

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.03.10

# 基于粒子群算法的面天线小板拟合的 优化设计

张文阳<sup>1,2</sup>, 伍 洋<sup>1,2</sup>, 刘胜文<sup>1,2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081; 2. 河北省射电天文技术重点实验室, 石家庄 050081)

**摘要:** 以 40 m 偏置卡塞格伦天线为例, 对不同小板拟合方案进行分析, 探究小板设计与型面精度的关系, 验证了反射面的型面精度与小板的环向与轴向长度的平方成正比。同时运用仿真软件对不同方案进行仿真验证, 探究了小板尺寸变化对天线增益带来的影响, 并证明了小面板环间距仅对水平方向能量分布产生影响, 而同一环中分割宽度则决定了垂直方向的能量分布。运用粒子群算法对小板的分割方案进行优化, 来提高面型精度, 从而实现降低远场旁瓣和减少射频干扰的目的。对 3 m 的小板方案进行了仿真实验, 验证了该方案的可靠性, 补偿了因型面变化导致的中心波束损失能量的 3.6%, 同时有效降低了新产生的旁瓣功率, 分别降低了 1.15 dB、0.77 dB、0.52 dB、1.02 dB 和 2.1 dB。

**关键词:** 面天线; 小板拟合; 型面精度; 大尺寸天线; 优化模型

**中图分类号:** P111.44 **文献标识码:** A

## 1 引 言

反射面天线作为天线设计的一大分支, 它具有方向性强, 制作成本低等优点, 因此在卫星通信和射电望远镜等领域被广泛应用。随着科技的发展, 人们向深空领域发起了新的探索, 而对天线的灵敏度和分辨率也提出了更高的要求。对于反射面天线, 增大天线口径是提高天线灵敏度和分辨率的有效途径之一。

在实际工程中, 大口径反射面天线往往需要分块制作, 而面板的数量和种类影响着整体天线的制作成本。因此, 为降低成本, 会用小尺寸平面来代替原有反射面<sup>[1]</sup>, 这也在设计

收稿日期: 2024-06-24; 修回日期: 2024-10-08

资助项目: 国家自然科学基金 (12175192)

通讯作者: 张文阳, 1002827333@qq.com

之初就使反射面与理想抛物面产生了偏差<sup>[2]</sup>，这种偏差经常用均方根来表示，并称作型面精度。型面精度越高，设计的反射面越贴近理想抛物面，但这也对小平面的尺寸提出了更严格的约束。因此，小面板种类和数量的变换、型面精度的影响及其对反射面天线电性能的最终影响成了关键问题。

为更好地观测不同红移处中性氢超精细跃迁产生的 21 cm 散射辐射，由巴西牵头，与多国研究机构展开合作，设计并建设了 BINGO (Baryon acoustic oscillations for Integrated Neutral Gas Observations) 射电天文望远镜。BINGO 利用中性氢强度映射技术，在关键的红移范围 ( $z = 0.13 \sim 0.45$ ) 精确测量重子声学振荡。其主要目标是深入研究暗能量的性质，检验宇宙学标准模型，并精确测量关键的宇宙学参数。该射电望远镜是一台口径为 40 m 的偏置卡塞格伦天线<sup>[3]</sup>，工作频率范围为 0.98 ~ 1.26 GHz，使用小面板拟合的方法可以有效降低建设成本，本文对 BINGO 望远镜的反射面进行了建模，计算了在不同分割方案下天线型面精度的变化，以及天线方向图的变化。

## 2 理论依据

型面精度的变化，直接影响了电磁波从远场到馈源的光程，进而会影响焦面场的分布。因此，型面精度经常作为天线设计的标准之一，而准确快速地对天线进行建模，并对其型面精度进行计算是首先要解决的问题<sup>[4]</sup>。目前对于天线建模的研究，更多的是对已制作的天线进行测量并进行建模，用 Coons 曲面拟合天线<sup>[5]</sup>，或是基于最小二乘法对曲面进行拟合<sup>[6]</sup>。本文将针对天线设计中的型面误差进行数学建模，并对天线进行电性能的仿真实验。本章将介绍所用到的计算方式，以及天线电性能仿真的方法。

### 2.1 任意多边形型面精度的计算

任意一个多边形都可以拆分成多个三角形，问题也就转变成在抛物面上任取三点，并连接形成平面，然后计算出该平面与原抛物面之间的偏差。为简化计算，首先引入整体坐标系与局部坐标系<sup>[7]</sup>。整体坐标系以抛物面顶点为圆心建系，局部坐标系则以拟合平面为基准建系，因此只需计算抛物面在局部坐标系下的投影。

局部坐标系可以视作整体坐标系通过平移和旋转得到的。空间中任意一点  $P_1$ ，其坐标转换关系为：

$$\mathbf{X}_B = {}^B_A \mathbf{R} \cdot (\mathbf{X}_A - \overrightarrow{OP_1}) \quad (1)$$

式中， ${}^A_B \mathbf{R} = {}^B_A \mathbf{R}^{-1}$  是由整体坐标到局部坐标的旋转矩阵，由局部坐标系单位矢量在整体坐标系下坐标所组成， ${}^B_A \mathbf{R} = (\hat{x}', \hat{y}', \hat{z}')$ 。

有了两个坐标系的转换关系，再将抛物面在整体坐标系下的表达式代入，即可获得原曲面在局部坐标系下的函数关系，记作  $f(x', y', z') = 0$ 。同理可得变形面的表达式为  $g(x', y', z') = 0$ ，再由三角形在局部坐标下的位置确定  $(x', y')$  的定义域，两者到  $x'O'y'$  平面的距离之差即为在该点的误差。

同时因为三角形的三个顶点均在旋转抛物面上, 也可以获得该点坐标与焦距  $f$  的关系:

$$z_1 = \frac{x_1^2 + y_1^2}{4f} . \quad (2)$$

将式 (2) 代入到式 (1), 可以进一步简化运算得到以下关系:

$$z - z_1 = [2x_1(x - x_1) + 2y_1(y - y_1) + (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2]/4f . \quad (3)$$

利用式 (2) 和式 (3), 任意一点的误差值可以表示为:

$$\Delta z' = z'_f - z'_g . \quad (4)$$

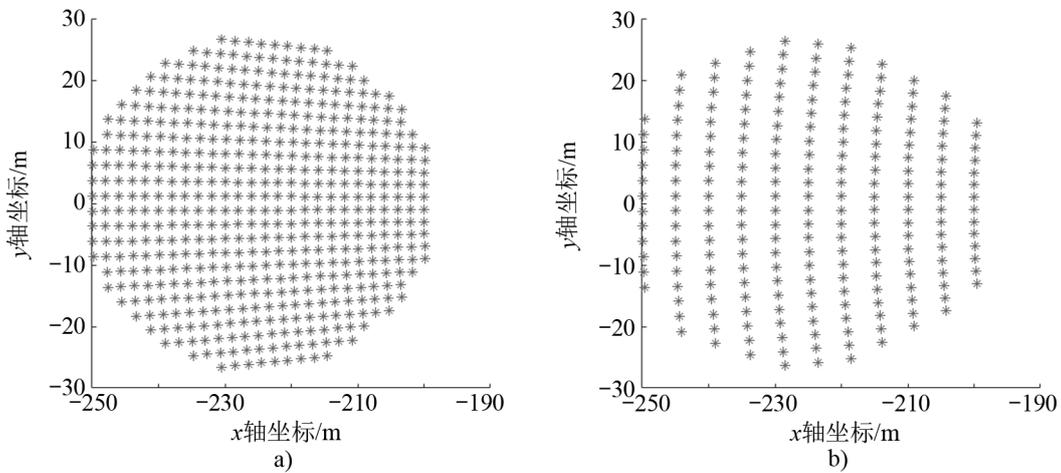
通过积分, 可以计算出三角形区域内的均方误差:

$$\sigma = \left( \frac{\iint \Delta z' dx' dy'}{\iint dx' dy'} \right)^{1/2} . \quad (5)$$

## 2.2 面板分割方案及电仿真

此次实验以 BINGO 为例, 只对主反射面进行了实验分析。为了减少面板种类, 本文选取了环向分割的方案, 每一环的面板相同, 再通过调整小面板的在  $XOY$  平面下投影的长和宽, 来改变小面板种类数和总数。

图 1 为环间距分别为 2 m 和 5 m, 面板宽 2 m 时,  $XOY$  平面的顶点投影。



a) 为环间距 2 m, 宽度 2 m 的分割取点的分割方案示意图; b) 为环间距 5 m, 宽度 2 m 的分割取点的分割方案示意图。

图 1 主反射面分割方案俯视图

将反射面的散点信息导入仿真软件 GRASP 中, 并构建反射面, 选择三角形平面构型, 其模型示意图如图 2 所示。在仿真过程中, 馈源与副反射面保持不变, 仅改变主反射面形状, 探究不同方案下, 型面精度的变化以及对远场方向图的变化。

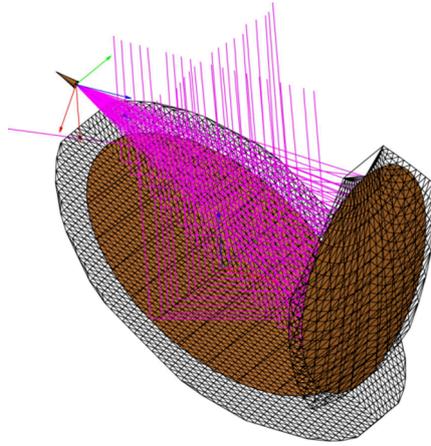


图 2 BINGO 天线仿真模型

### 2.3 粒子群优化算法

对于用小板拟合的反射面天线，整体面板的型面精度与天线的电性能呈正相关关系，即型面精度越高，天线的电性能越接近理想面，则增益越高。而型面精度直接受面板的分割方案影响。在本文中首先对比不同尺寸小板的电性能，在确定基本尺寸后，再通过微调，对分割后的反射面进行补偿，以达到提高天线增益的目的。

在分割取点中，每块小板的形状又是相互影响的，型面精度与取点位置无法用简单的函数表达式解释，因此可以将该优化问题抽象为多元未知函数的优化问题，为解决这一问题，引入了粒子群算法<sup>[8]</sup>，在全局搜索与局部搜索中，寻找相对最优解。最终再通过反射面天线的电仿真，验证通过粒子群优化算法，提高天线增益方案的可行性。

## 3 实验验证

上一章中已经介绍了天线的设计方案，本章将调整小面板的尺寸，计算不同情况下的型面精度，同时比较不同方案下天线的电性能。

### 3.1 小面板尺寸与型面精度关系

在工程实践中，工程师们常用离散化的方式计算拟合平面的型面精度，即在面板上以一定规则取点，并计算它到理想曲面的距离。而这一方法受取点方法和稠密度限制，只有均匀且足够多的点，才能认为所得型面精度足够准确。而本文中采用坐标转换的方法，保留了原有曲面坐标的函数关系，可以更准确高效地计算出所需结果。

首先以近似正方形的矩形进行分割，设置相等的环间距和宽度，并逐渐增大，研究其型面精度的变化，其结果如图 3 所示。随着小面板边长的增大，均方根误差增加速率增大。为了解其变化趋势，我们计算了其斜率变化率，如图 3b) 所示，可知小面板型面精度与其边长成二次函数关系。

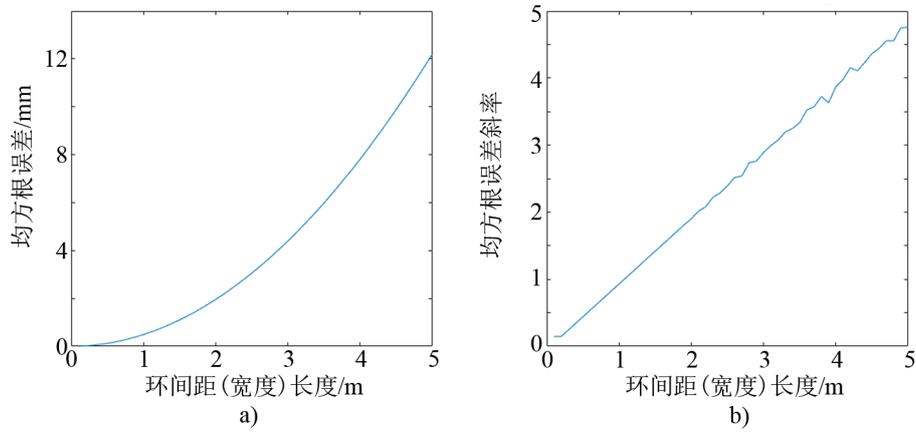


图3 型面精度与小面板尺寸关系

第一步实验采用的是近正方形小面板, 边长的平方即小面板面积, 因此在正方形下, 面型精度与面积成一次线性关系。而对于两边不等的矩形, 其面积与型面精度关系仍需要进一步实验验证。我们分别改变分割时小板的环间距和宽度, 观察面型精度的变化, 其关系如图4所示。环间距和宽度都与面型精度表现为二次函数关系, 用  $x$  和  $y$  分别表示环间距和宽度, 则面型精度  $\delta$  与其存在以下关系:

$$\delta = ax^2 + by^2, \quad (6)$$

其中,  $a$  和  $b$  为常数, 与理想反射面形状有关。

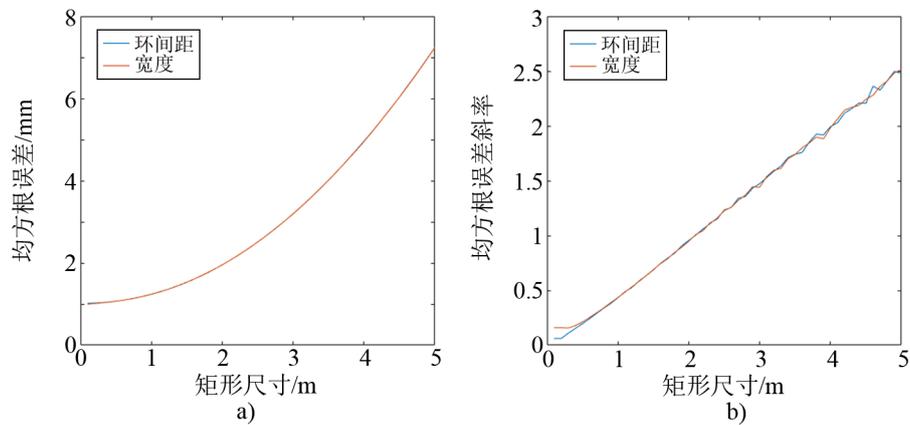


图4 型面精度与小面板环间距/宽度关系

### 3.2 分割方案与方向图关系

前文已经分析了面型精度与小面板分割方案的关系, 但面型精度与天线电性能并不是线性关系, 因此, 在这一节中我们对不同情况的分割方案进行仿真验证。

同上一节中的设定, 对比不同尺寸正方形面板的电性能, 截取经过不同反射面反射后

的水平方向方向图, 观察到多个旁瓣增益明显增高, 我们称之为“鼓包”, 不同“鼓包”位置及其对主波束的影响记录在表 1 中。图 5 为与极化同向的方向图, 可以直观地看到, 随着面板边长增加, 其旁瓣出现不同程度的“鼓包”现象, 且其数量与矩形边长成正比。

表 1 不同边长小面板方向图分析

小板尺寸/m	第一鼓包/(°)	第一鼓包增益/dB	归一化零点增益/dB
1	12.6	-51.7	-0.000 2
2	6.5	-38.8	-0.002 1
3	4.3	-31.9	-0.013 9
4	3.3	-27	-0.039 1
5	2.6	-23.2	-0.097 8

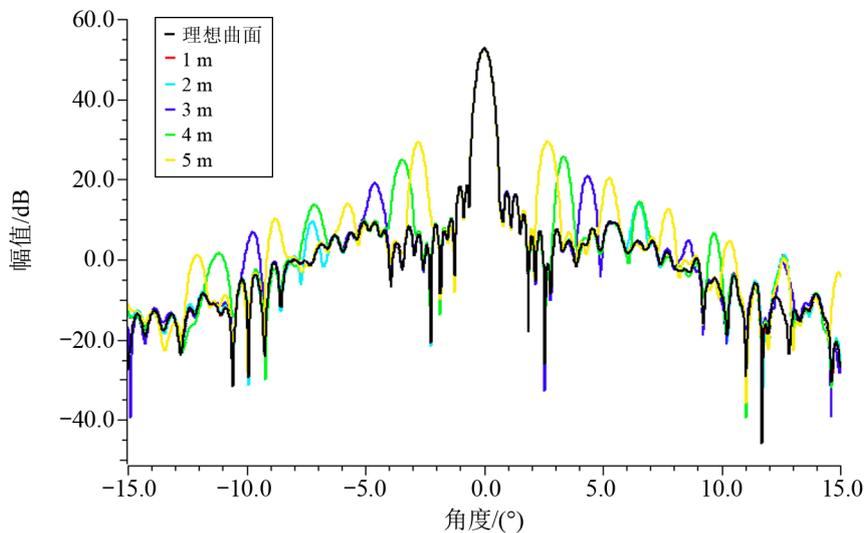


图 5 水平方向上不同边长小面板方向图

同时可以注意到, 第一次鼓包出现位置随小面板尺寸增大而靠近波束中心, 当小面板边长为 5 m 时, 该旁瓣已出现在  $3^\circ$  以内, 这对天线探测目标准确性的影响极大。在中心波束处, 随着小面板边长增加, 增益恶化程度与型面精度不同, 而是以更快的方式降低。

同理, 对比垂直方向的方向图, 如图 6 所示。当小面板边长大于 3 m 时才出现明显鼓包, 且出现位置与水平方向基本一致, 这进一步证明, 面板分块使天线在不同角度增益发生突变, 且与正方形小板边长有关。

为进一步研究分割形状对天线增益的影响, 接下来分别改变小板的长和宽, 并进行电仿真对比。从前面的仿真中可以发现, 在小板边长 1 m 以内时, 方向图变化较小, 因此选择固定一边长为 1 m, 同时改变另一边的长度, 来进行对比试验。当只改变环间距时, 垂直方向上的方向图并无明显变化, 而水平方向上的方向图同之前实验结果, 与环间距成正比, 出现不同程度的鼓包现象, 其水平方向图如图 7 所示。当只改变小板宽度时, 水平方向上的增益并无明显变化, 仅改变了垂直方向上的能量分布, 其垂直方向图如图 8 所示。

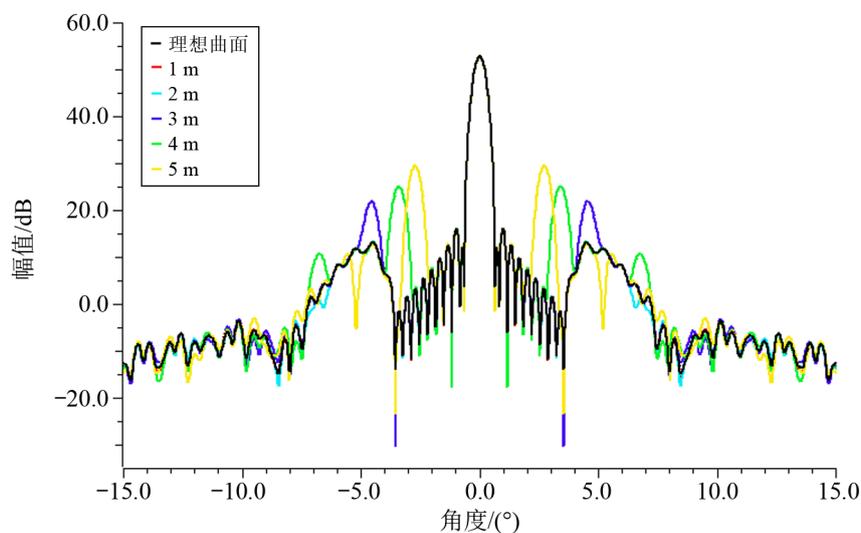


图 6 垂直方向上不同尺寸小面板方向图

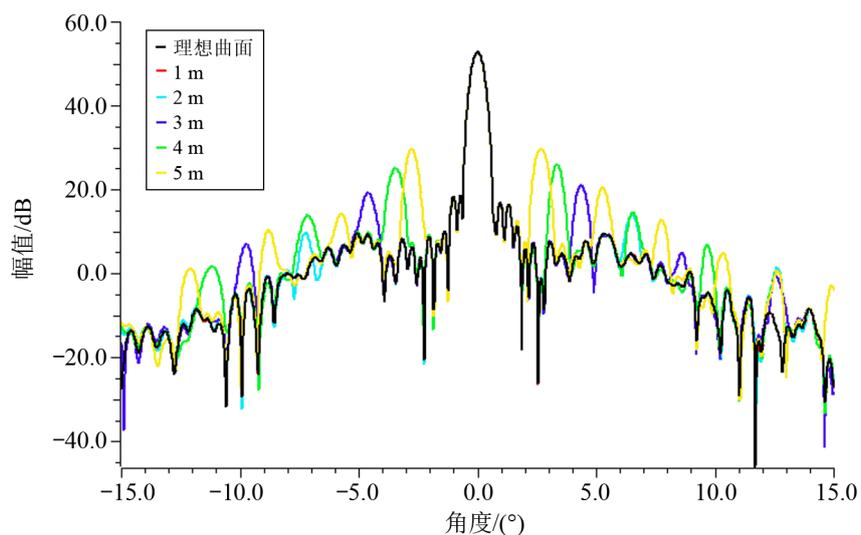


图 7 水平方向上不同环间距方向图

综合实验结果, 可以发现环间距的变化主要影响水平方向辐射, 宽度变化主要影响垂直方向辐射。从电磁波传播的角度分析, 当间距逐渐增大时, 反射面发射的电磁波相位变化增大, 矢量叠加后, 能量在对应角度更加集中, 产生了“鼓包”。

有了上述的实验, 我们发现型面精度会影响天线整体电性能, 但并非简单的线性关系。小面板的设计方案也会直接影响天线不同方向的能量分布。而在已完成的实验中,  $3\text{ m} \times 3\text{ m}$  的小板分割方案, 具有较为明显的旁瓣, 且中心波束略有下降, 在此基础上可以更好地研究优化方案。固定小板宽度为  $3\text{ m}$ , 原反射面为  $40\text{ m}$  口径天线, 故分为 14 环, 在不改变环数

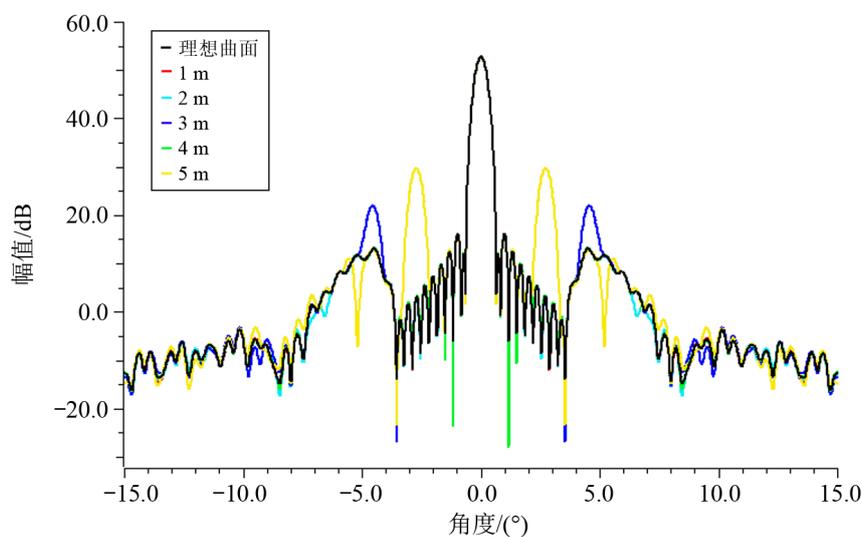


图 8 垂直方向上不同宽度方向图

的前提下，调整环与环之间的距离，以达到提高增益、降低旁瓣的目的。

由于存在多个环间距，即多个变量，且这些变量对型面精度并非线性影响，传统的寻优方法无法有效地找到最优解。粒子群算法通过结合全局寻优以及局部寻优寻找最优点，同时这一方法对变量没有过多的限制，适用度更广，因此我们采用该方法对面板分割方案进行改进，优化后其方向图如图 9 所示。

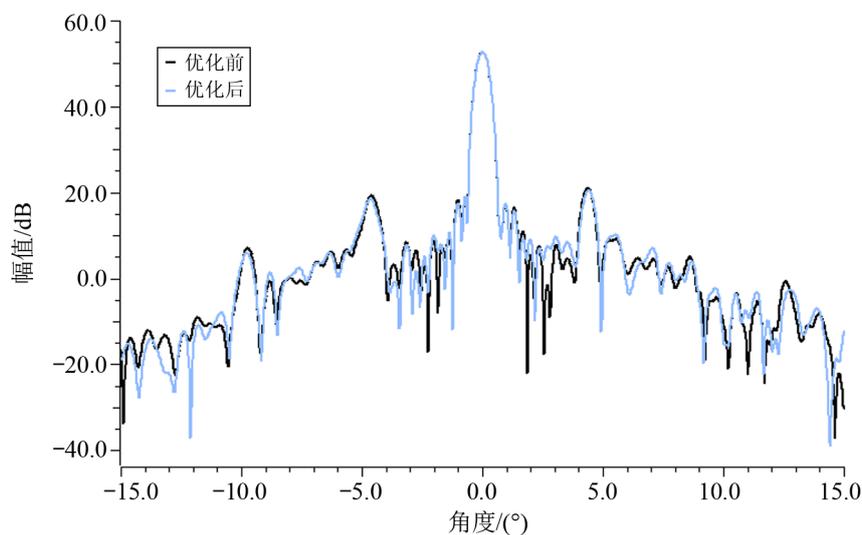


图 9  $3\text{ m} \times 3\text{ m}$  小板优化对比

实验结果表明，中心波束提高  $5 \times 10^{-4}$  dB，相对于下降的 0.0139 dB，补偿了 3.6% 的能

量, 同时在两侧鼓包处有较为明显的下降, 分别下降了 1.15 dB、0.77 dB、0.52 dB、1.02 dB 和 2.1 dB。距离中心波束越远, 旁瓣的修正越好。不同的观测目标对天线旁瓣的要求也不同<sup>[9]</sup>, 优化前第一“鼓包”幅值超过了第一旁瓣, 这有可能使我们观测到错误的目标; 优化后该“鼓包”下降, 低于第一旁瓣, 并比中心波束低超过 30 dB, 降低了观测中的误码率。

## 4 总结与展望

本文以 BINGO 项目的 40 m 偏馈天线为例, 对不同尺寸的小面板进行分析, 计算了不同尺寸下的天线的型面精度, 证明了天线的型面精度都与边长的平方成正比。然后, 对不同反射面在 GRASP 中进行仿真实验。可以看到随着小面板的增大, 出现了不同程度的高增益旁瓣。进一步研究发现, 水平方向的增益变化主要受小板环向长度变化影响, 当环向距离增大时, 产生的旁瓣逐渐向中心波束靠拢, 且增益逐渐增强, 环向距离达到 5 m 时, 产生的旁瓣比原来增高了 30 dB。同样的, 环间距固定时, 小板宽度的改变也仅影响垂直方向的能量分布, 但较环间距变化带来的影响, 其改变更少, 这也与原天线采用偏馈, 与馈源极化方向有关。

本文对大口径反射面天线的反射面设计进行了深度的分析, 总结了反射面分型设计对型面精度以及天线能量分布的影响。分析了平板代替曲面的影响, 环向与轴向的变化, 会使经反射面反射的电磁波产生干涉, 因而产生不同程度的旁瓣。最后利用全局算法对分割方案进行微调, 可以有效地降低旁瓣, 提高中心波束增益。

### 参考文献:

- [1] 周莉. 中国高新科技, 2022(16): 141
- [2] 李增科. 机械制造, 2014, 52(09): 48
- [3] 张佳骏. 中国天文学会 2020 年学术年会摘要集, 北京: 中国天文学, 2020: 34
- [4] 陈聪聪, 李团结, 唐雅琼. 机械工程学报, 2022, 58(07): 176
- [5] 王从思, 段宝岩, 仇原鹰. 西安电子科技大学学报, 2005, 32(06): 839
- [6] 苏小文, 李志静, 黄浩. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(07): 207
- [7] 章日荣. 无线电通信技术, 1983(10): 1
- [8] 杨倩. 硕士论文. 西安: 西安电子科技大学, 2010: 1
- [9] Peel M, Wuensche C A, Abdalla E, et al. Journal of Astronomical Instrumentation, 2019, 8(1): 14

## Optimized Design of Surface Antenna Plate Fitting Based on Particle Swarm Optimization

ZHANG Wenyang<sup>1,2</sup>, WU Yang<sup>1,2</sup>, LIU Shengwen<sup>1,2</sup>

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China; 2. Hebei Key Laboratory of Radio Astronomy Technology, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** After analyzing the fitting schemes of different planes, the relationship between the design of the planes and the accuracy of the surface is explored, and it can be verified that the accuracy of the reflective surface is proportional to the square of the circumferential and axial lengths of the planes. At the same time, the simulation software is used to simulate and verify different schemes, and the influence of the change of the size of the small panel on the antenna gain is explored, and it is proved that the spacing of the small panel ring is only horizontal has an effect on the energy distribution, while the width of the split in the same ring determines the energy distribution in the vertical direction. Finally, the particle swarm optimization algorithm is used to optimize and adjust the segmentation scheme of the small plate, which reduces the surface shape error, and the simulation experiment of the 3 m small plate scheme is carried out to verify the reliability of the method, which compensates for the 3.6% of the energy lost by the center beam caused by the change of the shape surface, and effectively reduces the newly generated side lobe power by 1.15 dB, 0.77 dB, 0.52 dB, 1.02 dB and 2.1 dB, respectively.

**Key words:** surface antenna; small plate fitting; profile accuracy; large size antenna; optimized model