

引用格式: 雷震, 赵亚博, 任毅行. 面向天线变形补偿的分区可动副反射面设计 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(2): 166-173.

LEI Z, ZHAO Y B, REN Y X. Design of partitioned active subreflector for antenna deformation compensation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(2): 166-173.

面向天线变形补偿的分区可动副反射面设计



雷震*, 赵亚博, 任毅行

(长安大学 工程机械学院, 西安 710000)

摘要: 机械外载对大口径反射面天线的结构造成变形, 进而影响天线的电性能。为了有效改善天线恶化的电性能, 解决副反射面位姿调整技术仅能补偿主面大尺度机械误差的问题, 提出了一种分区可动的副反射面补偿方案及其形状设计方法。首先, 通过刚性调整标准副反射面的位姿校正主面的大尺度低阶变形; 其次, 将调整后的副反射面分割为若干面板, 计算每个面板的位置参数并完成位姿调整, 以消除主反射面的残余表面误差, 而副反射面的面形由确定位置和姿态的面板组成, 完成面形设计。数值理论模型和仿真模型案例结果表明, 该方法能够快速实现副反射面的形状设计, 设计的分区可动的副反射面可以补偿因结构变形引起的主面误差, 有效提升天线的性能。

关键词: 双反射面天线; 机械误差; 耦合分析; 副反射面; 电磁计算

中图分类号: TN822 文献标志码: A DOI: 10.12178/1001-0548.2023321

Design of partitioned active subreflector for antenna deformation compensation

LEI Zhen*, ZHAO Yabo, and REN Yixing

(School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710000, China)

Abstract: The mechanical load deforms the structure of the large aperture reflector antenna, and then affects the electrical performance of the antenna. To address this issue, a partitioned active subreflector compensation scheme and its associated shape design method are proposed. It overcomes the limitations of the traditional subreflector position adjustment scheme, which can only correct large-scale shape errors of the main reflector. Firstly, the large-scale low order distortion of the main reflector is corrected by rigidly adjusting the position of the initial subreflector. Subsequently, the adjusted subreflector is divided into several panels, and the pose of each panel is adjusted by calculating the position parameters of each panel, so as to eliminate the residual surface error of the main reflector, and the shape of the subreflector is ultimately determined by the calculated panel positions and the adjusted panel poses. Numerical results demonstrate that this method can successfully achieve the shape design of the subreflector, and the new scheme can effectively correct the main reflector error, thus enhancing the electrical performance of the antenna.

Key words: dual reflector antenna; mechanical error; coupling analysis; subreflector; electromagnetic calculation

大口径反射面天线具有高增益、低副瓣和窄波束等特点, 被广泛应用于射电天文学和空间探索等领域^[1-2]。在实际工作环境中, 外部载荷如重力、风荷和热效应等造成天线的结构变形, 从而引起反射面误差, 导致天线的方向图发生畸变^[3-5]。为了减小结构变形对天线性能的影响, 通常在天线的设计阶

段采用保型设计^[6-8], 并在后续使用补偿技术消除天线存在的主反射面面形误差。

主动主面补偿、副面位姿补偿和副面面形调整补偿是反射面天线当前主要的机械补偿技术。目前, 国内外的大型反射面天线广泛采用主动主面补偿技术, 文献 [9] 研究了美国 GBT 天线的主面分

收稿日期: 2023-12-18

基金项目: 国家自然科学基金 (12203008); 陕西省自然科学基金面上项目 (2021JM-150)

作者简介: 雷震, 博士, 副教授, 主要从事天线结构方面的研究。

*通信作者 E-mail: 592267459@qq.com

块设计方案, 通过将调整信息传递至作动器, 驱动主面板进行调整。文献 [10] 简述了国内的天马望远镜在应用主动主面补偿技术后其主面误差从 $530\ \mu\text{m}$ 下降至 $300\ \mu\text{m}$, 精度明显改善。主动主面调整技术需要在主面安装大量高精度的作动器, 其能补偿任意形式的主面变形, 但代价大且对已建成的大口径天线实施较为困难。

对于副面位姿补偿方法, 文献 [11-12] 提出采用分段拟合方法描述赋形天线的主反射面, 计算出副面的调整参数并进行调整, 已分别在 $65\ \text{m}$ 和 $35\ \text{m}$ 赋形天线上完成了仿真分析。文献 [13] 对重力变形下的主面进行曲面拟合, 利用几何匹配关系得到副反射面位置。文献 [14] 研究了基于参数迭代技术的副面位置优化方法, 利用一种高效的数值迭代算法快速计算出副面位置的最优参数。副面位姿补偿方法的代价较小, 但副面的刚性移动仅能补偿主面的大尺度变形, 对于复杂的高阶形变无法有效应对。

为了克服上述补偿方法存在的缺点, 研究人员探索了副面面形调整技术。文献 [15] 通过安装在副反射面背面的 4 个作动器动态改变反射器形面, 补偿 HARO140 英尺天线因重力变形引起的性能下降。但该方案反射面可调自由度低, 形面变化有限, 且面形设计方法不系统, 将其移植到其他案例时存在困难。文献 [16] 使用 31 个促动器驱动 48 块面板组成的副反射面进行补偿工作, 使得反射面误差降低。该方法实际上部分实现了副面位姿调整的功能, 且过多的面片使得方案实施困难。关于补偿面的形状设计方面, 当前常采用几何光学法/物理光学法进行电磁分析并通过形状优化来获得修正的副面面形^[17-18], 但物理光学法需要对表面感应电流进行积分^[19], 计算量大, 效率较低。

针对上述补偿技术方法的不足, 本文提出一种分区可动副反射面设计方案及形状设计方法。该方法首先通过调整副反射面的位姿来补偿主面的大尺度变形, 然后将副反射面分割为多个面板, 通过控制单个面板的刚性移动来消除主面补偿后的残余误差, 副反射面的面形由确定位置和姿态的面板组成。通过案例进行验证, 证明本文方法的有效性。该方法能够快速给出分区可动副反射面, 有效补偿主面变形, 为天线变形补偿提供一种新方法。

1 分区可动副反射面设计模型

1.1 补偿与技术方案

补偿方法分区可动副反射面的实现主要分为

2 个步骤, 其技术流程与步骤如图 1 所示。

步骤 1), 刚性移动副反射面以校正天线发生的大尺度变形。通过求解变形主面的最佳吻合参数确定新的焦点位置, 并调整副反射面使其实际焦点位于上述新焦点位置, 从而校正主面的大尺度变形, 此时的剩余误差仅为表面的残余误差。

步骤 2), 对副反射面进行区域分割并分别调整其空间位置以消除残余误差。分区域式副反射面的形状由多块刚性面板组成, 面板为标准双曲面的一部分且对应于主反射面的变形区域。对主面的变形区域进行二次拟合计算吻合参数, 基于天线光学关系即可确定对应副面板的调整参数, 通过面板的移动消除主反射面的残余表面误差。

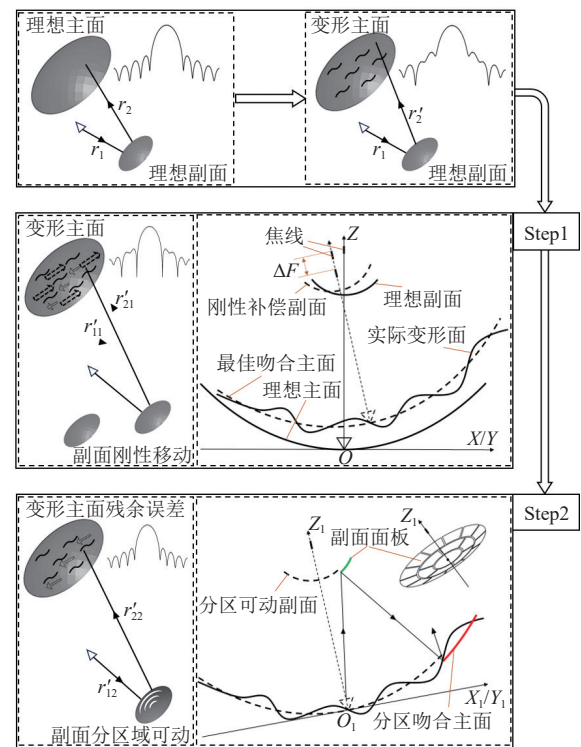


图 1 分区域副面补偿流程图

本文提出的分区可动副面补偿技术可调自由度多, 且在制造副反射面的面板时, 刚性面板仍为标准反射面形状的一部分, 加工容易。在实现中, 只需调节副面板的 4 个角点便可实现位姿变换。在设计方面, 本文仅基于几何光路关系, 即可快速得到副面的形状。

1.2 分区域副面板的定义方法

反射面天线的副反射面为标准双曲面, 其轴向投影图如图 2 所示, 副面的表面面形通过全部的面板位置进行描述, 为了使各面板适应主面的变形, 可以定义区域边界的参数控制其大小和位置。

分区后副面板的位置 S_i 由极坐标系 (ρ, θ) 定位, 表示为:

$$S_i \rightarrow Z(\Omega_i < \rho, \theta >) \quad (1)$$

$$\Omega_i : [\rho_i, \rho_j] \times [\theta_i, \theta_j] \quad \rho \in (0, R), \theta \in (0, 360^\circ) \quad (2)$$

式中, Ω_i 为副面板的区域; ρ 为面板径向的距离; θ 为面板周向边界的角度值。

根据双反射面天线的几何关系, 可求解出副面板对应的主面区域。如图 3 所示, 主面变形区域 H_i 与副面板 S_i 匹配, 对应角点分别为 S_{iA} 和 H_{iB} , 电磁波在两者之间的传播路径为 $O_2 S_{iA} H_{iB} C$ 。

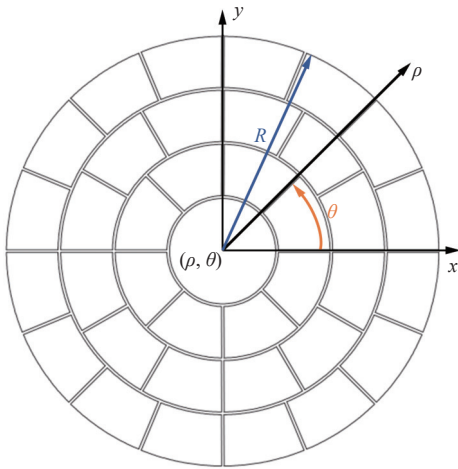


图 2 副面分区域模型图

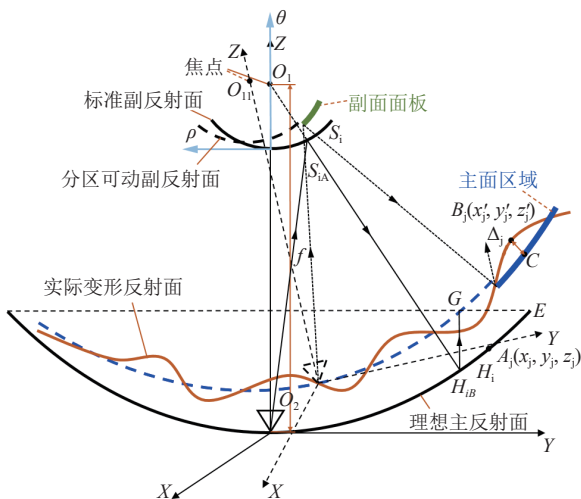


图 3 分区可动副面板补偿关系图

根据天线的几何性质, 馈源射出的光线等效为从实焦点 O_1 射出的光线 $O_1 S_{iA} H_{iB}$, 因此主面区域角点 H_{iB} 坐标可以通过下式求解:

$$\begin{cases} H_{iB} = S_{iA}^2 / 4f \\ S_{iA} \rightarrow Z(\Omega_i < \rho_A, \theta_A >) \end{cases} \quad (3)$$

式中, f 为主反射面的焦距; ρ_A 和 θ_A 分别为副面板 S_i 上点 A 的参数值。

主面对应区域的位置由已知的 4 个角点定义, 从副面板的位置坐标, 即可计算出主面对应区域的位置。

1.3 分区域拟合算法

为保证天线几何光路关系, 分区域副反射面板的调整参数与主面对应变形区域的吻合参数需一致。变形主反射面区域内的节点引起的光程差为:

$$\delta_r = 2\alpha_r \xi_r \quad (4)$$

式中, $\delta_r = \hat{n}_r \cos \theta_r$, \hat{n}_r 为采集点的单位法向量组成的矩阵, θ_r 是电磁波入射线与反射线的夹角, $\xi_r = [\mathbf{d}x_r \ \mathbf{d}y_r \ \mathbf{d}z_r]$ 。

采用最佳吻合抛物面的一部分对变形主面区域进行吻合, 方程为:

$$z = \frac{x^2 + y^2 - 2x(u + 2f\phi_x) - 2y(v + 2f\phi_y) + 4fw}{2[2(f + \Delta f) + x\phi_x - y\phi_y]} \quad (5)$$

式中, u 、 v 和 w 为抛物面的顶点对原坐标系的位移; ϕ_x 和 ϕ_y 为焦轴绕原坐标轴 x 和 y 的转角; Δf 为焦距的变化量。

吻合后的光程差可以表示为:

$$\delta_f = \delta_r + \mathbf{A}_m \mathbf{H} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{H} = [u \ v \ w \ \Delta f \ \phi_x \ \phi_y]^T$ 为待求未知参数矩阵。 \mathbf{A}_m 为系数矩阵, 将天线的形面误差转换为天线表面的光程差。

如图 2 所示, 标准主面区域上某点为 $A_j(x_j, y_j, z_j)$, 对应变形点为 $B_j(x'_j, y'_j, z'_j)$, 从该点作最佳吻合面的法线过点 C , 则其法向偏差 Δ_j 用 6 个参数可描述为:

$$\Delta_j = \frac{1}{2\sqrt{f(f+z_j)}} (x_j(u_j - u) + y_j(v_j - v) - 2f(w_j - w) - 2\Delta f z + y\phi_x(z+2f) - x\phi_y(z+2f)) \quad (7)$$

令法向偏差 Δ 的均方根 (root mean square, RMS) 最小, 即可得到最佳拟合抛物面的位置参数, 即:

$$\min \rightarrow T_m = \sum_{j=1}^m \Delta_j^2 \quad (8)$$

采用无因次量^[20] 则逐点光程差可描述为:

$$T_m = f(\mathbf{d} - \mathbf{C}\mathbf{H}) \quad (9)$$

该问题为最小二乘问题:

$$\min \rightarrow T_m = \|d - CH\|_2 \quad (10)$$

式中, C 和 d 矩阵表示为:

$$C = [C_1 \ C_2 \ C_3]_{m,6} \quad (11)$$

$$d = [\sqrt{Q^1}B^1, \sqrt{Q^2}B^2 \ \dots \ , \sqrt{Q^m}B^m]^T \quad (12)$$

其中, C 系数矩阵中的子矩阵与 6 个参数相关, 分别为:

$$C_1 = \begin{bmatrix} \sqrt{Q^1}X^1 & \sqrt{Q^1}Y^1 & 2\sqrt{Q^1} \\ L & L & L \\ \sqrt{Q^m}X^m & \sqrt{Q^m}Y^m & 2\sqrt{Q^m} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 2\sqrt{Q^1}Z^1 \\ L \\ 2\sqrt{Q^m}Z^m \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} -\sqrt{Q^1}Y^1(Z^1+2) & \sqrt{Q^2}X^1(Z^1+2) \\ L & L \\ -\sqrt{Q^m}Y^m(Z^m+2) & \sqrt{Q^m}X^m(Z^m+2) \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, $Q = 1/4(1+Z)$, $B = XU_j + YV_j - 2W_j$ 。

令 $b = C^T d$, $B = C^T C$, 则待求未知参数可得:

$$H = B^{-1}b \quad (16)$$

分区可动副反射面的面板通过矩阵 H 进行调整, 以完成表面形状设计, 补偿后的剩余表面 rms 为:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum (d - CH)^2}{m}} \quad (17)$$

式中, m 为主面区域的节点数量。

副反射面的刚性位移参数也通过该算法进行求解; 若式 (16) 中采用主反射面的全部节点, 则可得拟合抛物面顶点的 6 个参数, 并得新焦点的空间坐标, 使副面焦点与之匹配。此时最佳吻合参数为:

$$H_{\text{main}} = B_{\text{main}}^{-1}b_{\text{main}} \quad (18)$$

式中, n 为主反射面的节点数量。

吻合后的 RMS 可以通过下式计算:

$$\sigma_{\text{main}} = \sqrt{\frac{\sum (d_{\text{main}} - C_{\text{main}}H_{\text{main}})^2}{n}} \quad (19)$$

2 案例验证

本节首先用一个具有假定位移的理想天线模型来验证方法的有效性, 随后以一个发生了重力变形的大口径天线作为工程案例, 通过辐射电性能的仿

真给出了补偿前后的结果, 并与副面位姿补偿方案的效果进行了对比。

2.1 理论计算与方法验证

理想天线模型为标准卡塞格伦式反射面天线, 主面口径 $D = 100\text{ m}$ 、焦径比为 0.33, 副面口径 $d = 10\text{ m}$, 馈源对副面的照射角为 11.21° 。将主反射面沿径向划分 4 个半径相等的环形域, 通过修改每个区域的焦距和 Z 轴整体移动量来产生对应的假设变形, 各区变形后的形状即为:

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4(f + \Delta f_i)} + w_i \quad (20)$$

式中, w_i 和 Δf_i 分别为每个环形域 Z 向位移量和焦距变化量。

分区域式副反射面由 4 个环形面板组成, 副面板与主面变形区域相对应, 面板参数与变形场加载数据如表 1 所示。

表 1 数值天线模型模拟变形工况

区域 序号	主面变形区域外半径 (R_i)/m	对应副面板半径 (r_i)/m	变形场参数	
			w_i/mm	$\Delta f_i/\text{mm}$
1	12.50	1.16	-30.0	21.3
2	25.00	2.36	-32.3	25.6
3	37.50	3.62	-34.6	27.5
4	50.00	5.00	-35.8	29.5

表 2 给出了采用副面位姿补偿方法得到的副反射面的位置参数和补偿后的型面精度, 其 RMS 值为 1.645 mm。表 2 中也给出了本文方法得到的各区域的位置参数及补偿后的精度, 其 RMS 值为 1.025 mm, 精度提升明显。图 4 分别展示了天线在变形后和使用 2 种方法补偿后的光程差分布图, 变形反射面的光程差分布沿径向呈环状, 由内至外逐渐增大 (图 4a); 使用副面位姿补偿方法后的反射面光程差得到有效改善 (图 4b); 分区可动副反射面进一步降低了反射面光程差, 极值区域占比也降低 (图 4c)。

表 2 数值天线模型的副面位置调整参数与表面精度

参数	位姿调整		副面板调整		
	副面	1	2	3	4
u & v/mm	0	0	0	0	0
w/mm	-30.618	0.888	-0.329	-0.763	0.264
$\Delta f/\text{mm}$	41.799	0	0	0	0
ϕ_x & $\phi_y/(\text{ }^\circ)$	0	0	0	0	0
RMS/mm	1.645			1.025	

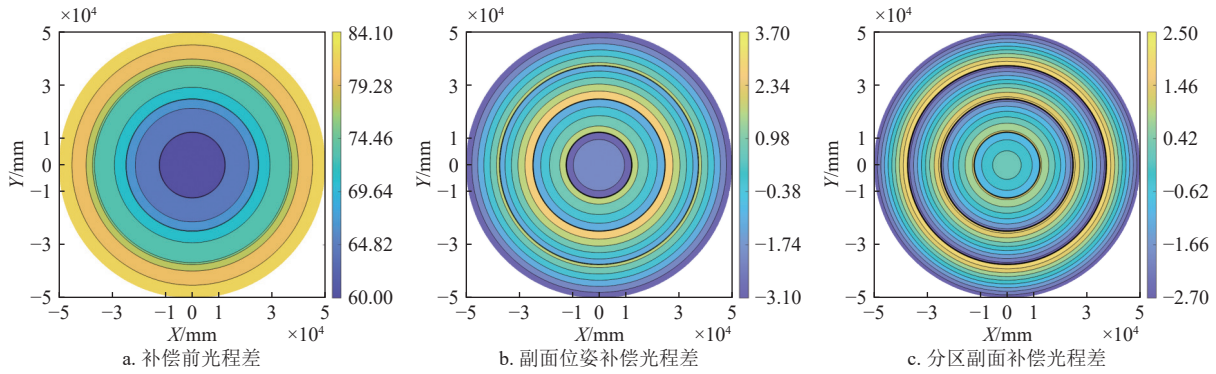


图 4 数值模型天线光程差分布云图

为验证本文方法对天线电性能的最终改善效果,采用商业反射面天线分析软件 GRASP 计算补偿前后天线辐射方向图,选择物理光学(PO)算法^[21],采用高斯馈源照射口径面,工作频率设定为 3 GHz。图 5 展示了天线的辐射方向图,表 3 为详细的电性能数据。

电磁计算结果表明:天线的辐射方向图在引入变形后显著恶化,采用副面位姿补偿方法较好恢复了主瓣的增益,降低了左、右第一副瓣的电平;而使用本文补偿方法后得到的方向图则基本与理想天线方向图重合,增益/副瓣电指标也更接近于未变形天线。说明了本方法的有效性,以及相较于副面位姿补偿法更优的补偿效果。

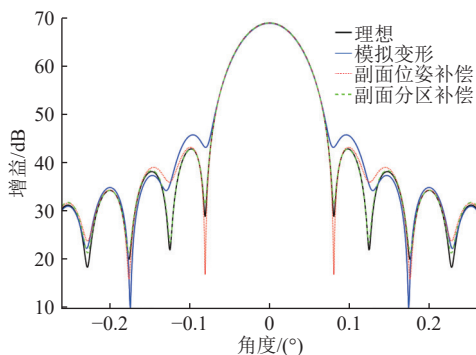


图 5 天线辐射方向图

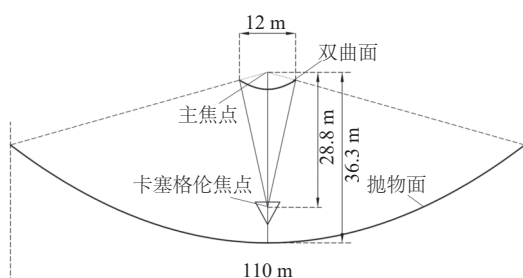


图 6 110 m 卡氏天线主副面几何关系图

表 3 电性能参数计算结果对比

工况	理想 天线	模拟 变形	位姿 补偿	分区 补偿
增益/dB	68.905	68.828	68.860	68.878
第1副瓣(左)/dB	42.867	45.776	43.190	42.796
第1副瓣(右)/dB	42.867	45.776	43.190	42.796

2.2 工程案例

工程案例为对 110 m 口径的大型卡塞格伦天线重力变形进行补偿,该模型为 QTT 天线的中间版本,使用有限元分析获得其重力变形,然后分别使用 2 种补偿方法对变形进行补偿,并分析效果。天线的几何参数如图 6 所示,工作姿态设定为仰天,工作波长设定为 0.1 m,采用喇叭馈源。

图 7 为该天线的有限元模型,其主体为伞形支撑桁架结构,包括天线背架、俯仰结构和副反射面支撑腿,共有 24 种截面梁,均采用 BEAM188 梁单元进行建模,将面板自重等效为质量单元附加到背架的上弦节点上,整体施加重力加速度进行静载分析模拟天线仰天重力变形。

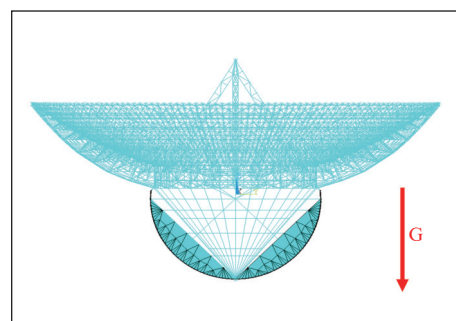


图 7 110 m 口径天线有限元模型

2.3 仿真试验验证与对比分析

图 8 为天线主面在 3 个方向上的变形场分布图,天线背架的上弦节点在不同程度上发生了空间

位移, 其中 Z 方向的变形是在仰天姿态下天线主要的变形模式。

图 9a 为反射面的光程差云图, 其分布具有一定的圆周对称性: 近中心区域呈现哑铃状, 变形随半径增大而增加, 极大值出现在反射面边缘。形成该分布的原因为: 仰天姿态下天线的俯仰机构存

在 2 个支撑点, 该点附近天线变形较小。而伞状支撑的背架刚度分布均匀, 导致变形沿着径向均匀增大。根据该特点, 采用图 9b 所示的副面分区方式, 将副面沿径向划分为 4 个环形面板, 同时将第 2 个环形面板进一步均分为 4 个扇形单元, 使其与主面光程差分布模式相匹配。

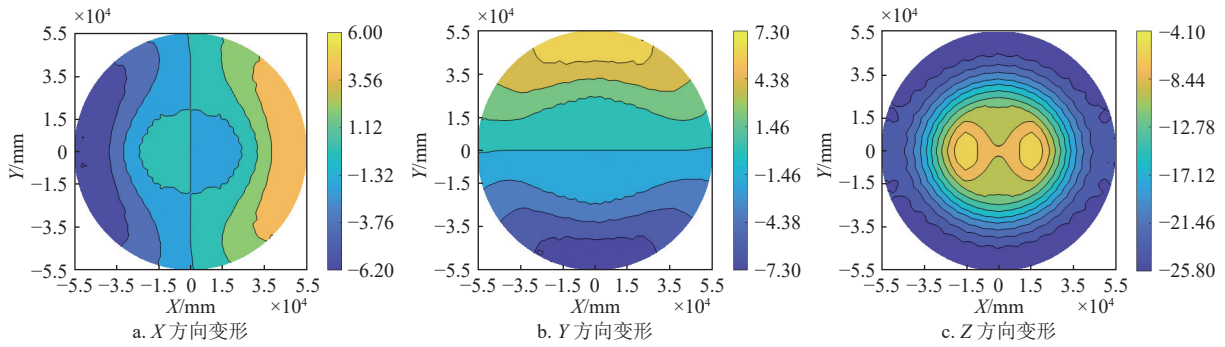


图 8 天线仰天自重变形场分布图

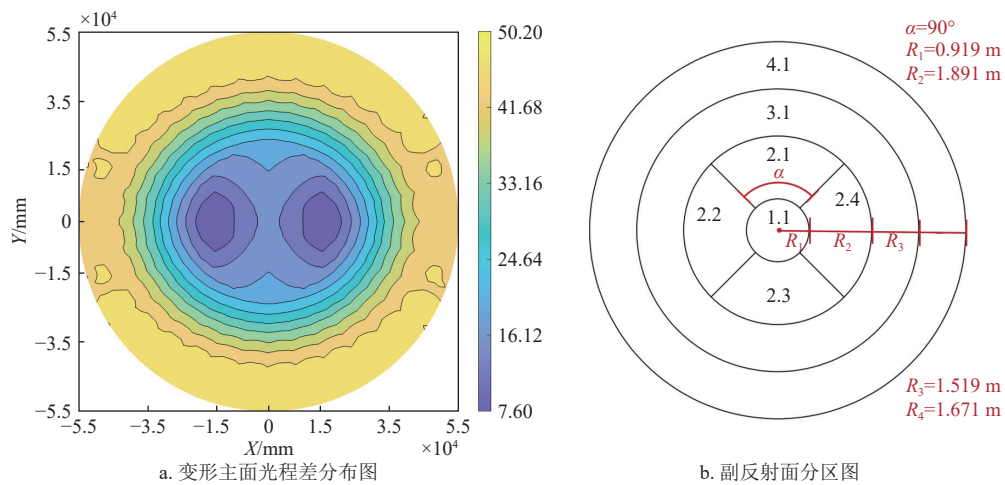


图 9 主面光程差分布与副面分区方法

表 4 给出了分区可动副反射面板的位置调整参数和 RMS。图 10 为使用 2 种补偿方法进行补偿后的主面光程差的对比图, 可见: 使用分区可动副反射面方法进行补偿后, 光程差变小且分布更加均匀, RMS 值为 1.455 mm, 明显小于副面位姿补偿方法补偿后的 RMS (2.033 mm)。图 10c 为 2 种方法得到的光程差在 $(-3, 3)$ mm 范围内的概率统计图, 其分别为 72.12% 和 55.71%。以上数据说明了分区可动副反射面方法可以更有效地减小光程差。

图 11 为原始天线及各种情况下天线的辐射方向图, 表 5 为计算的电性能参数。可见: 天线在引入自重变形后, 辐射方向图明显恶化, 增益下降,

副瓣抬高。副面位姿补偿方法实施后, 其增益恢复明显, 但副瓣仍有较大程度抬高。而本文方法实施后, 方向图左右第 1、2 副瓣的电平明显降低, 更贴近未变形天线的方向图。在增益数据上 (见表 5), 本方法得到的值也优于副面位姿方法, 天线的电性能获得了更好的恢复。

表 4 天线副面调整参数与表面精度

参数	面板调整参数							
	副面	1.1	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2
u & v /mm	0	0	0	0	0	0	0	0
w /mm	-6.686	-0.919	-0.075	2.871	-0.075	2.903	-1.637	0.310
Δf /mm	49.442	0	0	0	0	0	0	0
ϕ_x & $\phi_y / (^\circ)$	0	0	0	0	0	0	0	0
rms/mm	2.033	1.455						

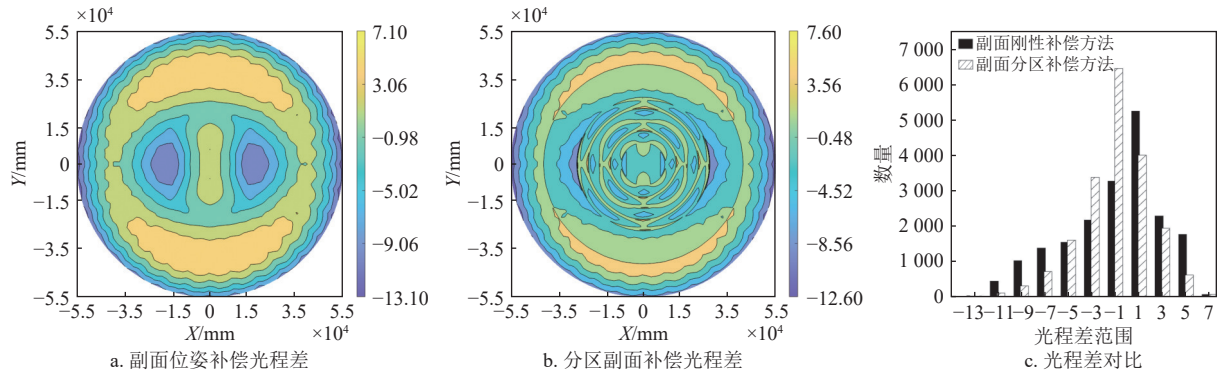


图 10 两种补偿方法光程差分布图

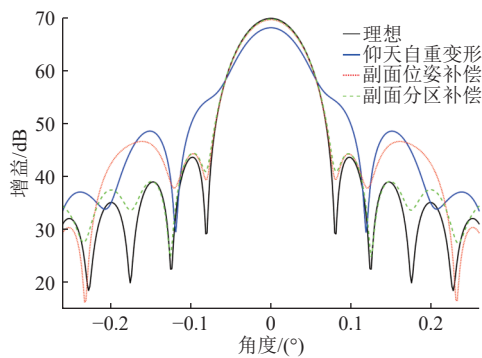


图 11 可变形副面补偿方法辐射方向图对比

表 5 仰天姿态下天线的电性能对比

工况	理想 工况	仰天 自重	位姿 补偿	分区 补偿
增益/dB	69.744	67.981	69.489	69.608
第1副瓣(左)/dB	43.610	48.525	44.256	44.366
第1副瓣(右)/dB	43.610	48.520	44.256	44.366

3 结束语

本文提出了一种面向大口径反射面天线变形补偿的分区可动副反射面补偿方案和面形设计方法。通过具有假设位移小口径天线和大口径天线重力变形补偿的案例,证明了本文提出的方案对变形天线电性能的修复有较好效果,优于副反射面刚性移动方案,为大口径天线机械误差补偿提供了一种新方案。

参考文献

[1] 严粤飞,王从思,李帅,等.大型射电望远镜天线发展动态及机电耦合应用[J].中国科学:物理学力学天文学,2022,52(12):5-22.
YAN Y F, WANG C S, LI S, et al. Development of large-aperture radio telescopes and applications of coupled struc-

tural-electromagnetic theory[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2022, 52(12): 5-22.

[2] 杜彪,伍洋,张一凡,等.大口径反射面天线技术综述[J].无线电通信技术,2016,42(1):1-8
DU B, WU Y, ZHANG Y F, et al. Overview of large reflector antenna technology[J]. Radio Communications Technology, 2016, 42(1): 1-8.

[3] 雷震,宁亮,陈浩祥,等.大型射电望远镜日照热误差及其补偿的仿真研究[J].工程科学与技术,2024,56(1):245-255.
LEI Z, NING L, CHEN H X, et al. Numerical study on solar thermal error and its compensation of large radio telescope[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(1): 245-255.

[4] LIU Y, QIAN H L, FAN F. Reflector wind load characteristics of the large all-movable antenna and its effect on reflector surface precision[J]. Advanced Steel Construction: An International Journal, 2016, 12(4): 380-409.

[5] FU L B, LIU J J, YAN W, et al. Gravitational deformation measurement method for the main reflector and sub-reflector of the 70 m antenna by laser scanner[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22(9): 3-11.

[6] 李博,张正栋,赖宝.大口径高精度波束波导天线保型设计方法研究[J].机电工程技术,2023,52(8):59-63.
LI B, ZHANG Z D, LAI B. Research on flexible design method of large aperture and high precision beam waveguide antenna[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(8): 59-63.

[7] 张明珠,王海仁,左营喜,等.射电望远镜结构技术发展综述[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(1):48-58.
ZHANG M Z, WANG H R, ZUO Y X, et al. Review of the technical development of the structures of radio telescopes[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(1): 48-58.

[8] 张萍.大口径射电望远镜结构的保型设计[J].电子机械工程,2014,30(6):43-46.
ZHANG P. Structural homology design of large diameter radio telescope[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2014, 30(6): 43-46.

[9] HUNTER T R, SCHWAB F R, WHITE S D, et al. Holographic measurement and improvement of the green

- bank telescope surface[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2011, 123(907): 1087-1099.
- [10] 王从思,肖岚,项斌斌,等.大型射电望远镜天线主动面补偿研究进展[J].*中国科学:物理学 力学 天文学*, 2017, 47(5): 19-34.
WANG C S, XIAO L, XIANG B B, et al. Development of active surface technology of large radio telescope antennas[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2017, 47(5): 19-34.
- [11] 李辉.基于副面的赋形双反射面天线结构变形实时补偿方法[D].西安:西安电子科技大学, 2014.
LI H. Real-time compensation method for structural deformation of shaped double reflector antenna based on secondary surface[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [12] 李江江.基于副反射面的大型反射面天线结构变形实时补偿方法[D].西安:西安电子科技大学, 2013.
LI J J. Real-time compensation method for structural deformation of large reflector antenna based on secondary reflector[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [13] WANG W, WANG C S, DUAN B Y, et al. Compensation for gravity deformation via subreflector motion of 65 m shaped Cassegrain antenna[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2014, 8(3): 158-164.
- [14] XIANG B B, WANG C S, LIAN P Y, et al. Optimal subreflector position determination of shaped dual-reflector antennas based on the parameters iteration approach[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(4): 62.
- [15] VON H S, WONG W Y. Improved efficiency with a mechanically deformable subreflector[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1979, 27(5): 720-723.
- [16] LAWSON P R, YEN J L. A piecewise deformable subreflector for compensation of Cassegrain main reflector errors[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1988, 36(10): 1343-1350.
- [17] BAN Y, WANG C S, FENG S F, et al. B-spline surface fitting and simplified GO/PO analysis of subreflector correction for large Cassegrain antenna distortion compensation[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2018, 18(7): 79.
- [18] GONZALEZ-VALDES B, MARTINEZ-LORENZO J A, RAPPAPORT C, et al. A new physical optics based approach to subreflector shaping for reflector antenna distortion compensation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(1): 467-472.
- [19] HOFERER R A, RAHMAT-SAMII Y. Subreflector shaping for antenna distortion compensation: An efficient Fourier-Jacobi expansion with GO/PO analysis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, 50(12): 1676-1687.
- [20] 叶尚辉,李在贵.天线结构设计[M].西安:西北电讯工程学院出版社, 1986.
YE S H, LI Z G, et al. Antenna structure design[M]. Xi'an: Northwest Institute of Telecommunications Engineering Press, 1986.
- [21] 陈云.高性能反射面天线分析与设计[D].西安:西安电子科技大学, 2017.
CHEN Y. Analysis and design of high performance reflector antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.

编辑 张莉