

德令哈 13.7 m 望远镜重力变形研究*

左营喜^{1†} 李 阳¹ 孙继先¹ 杨 戟¹ 李晶晶¹
徐 烨¹ 何登云¹ 范钦红² 范生宏²

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 郑州辰维科技有限公司 郑州 450001)

摘要 借助于数字摄影测量结果调整天线面板, 使德令哈 13.7 m 望远镜在仰角 52° 时获得最佳反射面面形, 从而使天线效率在观测仰角范围内得到整体优化. 与之前基于经纬仪测量的面板调整结果相比, 天线口径效率提高约 1 倍. 依据不同俯仰姿态下的测量结果, 得到了天线的重力变形模型, 包括副面偏移和倾斜、主面焦距和面形偏差随仰角变化的规律. 根据不同仰角的面形偏差测量数据反演反射面重力变形模型时, 采用了数据拟合方法, 这样可以减小测量误差对模型精度的影响.

关键词 望远镜, 仪器, 其它诸多方面

中图分类号: P 111; **文献标识码:** A

1 引言

德令哈 13.7 m 毫米波望远镜, 是我国在 3 mm 波段的主要天文观测设备, 也是国内口径最大的毫米波望远镜. 该望远镜采用卡塞格林式天线结构, 主反射面 (以下简称主面) 由 72 块制造精度为 0.025 mm 的铝制面板组成, 标称焦距 5.080 m, 副反射面 (以下简称副面) 则是口径为 1.085 m 的单块双曲面. 望远镜在直径 20.7 m、全封闭的天线罩内工作.

望远镜天线在运行过程中, 随俯仰姿态的变化将经受重力变形, 使反射面精度恶化, 从而使天线效率下降. 重力变形表现在两个方面, 一是主面面形随仰角变化, 二是由于副面支撑杆的重力变形, 使副面与主面的对准关系随仰角变化. 后者可以通过实时调整副面的位置和姿态进行补偿; 而前者在没有主动面板控制的情况下是无法补偿的.

为了使得望远镜在整个观测仰角范围内有相对最佳的天线效率, 调整主面时, 应使其在正常观测仰角的中间值或统计重心值最接近理想面形. 但过去我们一直采用经纬仪-带尺法测量天线并进行面板调整, 该方法一般只在天线指向天顶位置时使用, 而很难在其它仰角位置进行测量. 2009 年 7 月 1 ~ 26 日之间, 我们应用数字摄影测量法, 成功地对德令哈 13.7 m 望远镜面形进行测量^[1], 首次实现了该望远镜在不同仰角位置的反射

2010-05-11 收到原稿, 2010-05-17 收到修改稿

* 国家自然科学基金 (10878023) 资助

† yxzuo@pmo.ac.cn

面测量, 并调整面板使得仰角 $E=52^\circ$ 时面形最佳. 据我们所知, 这也是国际上首次实现对工作在全封闭天线罩内的大中型天线进行摄影测量.

文献 [1] 对此次摄影测量的测量方法、测量过程、数据处理以及主面调整测量结果等作了报道. 本文将着重介绍此次测量期间对天线重力变形的测量和分析结果, 包括主面随仰角的变化和重力变形模型以及副面姿态随仰角的变化规律.

2 重力变形测量

用数字摄影方法测量天线面形, 首要的准备工作是在主面上粘贴许多圆形回光反射靶标和一些编码靶标. 另外, 为了测量副面相对于主面的位置和姿态, 我们在副面的边缘裙部粘贴了一圈反光靶标, 这些靶标分布在一个垂直于副面轴线的圆环上. 1 次测量需要拍摄近 200 幅照片, 然后通过专用软件解算得到每个靶标中心点的三维坐标. 根据这些靶标的三维坐标, 可以拟合得到主面的最佳吻合抛物面, 包括抛物面的顶点坐标、焦距、焦点坐标以及各靶标点与最佳吻合抛物面的法向偏差或半光程差, 并可由顶点和焦点坐标确定抛物面轴线; 同时可以拟合得到副面裙部圆环的中心坐标及过中心的法线, 进而算出副面的偏移和倾角.

重力变形测量进行了两次, 第 1 次测量在 7 月 18 ~ 22 日之间, 利用夜间温度相对稳定时段, 分别在 30° 、 40° 、 52° 、 60° 、 70° 、 80° 和 90° 7 个仰角位置进行了测量. 第 1 次测量结束后, 又根据 $E=52^\circ$ 时的测量结果对主面一些偏差较大的位置进行了调整, 此后分别在 40° 、 52° 、 70° 和 90° 4 个仰角位置进行了第 2 次测量. 第 2 次测量时, 副面位置和姿态已经根据第 1 次测量得到的规律在不同仰角做了相应调节. 由于第 1 次测量天线姿态位置较多, 因此副面姿态、主面焦距随仰角的变化用第 1 次测量结果说明; 而为了反映最终面形调整精度, 主面重力变形则用第 2 次测量结果.

2.1 主面面形测量结果

最终调整后, 主面在不同仰角位置的面形偏差分布如图 1 所示, 图中面形偏差采用半光程差. 在 $E=52^\circ$ 时面形偏差的均方根 (RMS) 最小 (0.08 mm), 仰角偏离 52° 越多, 面形偏差越大. 此次摄影测量中单点的定位测量精度约为 0.03 mm. 测量和数据处理时坐标系定义为: z 轴表示主面对称轴并指向副面方向, x 轴与天线俯仰轴平行, y 轴垂直于 z 轴和 x 轴并指向天线仰角减小方向, 采用右手坐标系.

2.2 副面姿态及主面焦距变化测量结果

表 1 表示副面相对于最佳吻合抛物面的位移和倾角以及主抛物面的焦距随天线仰角的变化. Δx 和 α_x 、 Δy 和 α_y 分别为副面偏移和倾角的 x 分量、 y 分量, f 为主面焦距. 从表 1 可以看出, 随着天线仰角的减小, 由于副面支撑杆的重力弯沉, 副面不断地向 y 轴正向偏移, 同时还呈现顶点向下“点头”、尾部上翘的倾斜趋势. 主面焦距 f 也表现出随着仰角增大而增大的规律. Δx 和 α_x 随仰角变化没有明显的规律.

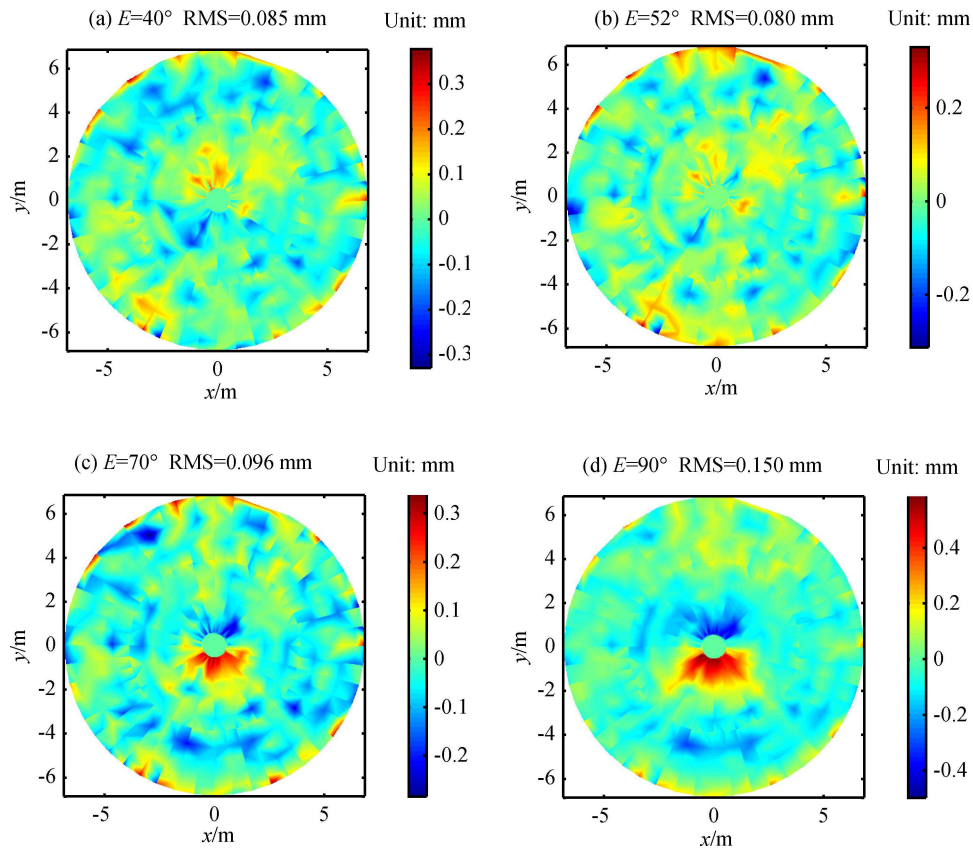


图 1 测量得到的主面面形偏差

Fig. 1 Measured surface deviations of main dish

表 1 副面位移、倾角和主面焦距随仰角的变化

Table 1 Variations of sub-reflector displacement, tilt angle and main-dish focal length with elevation angle

$E(^{\circ})$	$\Delta x(\text{mm})$	$\Delta y(\text{mm})$	$\alpha_x(^{\circ})$	$\alpha_y(^{\circ})$	$f(\text{mm})$
30	0.08	6.96	0.078	-0.267	5079.05
40	0	4.68	0.083	-0.205	5080.13
52	-0.61	1.48	0.092	-0.169	5080.24
60	-0.03	0.43	0.088	-0.177	5080.63
70	-0.02	-1.94	0.078	-0.093	5080.76
80	0.14	-4.52	0.064	-0.105	5080.52
90	-0.57	-7.31	0.090	0.001	5080.84

3 重力变形分析

3.1 主面重力变形模型

天线的重力变形属于线性弹性变形, 俯仰结构中任一测量节点在仰角 E 时的重力变形可以由 (1) 式得到^[2-3]:

$$\delta = \delta_u \sin E + \delta_s \cos E, \quad (1)$$

式中 δ_u 和 δ_s 分别是天线指向天顶和指向水平时的重力变形, 它们是计算机结构分析时在特定方向“加载”重力得到的, 现实中无法直接测量. 根据 3 个不同仰角位置主面面形的测量结果, 可直接计算出 δ_u 和 δ_s , 进而预测任意仰角的面形偏差分布^[3]. 由于面形测量时会引入测量误差, 采用文献 [3] 的方法直接计算 δ_u 和 δ_s 存在较大误差, 因而本文采用拟合方法反演 δ_u 和 δ_s . 以仰角 E_0 时主面面形为参考, 任意仰角 E 时的面形偏差预测值为

$$\delta'(E) = \delta'(E_0) + \delta_u(\sin E - \sin E_0) + \delta_s(\cos E - \cos E_0), \quad (2)$$

式中 $\delta'(E_0)$ 为仰角 E_0 时的面形偏差预测值. 测量值与预测结果之差的平方和 Δ 为

$$\begin{aligned} \Delta &= \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[\delta_i(E_j) - \delta'_i(E_j) \right]^2 \\ &= \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[\delta_i(E_j) - \delta'_i(E_0) - \delta_{ui}(\sin E_j - \sin E_0) - \delta_{si}(\cos E_j - \cos E_0) \right]^2, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 n 为测量反光靶标点个数, m 为测量仰角位置数. 数据处理过程如下: (1) 根据面形测量结果确定对应于测量仰角 E_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 时的最佳吻合抛物面, 得到各测量仰角时反射面各测量点处的半光程面形偏差 $\delta_i(E_j)$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 即面形偏差测量值.

(2) 设定各测量点待拟合参数 δ_{ui} 、 δ_{si} 和 $\delta'_i(E_0)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 的初值, 并由 (2) 式计算仰角 E_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 时的面形偏差预测值 $\delta'_i(E_j)$ ($i = 1, 2, \dots, n$). δ_{ui} 和 δ_{si} 初值可设为零, $\delta'_i(E_0)$ 初值可设为该仰角时的测量值 $\delta_i(E_0)$. (3) 由 (3) 式计算 Δ . (4) 重复步骤 (2)~(3) 进行迭代计算, 使 Δ 最小, 即可得到 δ_u 、 δ_s 和 $\delta'(E_0)$ 的分布, 且可进一步预测任意仰角的面形偏差分布.

采用前述仰角 40° 、 52° 、 70° 和 90° 时的面形测量结果, 以 52° 面形为参考, 拟合得到 δ_u 和 δ_s 的分布如图 2, 据此预测面形偏差的 RMS 随仰角变化的规律如图 3 所示.

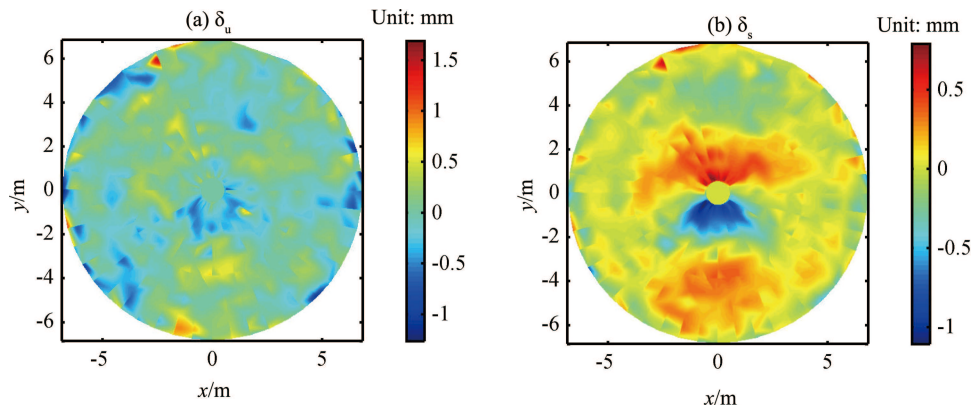


图 2 拟合得到的 δ_u (a) 和 δ_s (b) 分布

Fig. 2 Distributions of the face-up (a) and face-side (b) gravity deformations obtained by fittings

用拟合方法计算 δ_u 和 δ_s , 上述 4 个仰角测量面形偏差与相应仰角预测面形偏差之差的 RMS 都不超过 0.02 mm; 而用文献 [3] 中的直接计算方法, 例如用 40° 、 52° 和 90° 的测量结果进行计算, 仰角 70° 时的预测结果与测量结果之差的 RMS 则达到 0.05 mm. 可见拟合方法得到的重力变形模型精度高.

3.2 主面焦距及副面姿态重力变形模型

根据表 1 中的测量结果, 通过拟合可以得到主面焦距 f 以及副面偏移 Δy 和倾角 α_y 随仰角 E 的变化规律, 分别由 (4)~(6) 式表示, 拟合曲线见图 4 和图 5. 主面焦距是 $\sin E$ 的线性函数 [4], 副面偏移 Δy 和倾角 α_y 则是 $\cos E$ 的线性函数. (4)~(6) 式将作为控制副面姿态以补偿天线重力变形的依据.

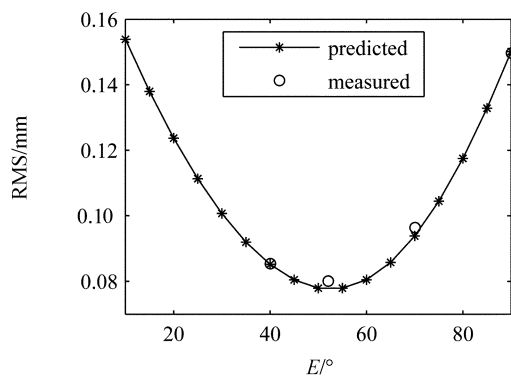


图 3 测量和预测的主面面形偏差 RMS 值随仰角的变化

Fig. 3 Measured and predicted RMS of main-dish surface deviation with elevation angle

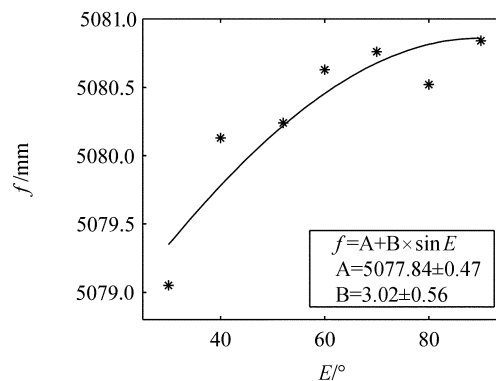


图 4 主面焦距随仰角变化的拟合模型

Fig. 4 Fitted model of main-dish focal length with elevation angle

$$f = 5077.84 + 3.02 \sin E, \quad (4)$$

$$\Delta y = -7.50 + 15.06 \cos E, \quad (5)$$

$$\alpha_y = -0.021 - 0.266 \cos E. \quad (6)$$

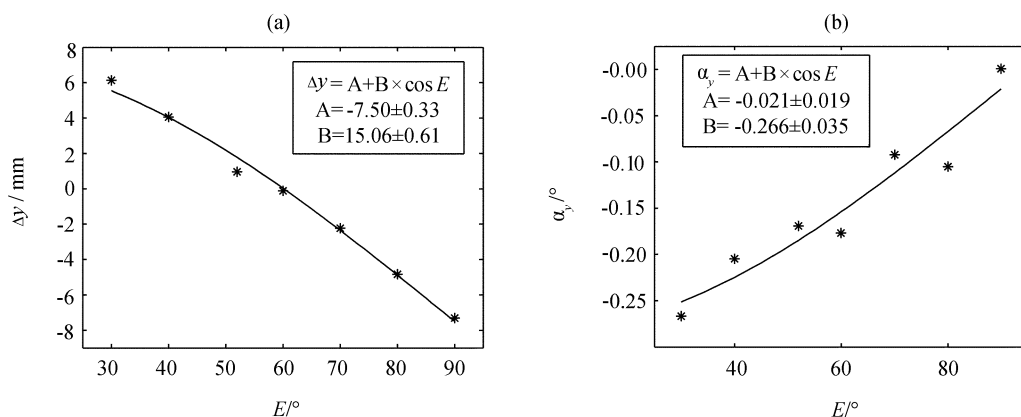


图 5 副面 y 方向偏移 (a) 和倾角 (b) 随仰角变化的拟合模型

Fig. 5 Fitted model of sub-reflector displacement (a) and tilt angle (b) in y direction with elevation angle

4 天文观测效果

图 6 表示 2009 年借助于摄影测量调整主面板前后天线口径效率的比较结果, 其中 2008 年的口径效率是经纬仪法测量调整面板后的结果. 两次均在频率 115 GHz 处观测金星得到结果, 而且均实施了副面主动控制. 可见, 用摄影测量法调整面板后, 在观测仰角范围天线效率提高了约 1 倍. 这一方面是因为摄影测量精度比经纬仪法高, 另一方面是因为此次面板调整时主面在 $E=52^\circ$ 获得最佳面形, 从而兼顾了天线效率在整个观测仰角范围内的优化.

5 结论

借助于数字摄影测量调整天线面板, 使 13.7 m 望远镜在 $E=52^\circ$ 时取得最佳反射面面形, 从而使天线效率在观测仰角范围得到整体优化. 天文观测结果表明, 经过此次测量调整, 天线口径效率提高约 1 倍.

摄影测量方法的实现, 使我们能够通过实测研究天线的重力变形, 研究主面面形偏差、焦距以及副面偏移和倾角随仰角的变化规律. 根据不同仰角的面形偏差测量数据反演反射面重力变形模型时, 我们没有采用直接计算法, 而是采用了数据拟合方法, 这样可以减小测量误差对模型精度的影响.

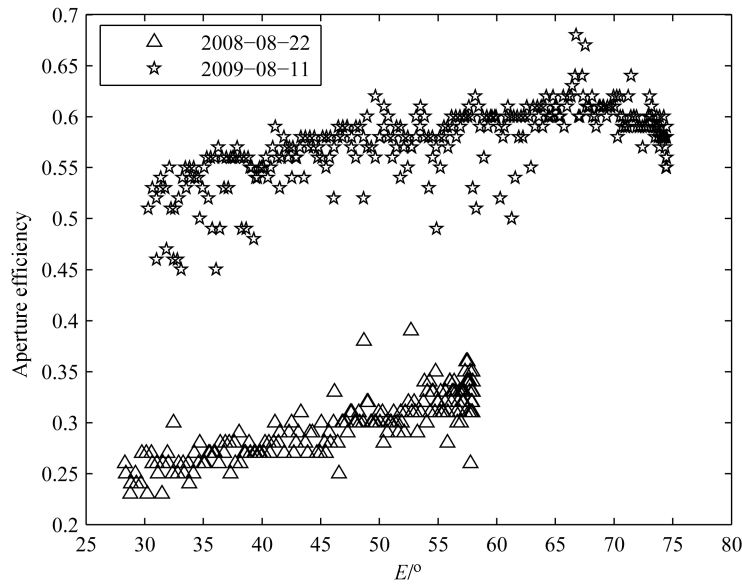


图 6 采用摄影测量法调整主面前后望远镜口径效率的比较

Fig.6 Comparison of the aperture efficiency before and after the photogrammetric measurement based on main-dish adjustment

参 考 文 献

- [1] 范钦红, 范生宏, 左营喜, 等. 天文学报, 2010, 51: 210
- [2] Brenner M J, Eppard A J, Zarghamee M S. IEEE, 1994, 82: 734
- [3] Brenner M, Britcliffe M J, Imbriale W A. IAPM, 2002, 44: 187
- [4] Satoki M, Masao S, Kazushi S, et al. Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng, 2006, 6275: 62751W

A Research on Gravity Deformation of Delingha 13.7 m Telescope

ZUO Ying-xi¹ LI Yang¹ SUN Ji-xian¹ YANG Ji¹ LI Jing-jing¹ XU Ye¹

HE Deng-yun¹ FAN Qin-hong² FAN Sheng-hong²

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2 Zhengzhou Sunward Technology Limited Company, Zhengzhou 450001)

ABSTRACT Profiting from photogrammetric measurements, the main-reflector panels of Delingha 13.7 m telescope are adjusted such that the main dish closes most to a perfect paraboloid at 52° elevation other than at zenith as before, and thus the overall efficiency

of the antenna is optimized at different observing elevations. Observations show that the aperture efficiency has been increased to around two times as compared with before when the panels were adjusted on the basis of theodolite measurements. From the measurements at several different elevations, a set of gravity deformation models for the antenna can be drawn to describe the displacement and tilt angle of the sub-reflector as well as the focal length and surface deviation of the main dish over the entire range of elevation angles. The face-up and face-side gravity deformations, which are necessary for the gravity deformation model of the main dish, are usually derived by direct calculation from surface measurements at only three elevation angles. In this paper, however, they are achieved by least square fitting of the surface measurements at more elevations because by this means less measurement errors can be introduced into the model.

Key words telescopes, instrumentation: miscellaneous