

Ka频段抛物面天线形变研究

邓阳光, 钞婷, 刘鹏, 杨洋, 王超琨, 李现敏

西安航天天绘数据技术有限公司天线产品室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年8月1日; 录用日期: 2025年8月25日; 发布日期: 2025年9月2日

摘要

抛物面天线形变后天线面精度降低, 不仅影响天线增益, 对天线指向精度以及跟踪精度都会产生一定的影响。要解决天线面实际使用过程中, 面精度降低对天线工作指标造成的影响, 首先应从天线面变形原因, 对指标产生的影响进行重点分析, 从而制定解决策略和方案, 弥补天线面形变对天线指标的影响。本文着重对天线面变形原因、影响指标情况以及解决措施进行论述, 以期对日后开展抛物面天线的研发设计和工程实践有一定的指导意义。

关键词

抛物面天线, 面精度, 增益

Research on Ka-Band Parabolic Antenna Deformation

Yangguang Deng, Ting Chao, Peng Liu, Yang Yang, Chaokun Wang, Xianmin Li

Antenna Product Department, Xi'an Aerospace Tianhui Data Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Aug. 1st, 2025; accepted: Aug. 25th, 2025; published: Sep. 2nd, 2025

Abstract

The accuracy of a parabolic antenna decreases after deformation, which affects not only antenna gain, but also antenna pointing accuracy and tracking accuracy. In order to solve the influence of reduced surface accuracy on the antenna working index in the actual use of the antenna surface, it is essential to first analyze the reasons for the deformation of the antenna surface and the impact on the indicators, so as to formulate solutions and schemes to compensate for the influence of antenna surface deformation on the antenna index. This paper focuses on the reasons for the antenna surface deformation, the influence of the index situation, and the solution measures are discussed, in order to carry out future research and development of parabolic antenna design and engineering practice, which has a certain guiding significance.

Keywords

Parabolic Antenna, Surface Accuracy, Gain

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

天线方向图测试过程中,发现天线面形变对方向图波束影响较大,特别是对于 Ka 高频段天线,天线面形变对方向图的影响特别明显,并引起波束主瓣增益下降,波束整体变得矮胖或方向图畸变严重。但对于高频天线,从外观上是很难发现天线面发生变形的,往往是在天线进场后进行方向图扫描测试时,发现方向图异常且反复调整幅面位置无效,此时就要考虑是否天线面发生形变。因此,对抛物面天线形变分析可以为工程实践积累一定的经验,避免一些故障风险,提高测试效率。

2. 面精度对增益的影响

反射面变形误差对天线增益的影响如公式(1),表面误差时,增益下降系数为:

$$\eta_s = \frac{G}{G_0} = e^{-\frac{16\pi^2}{\lambda^2}(\varepsilon_m)^2} \quad (1)$$

其中 G_0 为无表面误差时的天线增益; G 为有表面误差时的天线增益; ε_m 为主反射面精度误差; λ 为波长。

采用分贝表示则可写作:

$$\eta_s = 686 \left(\frac{\varepsilon_m^2}{\lambda^2} \right) dB \quad (2)$$

参考工程实例 3.5 米 Ka 频段天线,当 $\varepsilon_m = 0.25$ 时:

$$\eta_s = 0.15dB \quad (@17.7 \text{ GHz}); \quad \eta_s = 0.36dB \quad (@27.5 \text{ GHz});$$

$$\eta_s = 0.17dB \quad (@18.95 \text{ GHz}); \quad \eta_s = 0.4dB \quad (@28.75 \text{ GHz}).$$

根据口径天线理论计算,实现发射增益 56.5 dBi@28.75 GHz,接收增益 52.8 dBi@18.95 GHz 的指标要求,以天线口面为参考面,估算天线理论增益。

由面天线理论可知,天线增益是其最大理论增益与总的辐射效率之积,参考相关文献如[1][2],具体计算公式为:

$$G = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \eta = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta \quad (3)$$

其中 S 为主反射面面积; D 为主反射面直径; η 为天线总的辐射效率。

3. 天线理论设计

以工程实例 3.5 米 Ka 频段天线为参考,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。椭圆面的一个焦点位于抛物面的焦环上,另一个焦点和馈源的相位中心重合,馈源的轴线与主反射面的轴线重合,与旋转抛物面的焦轴平行。旋转椭圆面的焦点构成一个圆环。环焦天线的工作原理[1]如图 1 所示:

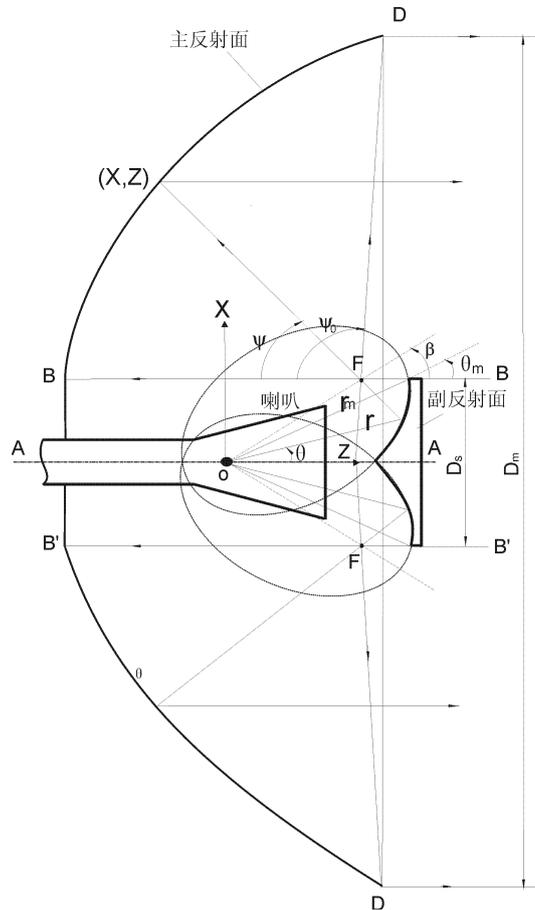
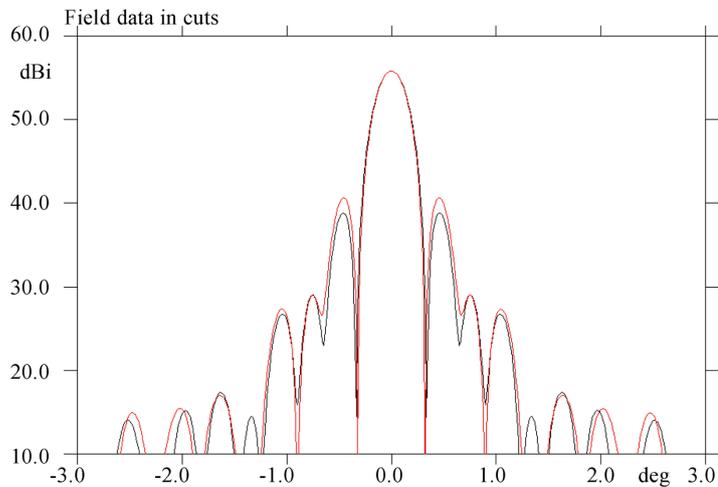


Figure 1. The working principle of a toroidal reflector antenna
图 1. 环焦天线工作原理

对馈源与反射面进行仿真，如图 2 所示，可以看到频率 18.95 GHz 时天线的增益是 55.18 dB。旁瓣为 -17.7 dB、频率为 28.75 GHz 时天线的增益是 59.75 dB，旁瓣为 -15 dB。技术要求的指标为频率 18.95 GHz 时天线的增益 ≥ 52.8 dB，频率为 28.75 GHz 时天线的增益 ≥ 56.5 dB，旁瓣要求为 ≤ -14 dB。天线的仿真增益与旁瓣满足要求。



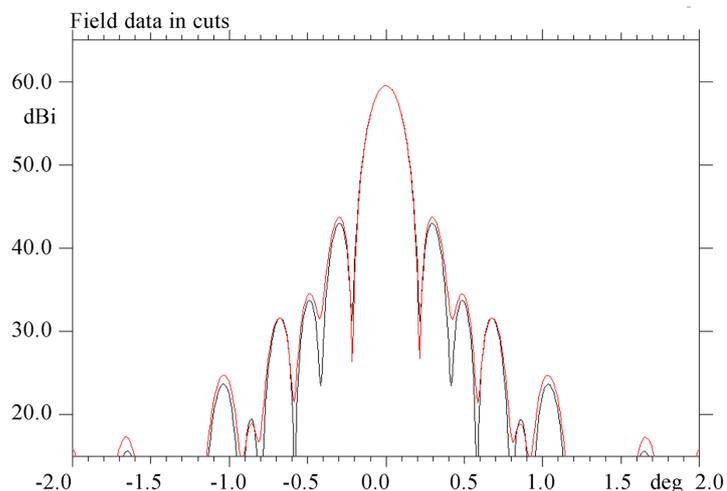


Figure 2. 18.95 GHz/28.75 GHz radiation pattern simulation results
图 2. 18.95 GHz/28.75 GHz 方向图仿真结果

4. 天线现场测试

天线实际测量方向图异常，实测场景图如图 3 所示：



Figure 3. Photograph of the antenna during field measurements
图 3. 天线现场实测场景图

在用户现场开展机动站天线分系统方向图测试时，方向图异常。天线分系统技术指标要求增益：下行 $\geq 52.8 + 20 \lg(F/F_0)$ ， $F_0 = 18.95 \text{ GHz}$ ；第一旁瓣 $\leq -14 \text{ dBi}$ 。

经现场调测后，方向图增益较差，增益下降到 51 dB，且第一旁瓣不明显，副瓣电平 $> -10 \text{ dBi}$ ，如图 4 所示。

在天线调测过程中对副面的理论位置进行了纵向拉伸，调整副面边沿到馈源筒端面距离从 270 mm 向外一直测试到 290 mm，并对副面进行了上下和左右平移，反复测试获得的方向图依然异常。通过对天线幅面调整，幅面在理论焦点位置附近调整后，天线实测方向图异常结果类似，初步判定天线主面发生变形的概率较大。



Figure 4. Antenna pattern anomaly test report
图 4. 天线扫描方向图异常测试结果

通过以上分析证明，副面位置与天线方向图异常无关，应考虑分析是否存在主面变形原因。

经分析，由于机动站天线反射体装调后需整体运输，为了满足公路运输标准，需要整体拆卸天线反射体，天线反射体吊装卸下后，随机动站一起运输至任务地点。现场对天线面进行吊装后，以及运输过程中的不确定因素，引起主面发生变形的可能性较大。

天线主面由 12 块天线面板拼接组装而成。以中心体为基础支撑，在其圆周方向上均匀布置 12 条辐射梁，相邻两块面板通过若干螺钉与辐射梁连接，将所有面板组装为一个整体，如图 5 所示。

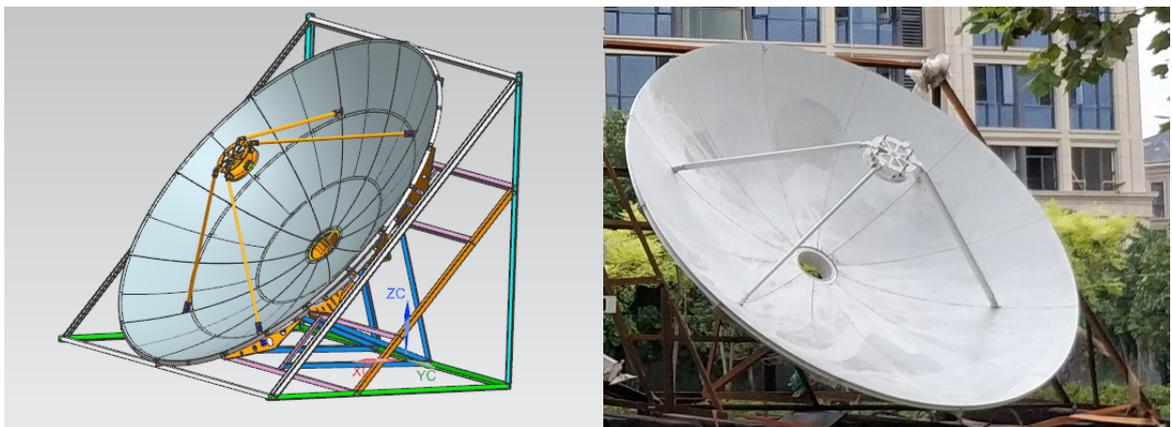


Figure 5. Schematic diagram of the antenna main reflector
图 5. 天线主面示意图

由于 Ka 频段面板精度要求较高，对微小变形较敏感，因此在吊装过程中要特别关注吊装点以及吊装

方式, 不能使面板发生变形。在实际操作中, 由于吊装点选在了 4 个连接副面支撑杆处, 吊装过程中副面支撑杆受到拉拽从而导致天线面板朝向内侧发生微小变形, 天线主面精度下降, 导致方向图不满足指标要求, 故吊装可能引起主面形变。

5. 摄影测量法检测

采用摄影测量法进行面精度测试, 摄影测量法通过多角度图像采集和三维重构技术[3]-[5], 结合控制点标定, 测量天线实际表面与理论模型的偏差, 从而评估面精度。天线面表面标志点及基准尺图像采集示意图如图 6 所示。

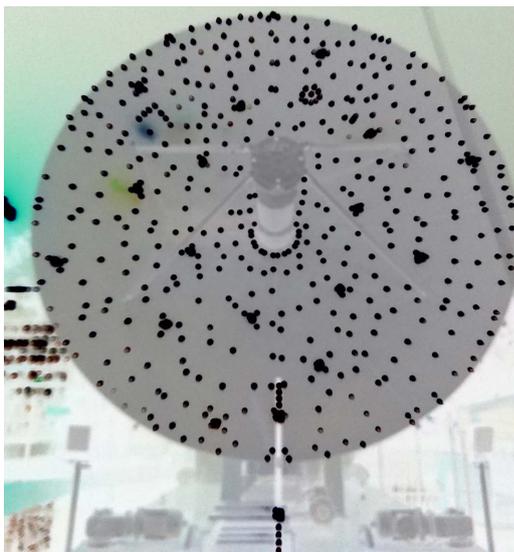


Figure 6. Schematic diagram of marker points and reference scale image acquisition on antenna surface
图 6. 天线面表面标志点及基准尺图像采集示意图

测试过程及结果如下:

1) 测量系统搭建

本系统采用 MPS/S 工业摄影测量系统, 该测量系统主要由相机、基准尺、MPS/S 软件及 BASS 叶片曲面分析软件等构成, 通过相机拍摄照片, 利用 MPS/S 软件提取被测物体的三维坐标数据, 最后借助 BASS 叶片曲面分析软件进行曲面型面残差分析。

标志点布设, 在天线表面均匀粘贴回光反射标志(单点靶标和编码点), 单点间距 40~80 mm, 编码点用于图像定向匹配。固定标准尺, 用于长度校准和坐标转换。

2) 图像采集

通过专用相机对粘贴标志点的天线面进行多角度拍摄, 单次拍摄覆盖局部区域, 通过拼接完成整体测量。

3) 数据处理

通过摄影测量专用软件, 新建工程, 导入相机图像文件和基准尺文件, 对工程情况及系统参数进行设置, 包括自动测量、光束法平差、平差结果、扫描、定向、匹配、平差设置等。对平差后的数据导出并保存。

4) 数据形体空间拟合与空间分析

数据形态拟合与空间分析采用与工业摄影测量配套的曲面分析专用软件, 用于自由曲面的型面偏差

分析。

面板检测点数据与理论型面空间拟合分析，具体流程步骤如图 7 所示。



Figure 7. Flowchart for freeform surface profile analysis
图 7. 自由曲面型面分析流程图

5) 测试结果

天线面精度均方根误差 $RMS = 1.372\text{ mm}$ ，如图 8 所示，面精度超差严重。通过测试模型发现天线面两端边沿对称位置下降，变形较大。可以印证，天线主反射面变形，使得口面增益降低，进而导致经主面反射的电磁波发生变化，导致方向图产生畸变。

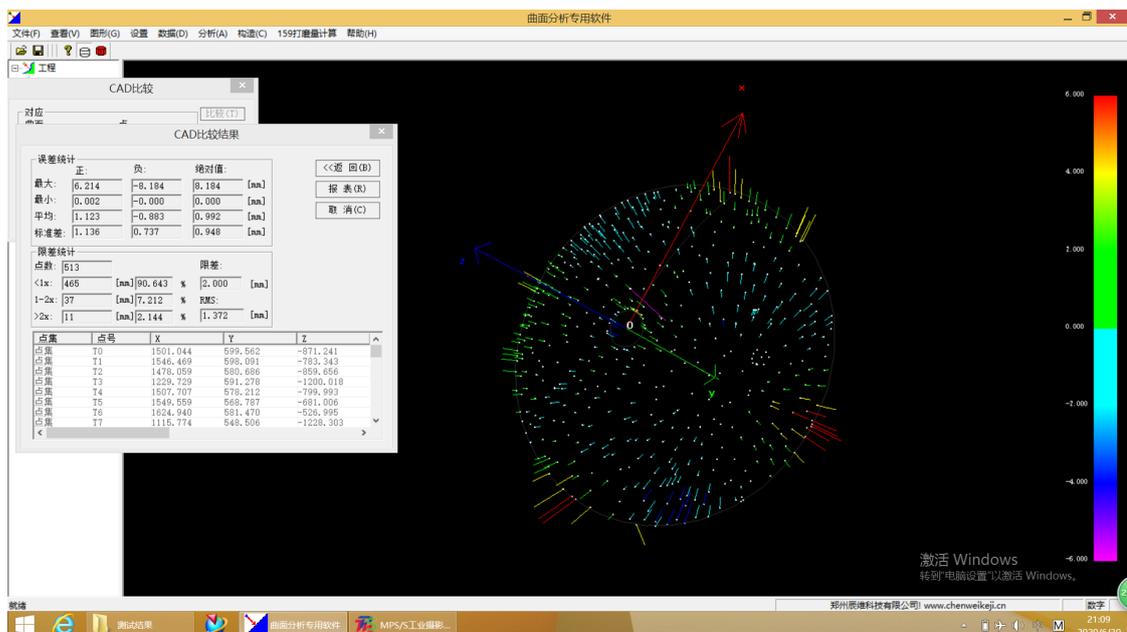


Figure 8. Photogrammetric measurement diagram of antenna main reflector surface accuracy
图 8. 天线主面精度摄影测量图

6. 电仿真分析

由于该产品问题复现会损坏天线结构本体，现通过仿真手段对问题进行复现，相关文献提到过天线主面变形对方向图的影响[6] [7]。

通过对 3.5 米 Ka 天线主面模拟主面变形情况与标准面天线方向图进行对比，可以获得天线主面变形对方向图的影响结果。3.5 米 Ka 天线主面的变形仿真结果如图 9~11 所示，图中黑色曲线为标准面方向图仿真结果，红色曲线为主面边缘翘起 4 mm 方向图仿真结果，绿色曲线为主面边缘下降 4 mm 方向图仿真结果。

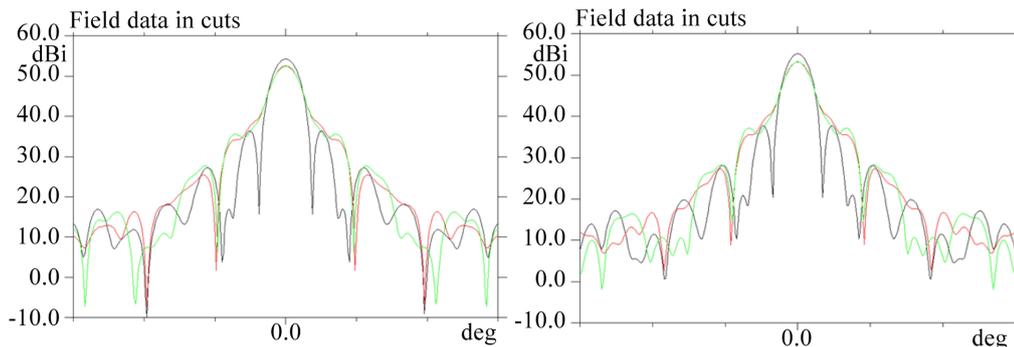


Figure 9. Radiation pattern comparison at 17.7 GHz and 18.95 GHz

图 9. 17.7 GHz/18.95 GHz 方向图对比

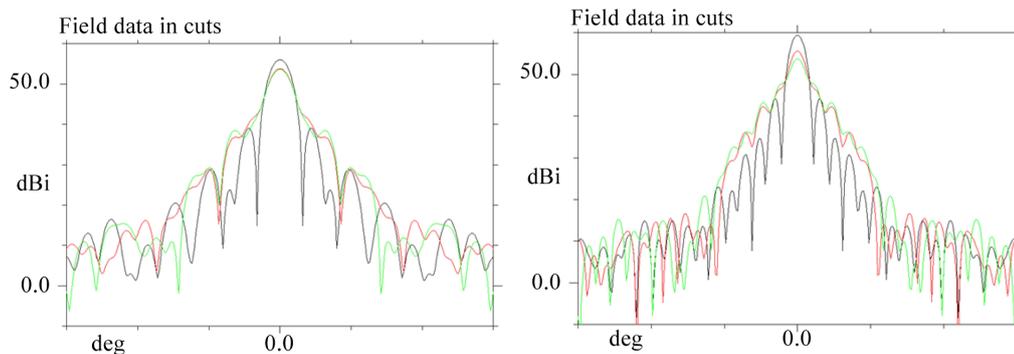


Figure 10. Radiation pattern comparison at 20.2 GHz and 27.5 GHz

图 10. 20.2 GHz/27.5 GHz 方向图对比

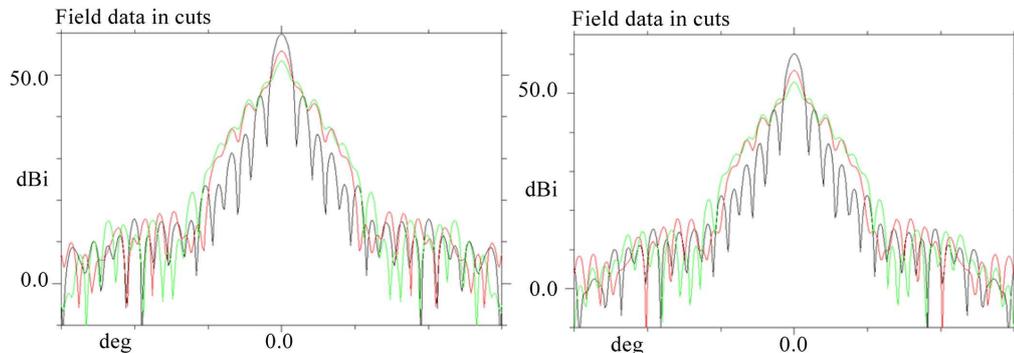


Figure 11. Radiation pattern comparison at 28.75 GHz and 30 GHz

图 11. 28.75 GHz/30 GHz 方向图对比

由图 9~11 可见,主面变形引起天线增益下降,方向图变胖,具体数据如表 1 所示。天线在 17.7 GHz 至 20.2 GHz 接收频段,主面翘起或下降 4 mm,天线变形面与天线标准面相比增益下降约 1.7 dB~2.3 dB,天线 3 dB 波束宽度(半功率波束宽度)增加约 0.075°;天线在 27.5 GHz 至 30 GHz 发射频段,主面翘起或下降 4 mm,天线变形面与天线标准面相比增益下降约 4 dB~7.3 dB,天线 3 dB 波束宽度(半功率波束宽度)增加约 0.15°;频率越高,对天线面变形越敏感,对天线增益和波束电性能指标影响越大。

通过将图 2 天线理论仿真方向图和图 4 天线实际测试方向图进行对比,结合图 9~11 方向图理论仿真模拟验证,发现天线由于主面发生形变造成了天线增益下降、天线半功率波束宽度增大(表现为天线方向图变胖)。

Table 1. Simulation data analysis table of antenna at typical frequency points

表 1. 天线不同典型频点仿真数据分析表

频率(GHz)	主面变形情况	增益(dB)	3 dB 波束宽度(°)	备注
17.7	标准面	54.27	0.318	
	翘起 4 mm	52.50	0.390	
	下降 4 mm	52.56	0.387	
18.95	标准面	55.18	0.286	
	翘起 4 mm	53.18	0.360	
	下降 4 mm	53.16	0.361	
20.2	标准面	56.03	0.259	
	翘起 4 mm	53.81	0.335	
	下降 4 mm	53.64	0.342	
27.5	标准面	59.38	0.176	
	翘起 4 mm	55.54	0.274	
	下降 4 mm	53.75	0.337	
28.75	标准面	59.78	0.168	
	翘起 4 mm	55.72	0.269	
	下降 4 mm	53.32	0.354	
30	标准面	60.14	0.162	
	翘起 4 mm	55.86	0.265	
	下降 4 mm	52.80	0.376	

综上所述,天线主面变形影响天线测试方向图结果,与实际测试情况相互印证。

7. 解决方案

采用天线面模板对主面重新装配,并配合测量结果进行主面面精度调整,主面面精度测试及调试方法参考文献[8]。具体处理措施如下:

1) 采用专用面板装调工装,对天线主反射面重新进行装调。重新装调过程如图 12~14 所示,经调测后保证天线面满足面精度均分根误差满足指标 $RMS \leq 0.35$ 的要求;



Figure 12. Physical diagram of specialized feeler gauge for testing
图 12. 专用测试工具塞尺实物图



Figure 13. Schematic diagram of dedicated test fixture for aligning and assembling antenna reflector
图 13. 专用测试工装调测拼装天线面示意图

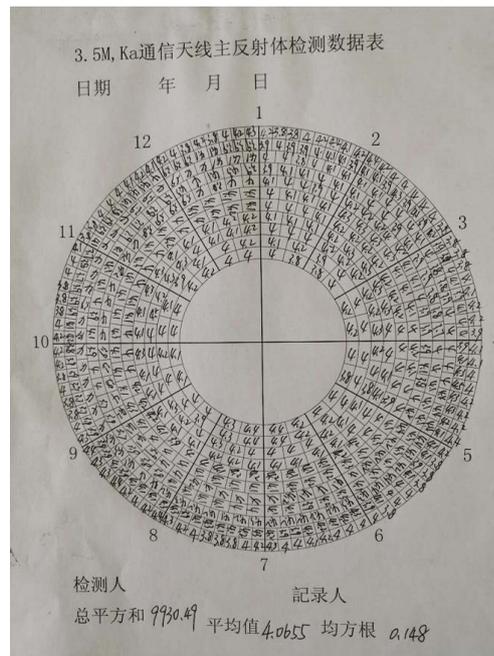


Figure 14. Schematic diagram of test results for 3.5-meter Ka-band antenna reflector after alignment and assembly
图 14. 3.5 米 Ka 频段天线面装调后测试结果示意图

2) 结合以往工程经验, 设计新的吊装方式。采用中心体作为吊装点, 增加吊环螺钉。首先, 中心体作为整个天线反射体的中心承载部件, 且为焊接框架结构, 刚度较大, 不易产生变形; 其次, 中心体处于主面中心轴线上, 接近质心位置, 吊装时不易发生倾覆。因此, 将吊装位置设在中心体底板下端面法兰处较为合适, 在此处均匀布置 4 个吊环螺钉, 并使用 4 根等长的吊带穿过吊环螺钉进行吊装, 既避免

了天线面板本体直接受力产生变形，又可防止天线在吊装中发生倾覆，吊装示意图如图 15 所示。

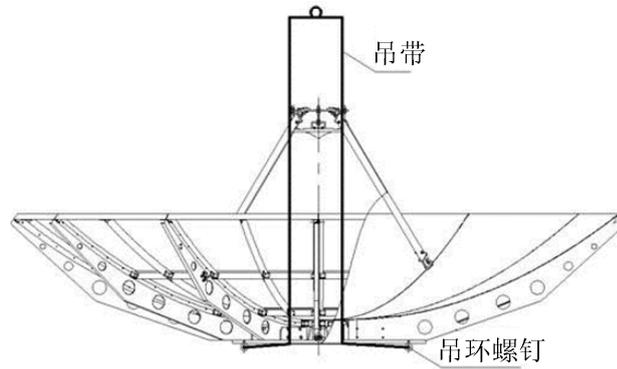


Figure 15. Lifting and installation schematic diagram for 3.5-meter Ka-band antenna
图 15. 3.5 米 Ka 频段天线吊装示意图

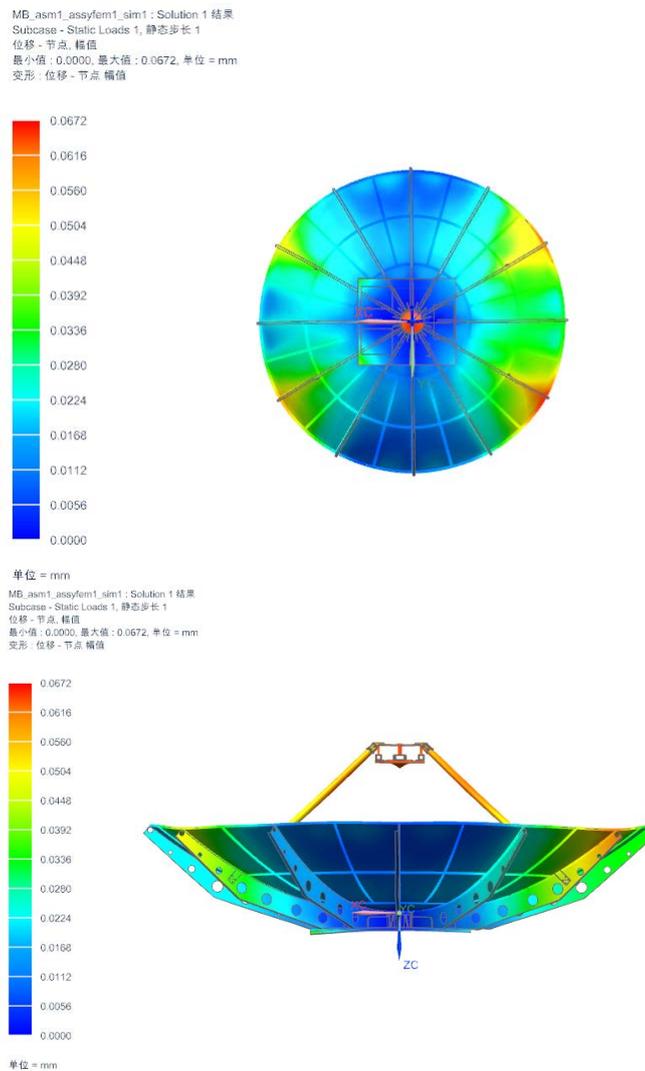


Figure 16. Schematic diagram of mechanical simulation results for 3.5-meter Ka-band antenna hoisting
图 16. 3.5 米 Ka 频段天线吊装力学仿真结果示意图

天线面精度相关分析参考文献[9][10], 经过热力学仿真分析, 如图 16 所示, 该吊装方式主面形变量小于 0.0672 mm, 不会影响主面精度。

8. 改进优化

8.1. 优化天线面背架结构

天线反射体加装两圈环梁, 增强背架整体刚性及稳定性。如图 17、图 18 所示, 增加的两圈环梁现场配装, 每圈环梁按天线面分瓣进行均分, 通过连接辐射梁形成一个整体, 对天线面本体起到加强作用。由于天线背架安装采用配打孔方式, 天线面拼接和安装固定后进行加强连接, 不影响天线面精度。

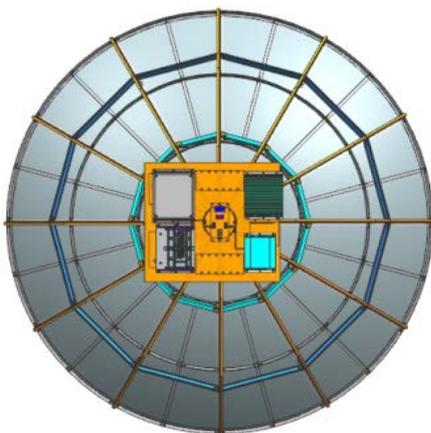


Figure 17. 3D drawing of 3.5-meter Ka-band antenna backframe with two additional ring beams
图 17. 3.5 米 Ka 频段天线背架增加两圈环梁的三维图



Figure 18. Physical photo of 3.5-meter Ka-band antenna backframe with two additional ring beams
图 18. 3.5 米 Ka 频段天线面背架增加两圈环梁的实物图

8.2. 增加吊装工装

优化天线吊装工艺过程, 在天线吊装过程中采用吊装工装, 保证天线面在吊装过程中不发生变形。

设计吊装工装, 如图 19 所示, 吊装天线时将吊带分别连接在工装各个吊环上, 保证吊装过程中吊带与辐面不发生干涉, 确保吊装天线头的安全。



Figure 19. 3D model and physical photos of antenna reflector lifting fixture
 图 19. 天线面吊装工装三维及实物图

8.3. 验证测试

改进后测试结果满足指标要求，结论如下：

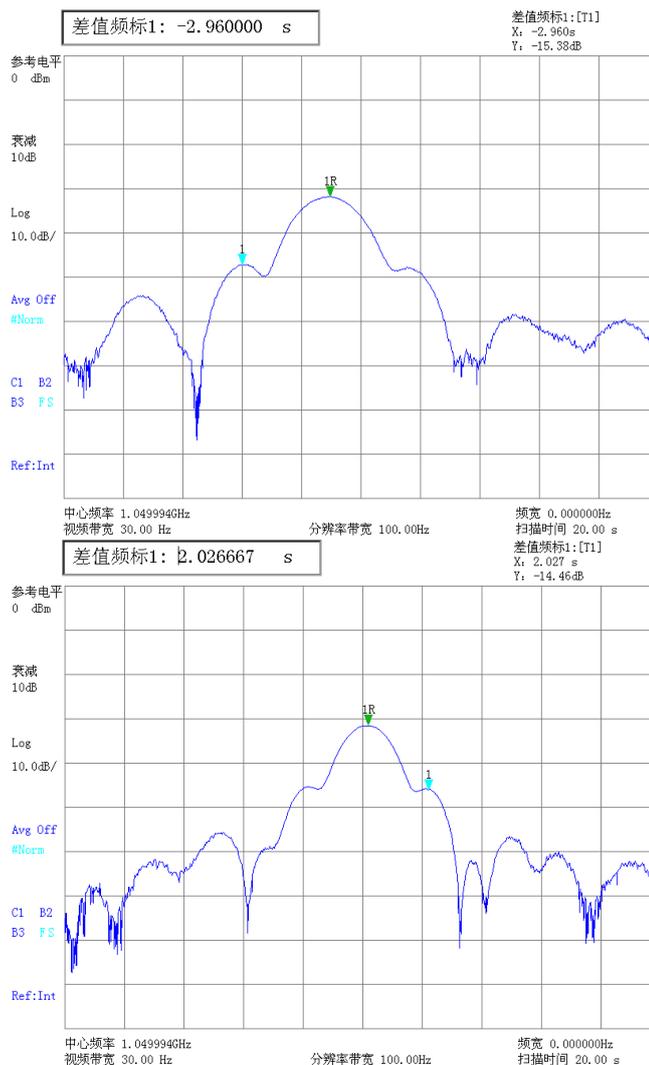


Figure 20. Antenna radiation pattern test results diagram
 图 20. 天线方向图测试结果图

在加强天线面背架结构、增加吊装工装、优化天线面运输工装，并进行吊装和跑车试验后，对机动站天线进行测试，对比各项指标与跑车试验前的指标，发现测试结果与跑车试验前一致，实际测试方向图如图 20 所示，满足指标要求。

天线整机系统联调对星验证测试，接收卫星信号电平值如图 21 所示，信号稳定，各项指标性能优异。



Figure 21. Link test results diagram of antenna auto-tracking system

图 21. 天线自动跟星系统链路测试结果图

9. 结论与展望

天线测试方向图异常，是由于吊装方法或运输防护问题造成主面变形导致。对变形的主面重新调装后，问题解决，重新测试后，结果显示方向图满足指标要求，经天线自动跟星系统链路测试，信号稳定，系统性能指标优异。此外重新设计了新的天线面调装方法，确保以后天线面调装过程不会造成天线面变形问题。

本文结合天线方向图异常实际工程案例，详细分析论述问题原因，通过仿真问题得以复现，提出了有效的改进措施，验证了改进后的成功结果，以期对以后的工程实践有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 聂在平. 天线工程手册[M]. 成都: 电子科技大学, 2014: 6-12, 669-681.
- [2] 王玖珍, 薛正辉. 天线测量实用手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 142-150, 186-192.
- [3] 古丽加依娜·哈再孜汉, 王娜, 许谦, 薛飞. 大口径天线主反射面面形快速摄影测量方法研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54(1): 69-78.
- [4] 段浩, 浦理华, 武永美, 范洋, 任瑞敏. 大型环形可展开天线型面高精度测试方法研究[J]. 空间电子技术, 2022, 19(6): 107-114.
- [5] 杨永忠, 吕传景. 数字摄影测量技术在抛物面天线型面精度、重力变形测试中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2014(4): 9-10.
- [6] 李华军, 魏平, 孟东林, 王维龙. 天线方向图精密测量方法量化对比研究[J]. 计量学报, 2024, 45(11): 1724-1732.

-
- [7] 许社教, 栾玉乔, 邱扬, 袁军, 田锦. 车载多天线系统实用仿真方向图的生成研究[J]. 电子科技, 2005(12): 9-11, 15.
 - [8] 孙永江, 金华松, 于建成, 邱冬冬. 船载测控天线面精度测试及调整方法[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(9): 18-21.
 - [9] 刘佳玥, 纪玉杰. 天线反射面的空间热变形型面精度分析[J]. 机械工程与自动化, 2024(4): 39-41.
 - [10] 钱宏亮, 刘岩, 范峰, 付丽, 刘国玺. 65 m 天线结构主反射面面形精度分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 3027-3033.