磁仿真计算, 最终确定了天线的最优结构。仿真结果表明, 在X波段工作频带内, 天线增益高于 34 dBi , 第一副瓣低于 -20 dB , 波束宽度小于等于 2.8° 。该天线具有口径小、结构紧凑简单、高效率、副瓣低等特点, 为低副瓣天线提供了一种优化设计思路。

关键词

小口径, 低副瓣, 高效率, 卡塞格伦天线

Optimization Design and Simulation for a Small-Aperture, Low-Sidelobe Cassegrain Antenna

Zhenlong Sun, Xiaolei Dou, Yongliang Wang

General Department, Nanjing Nriet Industrial Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Received: Aug. 15th, 2025; accepted: Sep. 7th, 2025; published: Sep. 16th, 2025

Abstract

To meet the low sidelobe requirement of small-aperture antennas, a design scheme for a Cassegrain

文章引用: 孙振龙, 窦晓雷, 王永亮. 一种小口径低副瓣卡塞格伦天线优化设计与仿真[J]. 天线学报, 2025, 14(3): 63-71.

DOI: 10.12677/ja.2025.143006

antenna is proposed. The main reflector features a diameter of 0.8 m, while the sub-reflector diameter is reduced to 1/7 of the main reflector (0.115 m) to minimize blockage. The design approach includes implementing choke structures at the sub-reflector to optimize primary reflection field distribution, adopting PIM rigid foam supports for both the feed source and sub-reflector, and optimizing the feed support structure. Through extensive electromagnetic simulation calculations, the optimal antenna configuration was determined. Simulation results demonstrate that within the X-band operating frequency range, the antenna achieves a gain exceeding 34 dBi, first sidelobe levels below -20 dB, and a beamwidth narrower than or equal to 2.8° . This antenna features a small aperture, compact and simple structure, high efficiency, and low sidelobes, providing an optimized design approach for low-sidelobe antennas.

Keywords

Small Aperture, Low Sidelobe, High Efficiency, Cassegrain Antenna

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

副瓣性能是衡量天线定向精度与抗干扰能力的核心指标，尤其在雷达、通信等对信号纯净度要求严苛的场景中至关重要。早期小口径天线受限于设计理念与制造工艺，在副瓣抑制方面存在难以突破的局限[1]-[3]。

从结构原理来看，小口径天线的辐射口径较小，导致电磁波能量分布难以精准调控。在传统设计中，为追求增益指标，往往过度聚焦于主瓣能量集中，却忽视了边缘场的散射问题。当电磁波在天线口径边缘发生绕射时，极易形成高强度的副瓣。此外，支撑结构的遮挡误差等都会导致电磁波传播路径的畸变，形成额外的副瓣干扰[4]-[6]。

本文主要研究小口径卡塞格伦天线的副瓣优化设计。小口径卡塞格伦天线主反射面电尺寸较小、副反射面遮挡较大，如何在保证高效率的同时实现低副瓣是一个难点。文献[7]中提出用多目标遗传算法优化其口面场分布，针对 0.9 m Ku 频段天线低旁瓣、高效率的要求，实现了第一旁瓣低于 -18 dB。文献[8]中对天线进行副面赋形设计，改造已有的卡塞格伦天线，使其具有低副瓣特性。在副瓣性能优化中，扼流槽与支撑结构是两类关键辅助技术。扼流槽技术通过在天线口径边缘或馈源周围设置周期性沟槽结构，利用电磁波的反射与干涉原理抑制边缘绕射，从而降低副瓣电平。在小口径天线中，扼流槽的深度与数量参数直接影响抑制效果：过浅的扼流槽无法有效吸收边缘漏波，过深则会引入额外的能量损耗；数量设计不合理会导致特定角度的副瓣反而增强。现有应用中，部分天线采用单级扼流槽设计，虽能将副瓣电平降低 3~5 dB，但在宽角度范围内的抑制效果不均，难以兼顾全方向副瓣优化。而多级扼流槽虽能提升抑制效果，但结构复杂度增加，与小型化需求存在矛盾[9] [10]。支撑结构的设计则需平衡机械稳定性与电磁性能。传统刚性支撑结构虽能保证反射面精度，但金属部件的遮挡会形成额外的散射源，导致副瓣升高[11] [12]。

本文设计针对低副瓣需求，从扼流槽与支撑结构两个维度进行了优化设计和仿真：在副反射面边缘增加扼流槽结构，有效降低边缘绕射能量，同时馈源由传统的金属支架支撑改为介质支撑，改善了小口径天线副瓣电平的固有局限。该天线工作频段为 X 波段，主反射面口径为 0.8 m，仅约 27 倍波长，最终

仿真实现第一副瓣-20 dB 以上，为相关研究提供了一种新的设计思路。

2. 详细设计

本次设计需求为一种卡塞格伦天线——主反射面口径 0.8 m，工作频段为 9.2~9.6 GHz，第一副瓣电平 ≤ -20 dB，波束宽度 $\leq 2.8^\circ$ ，增益 ≥ 34 dB。

2.1. 馈源设计

由于本天线对副瓣指标要求较高，馈源选择用多模喇叭形式来实现，这种形式喇叭具有两个面波束相等、驻波比较好，以及优良的等化辐射方向图和低交叉极化性能等特点，从而保证天线的辐射方向图等化对称，极化隔离度高。

馈源喇叭的结构图如图 1 所示。

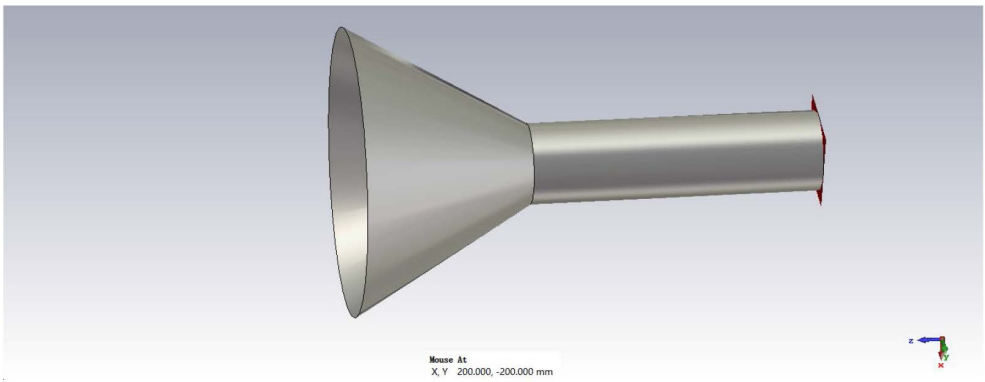


Figure 1. Feed horn structure diagram
图 1. 馈源喇叭结构图

馈源喇叭驻波仿真结果如图 2 所示，在 9.2~9.6 GHz 频段内，均小于 1.3。

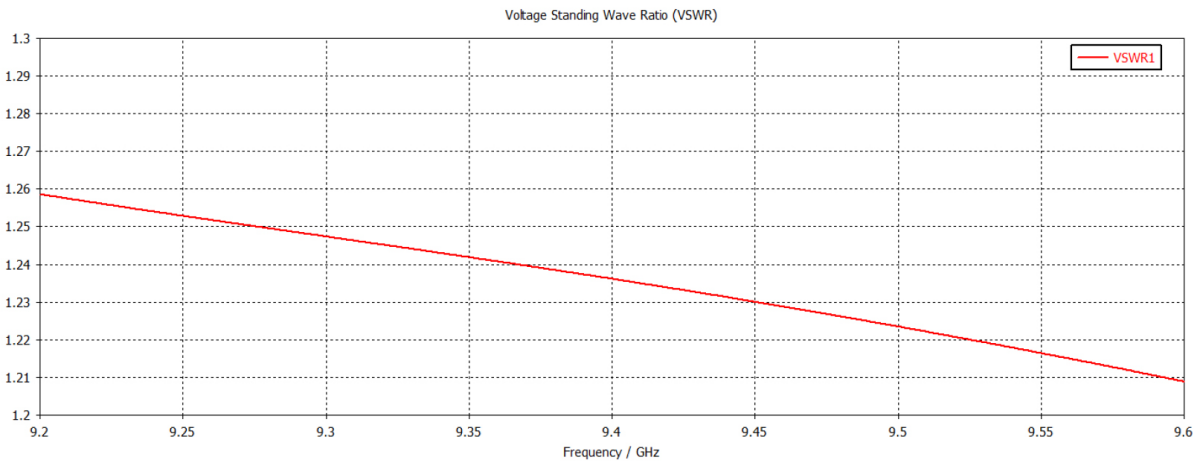


Figure 2. The simulation result of horn VSWR
图 2. 驻波仿真结果

馈源喇叭典型频点方向图仿真结果如图 3 所示，E 面和 H 面方向图几乎重合，表明馈源喇叭对称性好，满足低副瓣设计需求。

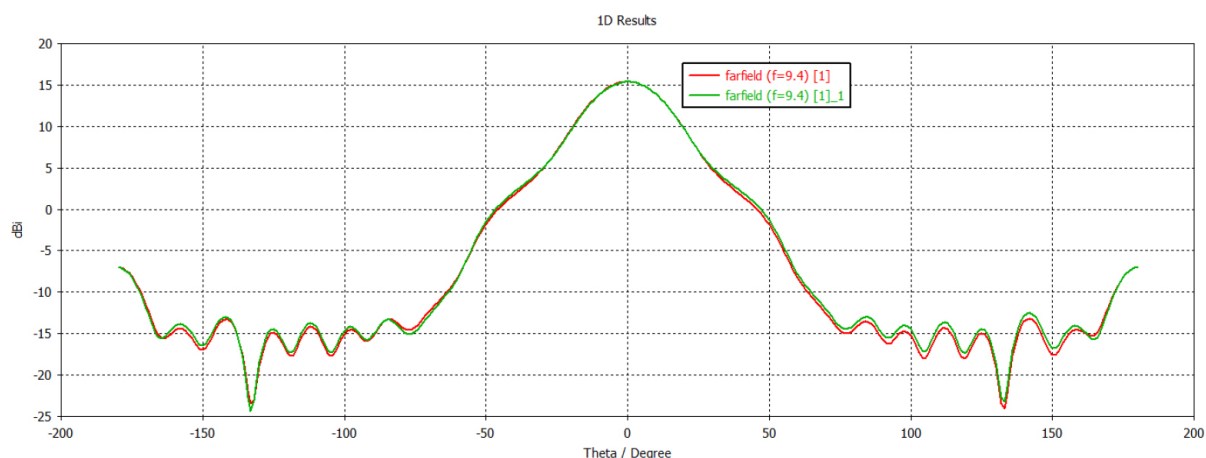


Figure 3. The simulation result of horn radiation pattern

图 3. 喇叭辐射方向图仿真结果

2.2. 抛物面设计

2.2.1. 副反射面设计

反射面天线采用卡塞格伦形式，主反射面口径 D 为 0.8 m。为减少绕射效应，副面直径需远大于波长。为使口径遮挡小，选择了小的副面。此时馈源照射角也随之减小，为保持副面边缘照射电平不变，则要求馈源尺寸加大，最终导致馈源遮挡超过副面的遮挡。文献[6]中理论计算后得出，副反射面口径 D_s 需大于等于 7~8 倍波长，最终为减小遮挡，副反射面口径 D_s 取 1/7 主反射面口径，即 D_s 取 0.115 m。

天线增益估算公式为：

$$G = 10 \log \left(\frac{4\pi S}{\lambda^2} \times \eta \right) \quad (1)$$

上式中：

G ——天线增益，单位：dB；

S ——天线口径等效面积，单位： mm^2 ；

η ——天线效率因子(低副瓣天线 η 选 45%)。

本天线给定天线口径为 0.8 m，根据上述估算公式，此天线增益值为： $G = 34.5 \text{ dB}$ 。

根据计算结果，天线口径可满足增益 $\geq 34 \text{ dBi}$ 的要求。

2.2.2. 焦径比设计

常规设计中，焦径比典型取值范围为 0.25~0.6 [6]。焦径比越小，天线纵向尺寸越小，馈源容易实现对口径的均匀照射，天线效率高，但是会增加自身遮挡，降低副瓣。焦径比越大，可减少遮挡，有利于降低副瓣，但是纵向尺寸更大。为降低副瓣，同时兼顾尺寸，本次设计中选取 $F/D = 0.5$ 。主反射面口径为 0.8 m，计算得焦径 $F = 0.4 \text{ m}$ 。

2.2.3. 扼流槽设计

在副反射面处增加扼流槽，可以降低副瓣[13]。通过这种设计可以在扼流槽内形成驻波，抵消反射波的能量，减少边缘绕射能量，改善口径场的相位一致性，从而降低副瓣。图 4 为有无扼流槽时，副瓣电平的仿真结果。从图中可以看出，增加扼流槽后，副瓣电平明显改善。

扼流槽设计如图 5 所示。带扼流槽副反射面模型如图 6 所示。

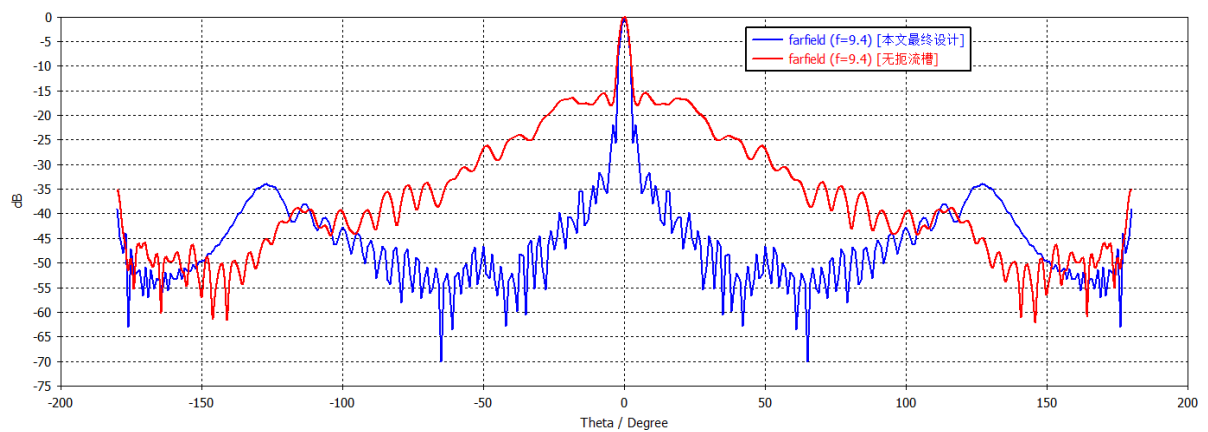


Figure 4. Radiation pattern with or without implementing choke structures

图 4. 方向图对比(有无扼流槽)

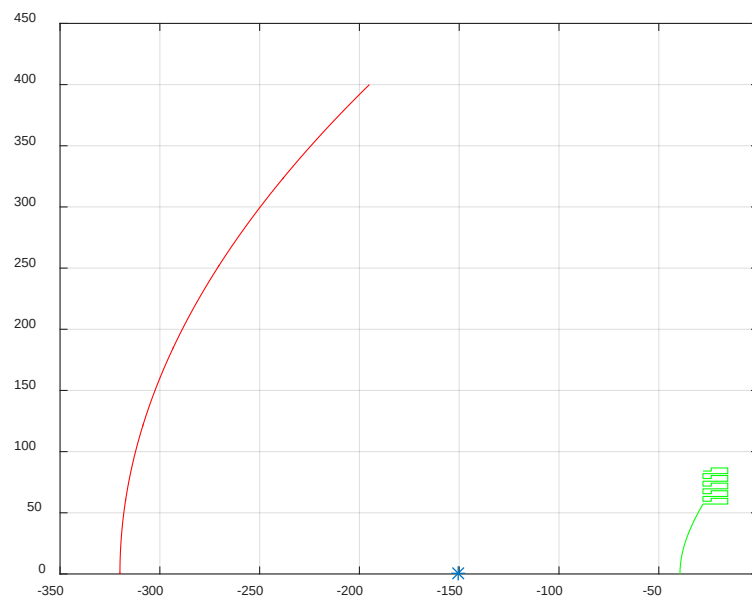


Figure 5. Outlines of Cassegrain antenna

图 5. 卡塞格伦天线母线轮廓

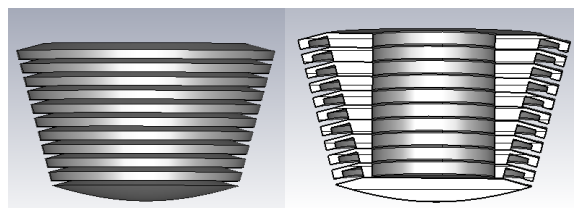


Figure 6. The model of sub-reflector

图 6. 副反射面模型

扼流槽的主要参数为槽深和数量。理论上槽深为四分之一波长，约 8 mm。取槽深分别为 8 mm、8.2 mm、8.4 mm 进行参数仿真，仿真结果如图 7 所示。从图中可以看出，槽深为 8.2 mm 时，副瓣效果最好。

选取不同数量的扼流槽，仿真结果如图 8 所示。从图中可以看出，扼流槽数量为 10 时，副瓣达到设

计需求。

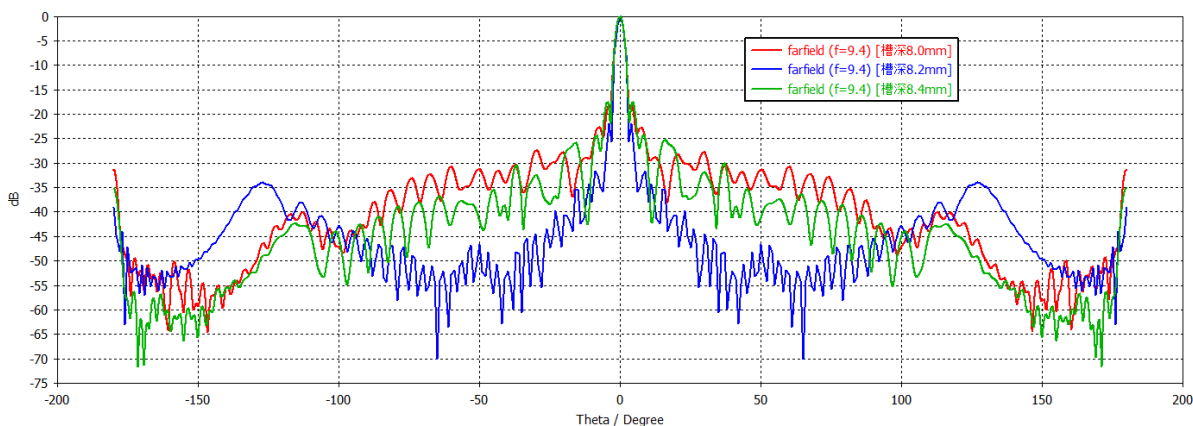


Figure 7. Radiation pattern of different deep

图 7. 不同槽深的方向图对比

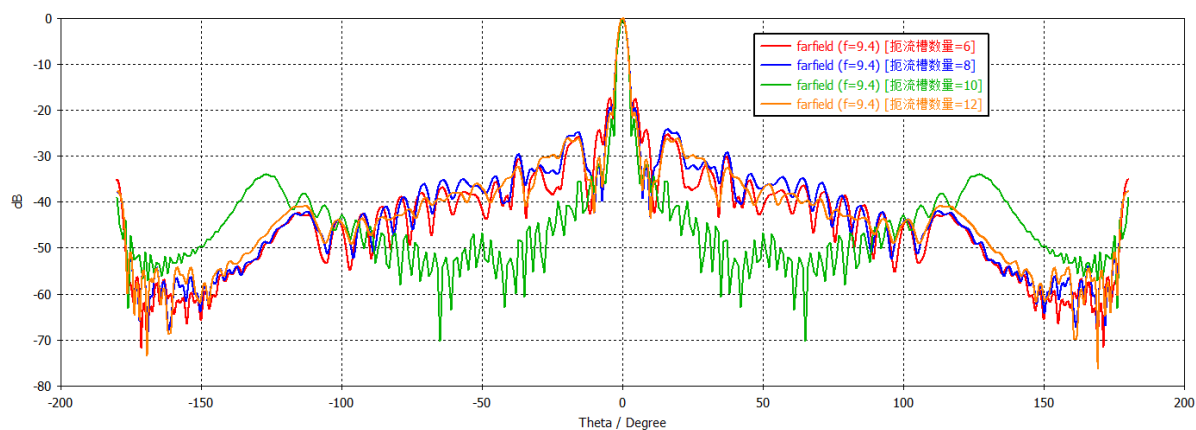


Figure 8. Radiation pattern of different parameter

图 8. 扼流槽不同数量的方向图对比

2.2.4. 馈源支撑设计

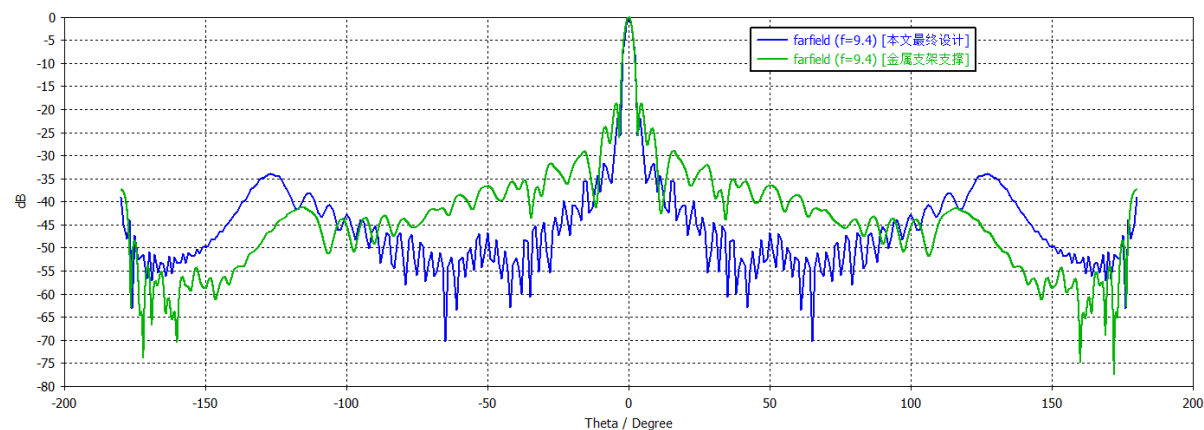


Figure 9. Radiation pattern of different structure

图 9. 不同馈源支撑的方向图对比

馈源支撑可使用金属支架支撑或使用介质支撑以减少馈源二次遮挡。针对两种设计进行仿真对比, 仿真结果如图 9 所示。仿真时, 馈源与副反射面采用 PIM 硬质泡沫支撑, 介电常数为 2.1, 如图 10 所示。根据仿真结果, 最终选取介质支撑。

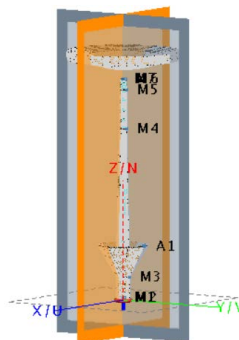


Figure 10. Design of feed horn support
图 10. 馈源支撑设计

2.2.5. 全波仿真

在全部设计完成后, 使用 FEKO 软件进行全波仿真, 仿真模型如图 11 所示。

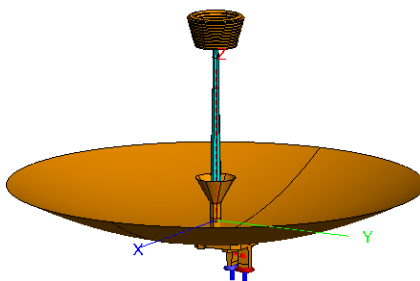


Figure 11. Simulation model of the antenna
图 11. 天线仿真模型

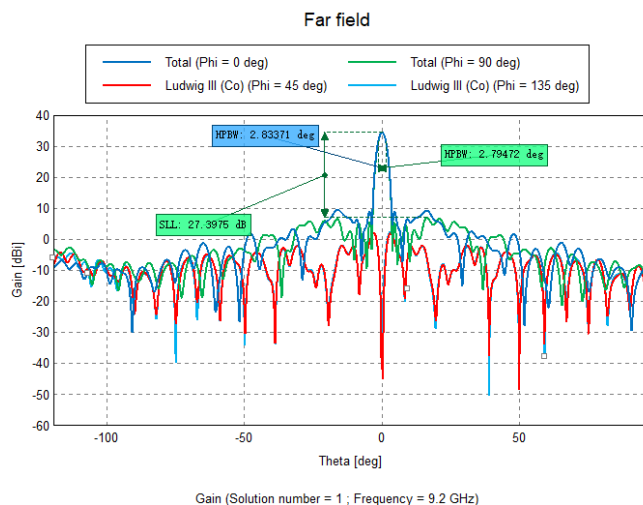


Figure 12. The simulation result of antenna radiation pattern (9.2 GHz)
图 12. 天线方向图仿真结果(9.2 GHz)

典型频点仿真结果如图 12、图 13、图 14 所示，从图中可以看出第一副瓣电平低于-20 dB，增益大于 34 dBi，波束宽度小于等于 2.8°。

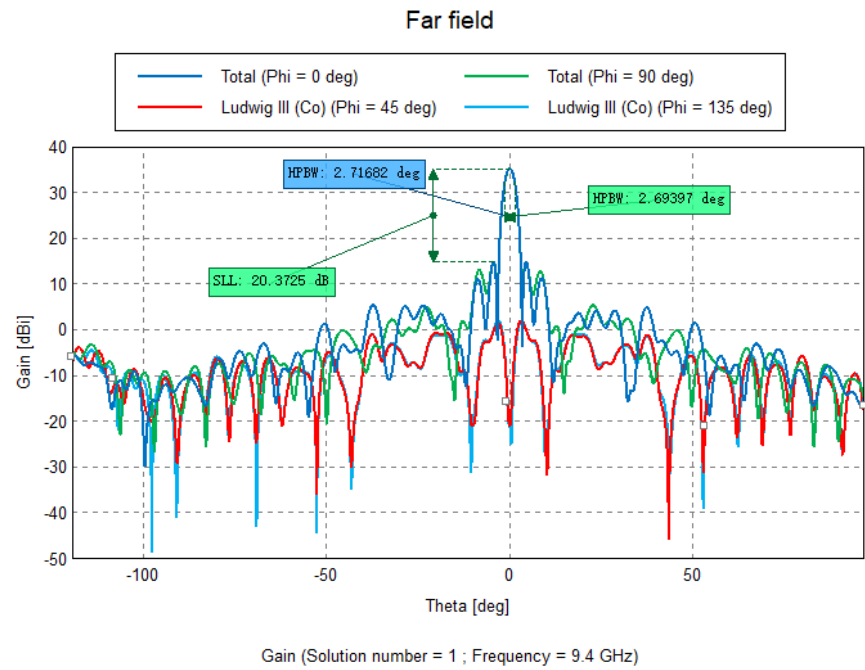


Figure 13. The simulation result of antenna radiation pattern (9.4 GHz)
图 13. 天线方向图仿真结果(9.4 GHz)

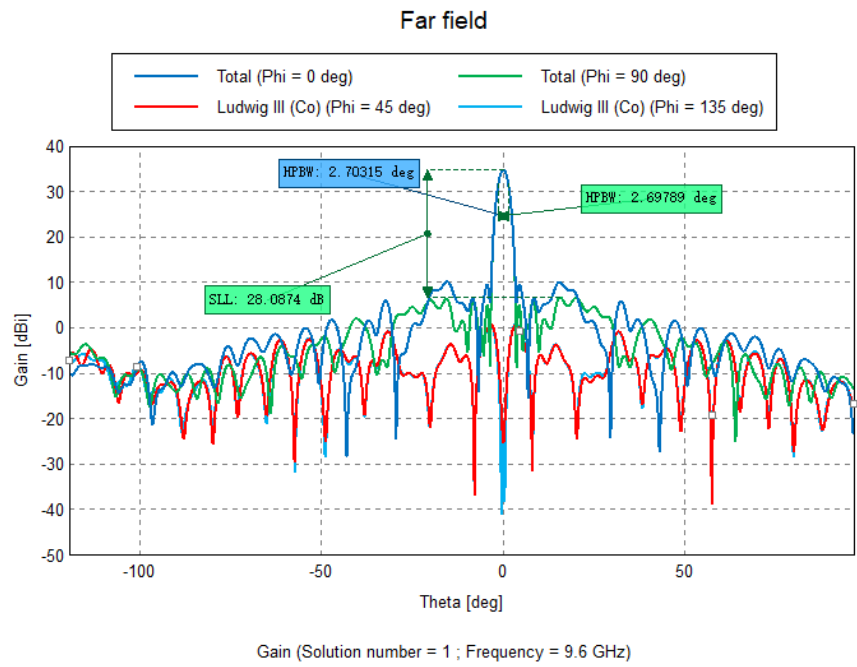


Figure 14. The simulation result of antenna radiation pattern (9.6 GHz)
图 14. 天线方向图仿真结果(9.6 GHz)

全频段仿真结果统计如表 1 所示。

Table 1. Antenna simulation result statistics
表 1. 天线仿真结果统计

频点/GHz	增益/dBi	第一副瓣/dB	波束宽度/°
9.2	34.4	-27.4	2.8
9.4	35.2	-20.37	2.7
9.6	34.8	-28.08	2.7

3. 结束语

本文针对小口径卡塞格伦天线进行了优化设计。为满足低副瓣的技术要求，本设计围绕扼流槽与支撑结构两大关键部分开展优化设计及仿真工作。一方面，在副反射面的边缘处增设扼流槽结构，以此有效减少边缘绕射产生的能量；另一方面，将馈源的支撑方式由传统金属支架替换为介质支撑，从而优化改善了小口径天线在副瓣电平方面存在的固有缺陷。仿真结果表明，在 0.8 m 口径的卡塞格伦天线设计中实现了副瓣电平小于-20 dB，为后续工作提供了理论支撑。

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] 李刚. 高增益低副瓣卡塞格伦天线设计[J]. 雷达科学与技术, 2010(6): 568-570.

[3] 刘钢, 郭琦. 无线电测控设备抗电磁干扰技术概述[J]. 电讯技术, 2013(4): 530-532.

[4] 李运志, 金秀梅, 赵继明, 等. 一种 W 波段低副瓣卡塞格伦双极化天线设计[J]. 电子世界, 2020(16): 112-113.

[5] Xu, X.F., Zhang, X.D., Zhou, Z.P., et al. (2013) Terahertz Cassegrain Reflector Antenna. 2013 *International Symposium on Antennas and Propagation, ISAP 2013*, Nanjing, 23-25 October 2013, 969-971.

[6] 钟顺时. 天线理论与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 416.

[7] 刘兴隆, 杜彪, 周建寨, 等. 低旁瓣小口径天线口面场分布函数的研究[J]. 无线电通信技术, 2019, 45(4): 425-430.

[8] 于海, 赵波, 刘昊, 等. 卡塞格伦天线副面赋形的设计与仿真[J]. 遥测遥控, 2013, 34(1): 44-47.

[9] James, J.R. and Hall, P.S. (1989) Christopher Wood. *Microstrip Antenna Handbook*. Peter Peregrinus Ltd., 120-150.

[10] Rahmat-Samii, Y. (2017) Antenna Design Challenges and Future Trends. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 59, 16-35.

[11] 张光义, 赵玉洁. 相控阵天线技术发展现状与趋势[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(3): 233-242.

[12] 张民, 李斌, 王新刚. 基于超材料的宽带高增益天线设计[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(8): 2379-2386.

[13] 刘可. 一种卡塞格伦天线[P]. 中国, ZL201910850265.3. 2020-01-31.