



大口径天线主反射面面形快速摄影测量方法研究

古丽加依娜·哈再孜汗¹, 王娜^{1,2,3*}, 许谦^{1,2,3}, 薛飞¹

1. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院射电天文重点实验室, 南京 210033;

3. 新疆射电天体物理重点实验室, 乌鲁木齐 830011

*联系人, E-mail: na.wang@xao.ac.cn

收稿日期: 2023-07-04; 接受日期: 2023-09-04; 网络出版日期: 2023-12-20

国家重点研发计划(编号: 2021YFC2203501)、国家自然科学基金(编号: 12203095)和新疆维吾尔自治区自然科学基金(编号: 2022D01B220)资助项目

摘要 本文针对110 m口径全可动射电望远镜(QiTai Radio Telescope, QTT)全工况下主反射面面形快速高精度测量问题提出了一种基于图像传感器的快速摄影测量方法. 该方法将天线主反射面分成16个测量单元, 通过每个测量单元的不同焦距的两台相机测量反射面上固定靶标点的像素偏移量, 并根据像素偏移量与天线反射面法向偏差之间的关系计算出反射面的变形量. 通过优化确定了每个测量单元靶标点的数目, 分析了面形测量精度影响因素, 确定了每个测量单元上不同焦距的两个相机的安装位置和焦距等关键参数. 该方法可以提高测量效率和精度, 为大口径天线反射面快速测量提供了一种新的解决方案.

关键词 QTT, 大口径射电望远镜, 面形测量, 摄影测量

PACS: 95.85.-e, 07.05.Fb, 07.05.Tp

1 引言

正在我国新疆奇台县建设的大口径、全方位可转动射电望远镜(QiTai Radio Telescope, QTT)^[1], 口径为110 m, 工作波段覆盖150 MHz–115 GHz. 全可动射电望远镜方位角和俯仰角的改变将导致天线反射面的面形精度受重力影响实时变化^[2], 除重力影响外, 天线还会受到风荷^[3]、温度^[4]等多种环境载荷的影响, 即射电望远镜表面精度将受到多种工况的影响, 导致电性能恶化. 射电望远镜表面精度直接决定自身性能和观测

效率, 尤其在高频观测时微小的表面误差将引起较大的增益损失. 为降低观测过程中望远镜表面精度下降引起的灵敏度损失, QTT将采用主动面调整技术进行结构变形高精度快速测量和实时修正, 实现望远镜面形稳定维持. 主动面调整技术主要包括面形检测、主动面分块设计、促动器设计、主动面控制系统和面形调整量计算^[5]. 其中, 面形检测是主动面调整过程的第一步, 而实时性是主动面调整技术中的重要指标. 因此, 实时快速地计算出面板的修正量是当前大口径天线主动面调整技术中面临的关键问题^[6].

引用格式: 古丽加依娜·哈再孜汗, 王娜, 许谦, 等. 大口径天线主反射面面形快速摄影测量方法研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 219506
Guljaina K, Wang N, Xu Q, et al. Rapid photogrammetry method for large-aperture antenna main reflector surface (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 219506, doi: [10.1360/SSPMA-2023-0220](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0220)

受到测量范围和距离的影响, 反射面口径越大测量难度越高、测量精度越低. 为提高测量精度与速度, 国际上尝试了多种方案, 如经纬仪测量、激光测距法^[7]、激光扫描测量^[8]、微波全息测量^[9]、摄影测量^[10]等. 然而它们都因为某些技术或环境限制, 无法完美解决高精度快速测量的问题. 如经纬仪尺带法只适用于天线处于特定工况时的测量, 且单点的测量时间约需要5–7 s^[11], 对于大天线来说, 每完成一次面形测量, 都需要几小时, 测量速度较慢, 比较适合天线初期安装测量, 对于任意工况下的快速测量显然不适用. 2012年, Gale课题组^[12,13]使用激光跟踪仪对LMT面板进行调整, 该方法测量精度足够, 但测量耗时很长, 需要一整晚才能得到一张表面图. FAST射电望远镜将10个激光全站仪分别安装在5个测量基准点上测量反射面, 通过静态标定使反射面精度达到1.4 mm RMS^[14]. 2013年, Holst等人^[15]利用激光扫描对德国Effelsberg 100 m望远镜面形进行测量, 测量精度优于0.1 mm, 超过50 m时的测量误差约为1.3 mm. 可见, 激光扫描测量速度快, 但当距离相对较远时, 其测量精度较差. 当前等效口径101 m美国GBT是世界上精度最高的百米级射电望远镜, 通过离焦全息法进行测量校准, 经过长期调试面形精度达到0.24 mm RMS (Root Mean Square)^[16,17], 其面形测量时间为20 min, 未能实现主动补偿系统实时闭环控制. 上海天马65 m射电望远镜采用全息法将表面精度调整到0.27 mm RMS^[18]. 可见, 全息法测量精度高, 适用性强, 但每次测量耗时都在半小时以上, 对于大天线测量的实时性还需要提高. 而其他测量方法如Konyakhin课题组^[19,20]针对俄罗斯70 m射电望远镜提出多矩阵光电测量系统, 在实验室15 m的测量距离下测量得到RMS为0.024 mm, 但是没有对室外多工况环境下的研究.

前述的测量方式精度足够, 但缺点在于测量前要做大量的准备工作, 耗时很长, 从准备到测量结束甚至要耗费几天的时间, 且不能做到对天线面形的全工况实时监测, 因此需要寻找一种能够做到测量精度高、所用时间短、有助于天线面形实时调整的测量方式. 随着工业检测和监测实时性要求不断提高, 数字摄影测量在目标空间坐标的测量与三维重建、空间中目标几何尺寸的测量以及大型目标的空间三维姿态监测等方面逐渐得到应用^[21]. González-Jorge等人^[22]使用摄影测量与激光扫描方法对汽车的长度等几何尺寸进行

测量, 结果表明摄影测量可以达到激光扫描仪精度. Maghiar等人^[23]比较摄影测量、激光扫描仪和全站仪三者的精度, 其实验结果显示摄影测量可以达到另外两种测量方法的精度. Luhmann^[24]在近景摄影测量的相机标定、六自由度位姿测量算法及测量传感器硬件等方面做了大量研究工作. 随着计算机技术的快速发展, 工业摄影测量技术进入数字化时代. 多家公司推出了数字工业摄影测量系统, 如美国GSI公司、挪威Metronor公司、比利时Metris公司、加拿大NDI公司等均开发有三维动态测量系统. 其中美国GSI公司开发的V-STARS系统配备的专业的智能量测相机INCA3a, 该相机镜头经过专业设计与加工, 畸变小, 并且相机内参数在出厂前已经过检校, 相机内参数已知且稳定^[25]. 近年来, “近景摄影测量”在大型钢结构变形研究中得到广泛应用, 2018年, Ličev等人^[26]采用摄影测量方法研究了高压电塔在不同荷载作用下的三维变形. Taşçi^[27]通过摄影测量和有限元方法研究了钢拱桥的变形. 2013年, Higgins等人^[28]使用普通相机采集新造桥梁的板筋件图像, 对其进行测量并与图纸数据比较, 检验安装误差是否在设计范围内, 从而对桥梁的竣工进行验收.

目前摄影测量在射电望远镜的应用主要是通过吊车吊装相机或者用无人机进行拍摄的方式进行面形测量. 1962年摄影测量首次应用在射电望远镜上, 分别测量了GBT和NRAO天线, 测量均方根分别为4和1.5 mm^[29]. Gale等人^[30]通过起重机吊起摄像机对墨西哥大型毫米波望远镜(LMT)进行测量得到面形精度70 μm (rms). Subrahmanyam^[10]对澳大利亚22 m卡塞格林反射面天线进行重力引起的望远镜结构变形检测, 得到相对测量精度1/500000和1/60000的绝对精度. Buffa等人^[31]对意大利撒丁岛65 m天线(SRT)进行摄影测量, 同时建立了有限元模型, 分析重力对形面的影响, 获得摄影测量误差在30–90 μm 之间. 紫金山天文台对13.7 m毫米波天线进行面形测量调整, 根据现场条件专门设计了环形轨道输送相机, 相机的点位测量精度达到1/120000 (5 m智能测量精度达到0.05 mm), 通过CAD面形拟合, 经过6次反复调整得到面形偏差RMS达到0.083 mm, 满足调整要求^[32]. 综上, 摄影测量方法具有非接触测量、测量精度高、能够多工况测量等优点, 但是以上采用的吊车吊装相机或者用无人机进行拍摄的方式仍存在耗时长, 无法在多工况环境下

实时反馈面形精度等缺点. 对于百米级望远镜而言, 主动反射面调控具有服役环境复杂、尺寸大、精度要求高、时间短等特点, 实现反射面的动态测量与维持是极具挑战性的任务. 目前研究还处于探索阶段, 没有成熟的解决办法, 如何对百米级反射面进行面形动态精确测量是亟待解决的难题. 针对以上问题本文提出一种将不同焦距的相机组安置在天线中心圆筒周围快速测量天线面形精度的方法.

2 QTT主动面介绍

QTT天线的焦径比为 $f/d=0.33$, 焦距为 $f=36.3\text{ m}$, 主动面由1920块面板拼装而成, 一共20圈面板, 内侧4圈每圈分为32块, 中间4圈每圈分为64块, 外侧12圈每圈分为128块, 4块相邻面板的4个角点由位移促动器实现位移调整, 总共有2048个促动器, 对面板位置进行精确调整, 如图1所示为QTT主动面1/16面形分布图.

QTT最终工作频段覆盖从150 MHz到115 GHz, 为了能够实现不同频段的观测要求, 特别是高频, 望远镜必须具有较高的天线孔径效率. 根据经典的天线误差理论, 可通过RUZE公式来描述天线波前误差与孔径效率间的关系:

$$\eta = e^{-(4\pi\sigma/\lambda)^2}, \quad (1)$$

式中 σ 为天线反射面的波前误差(等效表面误差)的RMS值, λ 为天线的工作波长. 由该式可知, 当反射面的表面精度为波长的1/20, 1/16, 1/10时, 天线孔径效率近似为67.4%, 54.1%, 20.6%. 对于QTT而言, 为最终满足工作到3 mm波长, 并实现在该波段50%的孔径效率, 望远镜的表面精度要优于波长的1/15, 即0.2 mm RMS. 为实现对主动面的准实时闭环控制, 要求测量时间小于2 min.

3 测量方案

3.1 传感器布置方案

如图2所示, 将天线主动面分成16个测量单元, 每个测量单元由22.5°扇形曲面构成, 每个扇形面布置一定数量的靶标点, 每个测量单元由两台不同焦距的相机测量靶标点成像的偏移量, 每台测量相机检测不同的区域, 相机安装在天线中心圆筒(馈源舱)顶部周围,

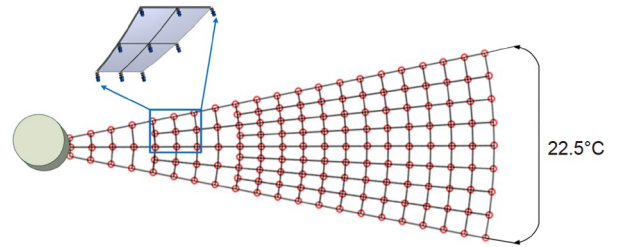


图1 QTT主动面1/16面形分布

Figure 1 The 1/16 surface shape distribution of the QTT active surface.

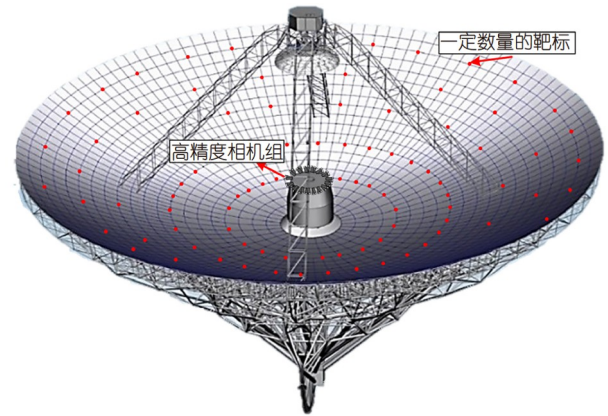


图2 QTT主反射面面形测量系统

Figure 2 Main reflector measurement system of the QTT.

总共由32台测量相机同时测量整个主动面的表面精度. 相机采用分布式计算方式, 单相机的图像处理时间约1–5 s, 总体数据计算处理时间约10–30 s, 能够满足2 min的快速测量需求. 天线反射面表面在运行过程中发生的变形很小, 并且主要是沿天线表面法线方向的形变. 因此, 当天线反射面表面粘贴了靶标之后, 对于不同观测周期的天线表面, 可以保证天线靶标一直处于相机视场范围内.

3.2 靶标点数量优化

根据天线反射面上靶标点与相机测量系统的相对位置, 可以确定靶标点在测量坐标系下的坐标值, 并通过拟合抛物面方法实现实测天线数据和理论模型数据的精配准. 但是需要注意的是, 靶标点的数量会影响抛物面的拟合精度. 如果靶标点数量过少, 会导致拟合后的抛物面与真实反射面的面形存在较大偏差; 如果靶标点数量过多, 不仅会增加靶标制作、维护成本, 还

会增大计算量和拟合时间. 因此, 在选择靶标点数量时, 需要进行合理的计算, 以满足拟合精度的要求, 同时又不会增加过多的成本和计算负担. 具体而言, 需要通过比较不同靶标点数量下, 拟合结果与真实反射面之间的均方根误差(RMS)来确定最佳靶标点数量.

采用等间距采样法, 在抛物面上选择一定数量的测量点, 并为每个测量点在反射面法向方向增加0.05 mm的随机误差, 根据带偏差的测量点数据拟合抛物面, 并计算拟合抛物面与实际抛物面之间的均方根误差. 具体如下.

(1) 采用等间距法取测量点, 每个面板上测量点的位置选取在左上调整点处, 由于整个测量系统由16个测量单元组成, 每个测量单元取 m 个测量点, 则整个反射面测量点的数目为

$$n = 16 \cdot m. \quad (2)$$

(2) 根据 n 个测量点的测量坐标 (x_i, y_i, z_i) , $i=1, \dots, n$, 采用最小二乘法计算出拟合抛物面的6个参数:

$$z(x, y) = c_0 + c_1 x + c_2 y + c_3 xy + c_4 x^2 + c_5 y^2. \quad (3)$$

(3) 根据式(3)求得的拟合抛物面方程求出1920块面板顶角处的坐标值 (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) , $j=1, \dots, 1920$.

(4) 计算理论抛物面和拟合抛物面上1920个点坐标的均方根误差.

如图3所示, 当靶标数量大于320时, 拟合误差小于0.1 mm, 因此选取320个靶标点, 采用等间距法每隔2~4块面板放一个靶标, 一个测量单元包含20个靶标点, 加上相邻测量单元交叉区域内的10个靶标点, 一个测量单元内的相机测量30个靶标点, 靶标数量为320时拟合抛物面如图4所示, 靶标点分布情况如图5所示.

4 反射面形变量计算

相机拍摄靶标点在像平面坐标系中得到二维坐标值, 在相机坐标系中利用相机焦距参数将像点坐标转换成目标点的位移变化值, 再根据相机坐标系与抛物面系统坐标系的关系计算出目标点的偏移量. 如图6所示, $O_W-X_W Y_W Z_W$ 为天线抛物面系统坐标系, $o-xy$ 为图像物理坐标系, uv 为像素坐标系, 相机坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 以光心为相机坐标系原点, Z_C 轴与相机光轴平行, 且垂直相交于图像平面点 $P_C(X_C, Y_C, Z_C)$,

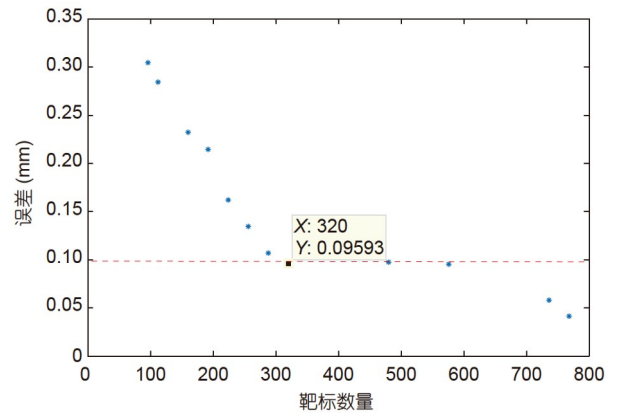


图3 靶标点数量与拟合误差之间的关系

Figure 3 The relationship between the number of target points and the fitting error.

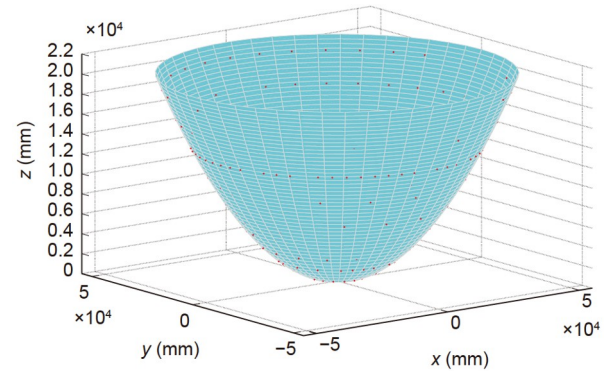


图4 靶标数量为320时拟合抛物面

Figure 4 The fitted paraboloid when the number of targets is 320.

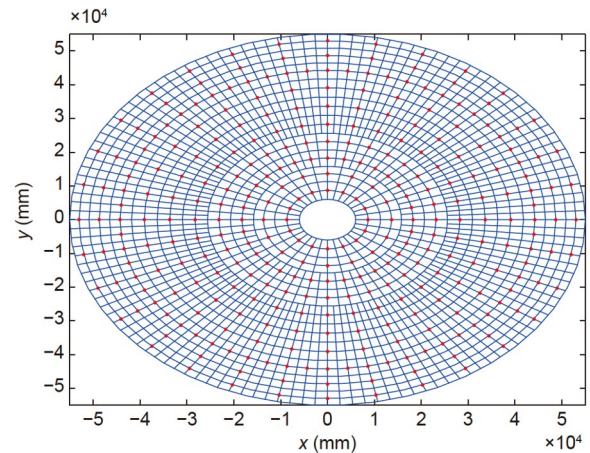


图5 靶标数量为320时主反射面靶标点分布图

Figure 5 Target point distribution diagram of the main reflector when the number of targets is 320.

f 为相机的焦距. 通过相机拍摄靶标点扫描图像, 直接得到每个靶标点 P 的初始像素坐标 $P_0(u_0, v_0)$. 面板发生形变后, 相机重新拍摄编码点, 重新得到每个编码点的像素坐标 $P_t(u_t, v_t)$, 通过同一个靶标点的前后像素值变化值可计算出靶标点在图像平面的位移量 ΔL , 再根据靶标点与反射面系统坐标系 $O_W-X_W Y_W Z_W$ 、相机坐标系 $O_C-X_C Y_C Z_C$ 之间的位置关系计算出靶标点在法向方向的位移变化值.

如图6所示, 当反射面在初始位置时通过标定可得到抛物面上某个靶标点在抛物面系统坐标系下的初始位置 $P_0(X_{W0}, Y_{W0}, Z_{W0})$, 则该靶标点在相机坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} X_{C0} \\ Y_{C0} \\ Z_{C0} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_{W0} \\ Y_{W0} \\ Z_{W0} \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (4)$$

其中 $\mathbf{R}$ 为正交旋转矩阵, $\mathbf{T}$ 为平移矩阵, 均可通过对相机外参标定得到. 当反射面变形后, 靶标点在抛物面系统坐标系下的坐标为 $P_t(X_{Wt}, Y_{Wt}, Z_{Wt})$, 在相机坐标系下该点在图像平面投影的坐标为 $P_t(X_{Ct}, Y_{Ct}, Z_{Ct})$, 则该靶标点在反射面变形前后在图像平面的移动距离 $P_0 P_t$ 为 ΔL . 相机拍摄反射面变形前后的图像, 可得到该靶标点的像素坐标 $P_0(u_0, v_0)$ 及 $P_t(u_t, v_t)$, 通过下式可将像素坐标转换为相机坐标:

$$\begin{bmatrix} x_{C0} \\ y_{C0} \\ z_{C0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 & -u_c dx \\ 0 & dy & -v_c dy \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 dx 和 dy 表示每个像素在横轴 x 和纵轴 y 的物理尺寸, u_c 和 v_c 是主点的位置. 通过计算 $P_0(x_{C0}, y_{C0}, z_{C0})$ 与 $P_t(x_{Ct}, y_{Ct}, z_{Ct})$ 之间的距离可得到像素移动距离 Δl , 及夹角 $\Delta\phi$. 根据相似三角形原理可得到 Δl 及 ΔL 的关系如下:

$$\frac{\Delta l}{f} = \frac{\Delta L}{Z_C}, \quad (6)$$

其中 f 为相机的焦距, Z_C 为图像平面到相机坐标系原点的距离, 与靶标点的初始位置相关, 由式(1)计算得到. 从而可得到靶标点在反射面变形前后在图像平面的移动距离 ΔL :

$$\Delta L = Z_C \cdot \frac{\Delta l}{f}. \quad (7)$$

如图7所示, 由于靶标点在相机光轴方向的位移量

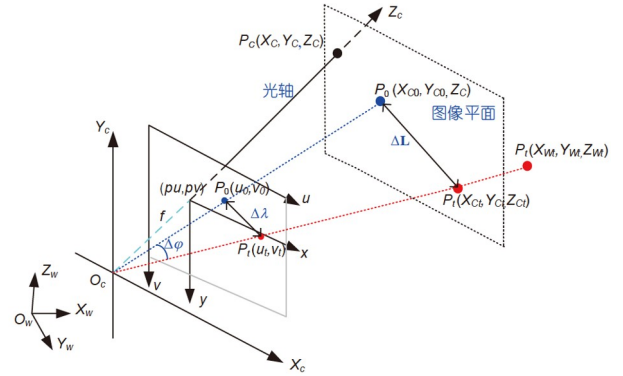


图 6 图像测量基本原理示意图

Figure 6 Schematic diagram of the basic principle of image measurement.

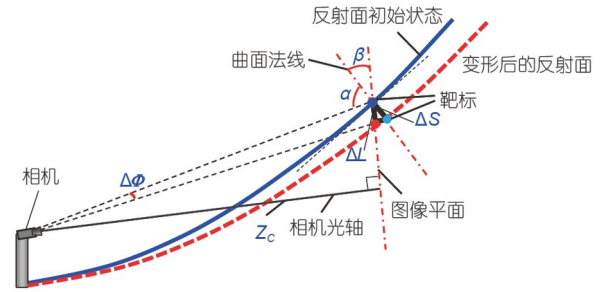


图 7 靶标点抛物面法向偏差求解原理图

Figure 7 Target point paraboloid normal deviation solving principle diagram.

无法体现在像素变化值里, 因此靶标点在图像平面的位移量 ΔL 与该点在反射面法向的实际位移量 ΔS 不相等, 可通过变形前后反射面之间的几何关系求出点在反射面法向的实际位移量 ΔS .

对于QTT天线, 焦距比 $f/d=0.33$, 焦距 $f=36.3$ m, 抛物面的方程为

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4 \cdot f}. \quad (8)$$

靶标点在抛物面系统坐标系下的初始位置为 $P_0(X_{W0}, Y_{W0}, Z_{W0})$, 则靶标点处抛物面的法向量为

$$\mathbf{n}_0 = \left[-\frac{2 \cdot X_{W0}}{4 \cdot f}, -\frac{2 \cdot Y_{W0}}{4 \cdot f}, 1 \right]. \quad (9)$$

相机光轴方向向量 $\mathbf{n}_c$ 可在相机安装后标定得到, $\mathbf{n}_c$ 垂直于图像平面, 则图像平面与反射面的法线的夹角 β 为

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{\mathbf{n}_0 \cdot (-\mathbf{n}_c)}{|\mathbf{n}_d| |\mathbf{n}_c|} \right). \quad (10)$$

相机光心坐标 $O_C(X_{wc}, Y_{wc}, Z_{wc})$, 则相机光心到靶标点初始位置的向量为 $\mathbf{n}_d$:

$$\mathbf{n}_d = [X_{w0} - X_{wc} \quad Y_{w0} - Y_{wc} \quad Z_{w0} - Z_{wc}]. \quad (11)$$

相机光心到靶标点初始位置的向量与曲面法线的夹角 α 为

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\mathbf{n}_0 \cdot (-\mathbf{n}_d)}{|\mathbf{n}_d| |\mathbf{n}_d|} \right). \quad (12)$$

通过抛物面变形前后的几何关系及正弦定理可求出点在反射面法向的实际位移量 ΔS :

$$\Delta S = \Delta L \cdot \frac{\sin(\pi - \alpha - \beta + \Delta\varphi)}{\sin(\alpha - \Delta\varphi)}. \quad (13)$$

根据已知靶标点的偏移量及天线变形仿真, 计算出调整点偏差的插值计算函数, 其余调整点的相对偏差量, 通过调整点附近关键点的偏差值和插值函数计算出调整点的相对变形偏差, 从而得到反射面所有调整点的变形偏差量。

5 传感器关键参数计算

5.1 相机安装位置

如图8和9所示, 每个测量单元内的测量区域半径为6–55 m范围, 对相机的光学系统要求苛刻, 因此每个测量单元采用两个测量相机, 每个相机测量不同区域, 从而放宽对单相机光学系统的苛刻要求. 相机1测量半径为6–30 m范围内的靶标点, 相机2测量半径为30–55 m范围内的靶标点, 相机每隔 22.5° 均匀安装在中心圆通顶部周围, 相机固定角度为相机1俯角: 26.87° , 相机2: 仰角 7.42° .

5.2 面形测量精度影响因素

当给定相机测量精度 $\Delta L = 0.05$ mm时, 抛物面一条母线上的10个靶标点在反射面法向方向偏差量计算结果如表1及图10所示, 靶标点1–5由相机1测量, 6–10由相机2测量, 可以看出当相机测量精度 ΔL 相同时, 靶标点离测量相机距离越近, 靶标点初始位置指向相机光心的向量与反射面的法线方向夹角 α 越小, 靶标点在反射面法向偏差量 ΔS (mm)越大, 因此对于抛物面天

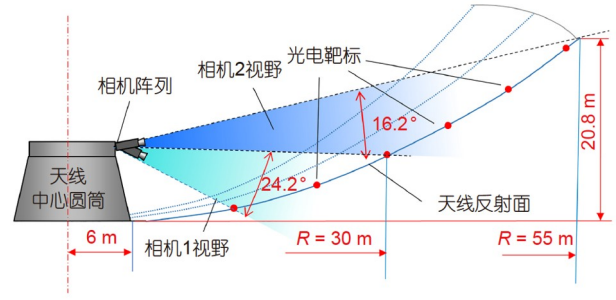


图 8 测量系统关键参数计算示意图

Figure 8 Calculation diagram of key parameters of measurement system.

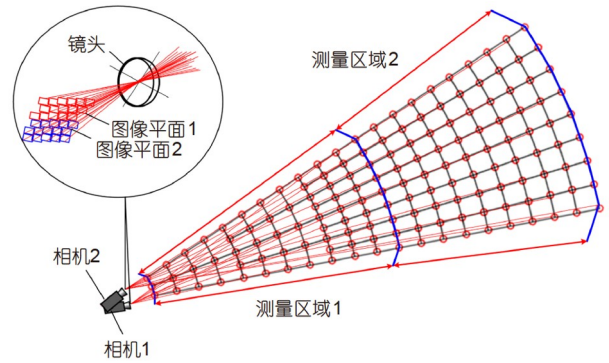


图 9 一个测量单元不同相机的测量区域划分

Figure 9 A measurement unit is divided into measurement areas for different cameras.

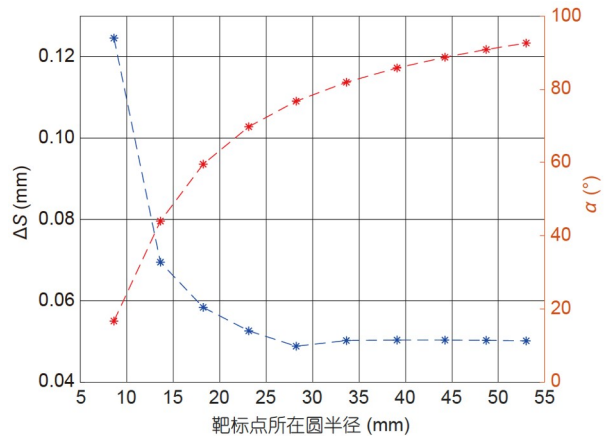


图 10 抛物面法向误差求解原理图, 蓝色线段表示靶标点在反射面法向偏差量, 红色线段表示相机光心的向量与反射面的法线方向夹角 α

Figure 10 Paraboloid normal error solving principle diagram. The blue line segment represents the normal deviation of the target point on the reflector, and the red line segment represents the angle α between the vector of the camera's optical center and the normal direction of the reflector.

线靶标点离测量相机越近对测量相机的测量精度要求越高.

由式(7)可知, 相机测量精度 ΔL 与测量距离 Z_C 成正比, 即当 Δl 为定值时, ΔL 随 Z_C 的增大而增大, 即靶标点离测量相机越远对测量相机的精度要求越高, 如表2所示为靶标点位置与该点处相机最低测量精度要求, 可以发现夹角 α 最小时对相机测量精度要求最高为0.0204 mm, 因此应综合考虑测量距离 Z_C 与夹角 α 确定相机关键参数.

5.3 相机关键参数计算

使用像元尺寸为 $3.2\ \mu\text{m} \times 3.2\ \mu\text{m}$ 的相机, 采用亚像素级别的中心提取算法图像中心提取精度为1/30像素,

则 $\Delta l = 3.2\ \mu\text{m}/30$, 取相机测量精度 $\Delta L=0.05\ \text{mm}$, 由式(7)可得相机焦距 f 为

$$f = Z_C \cdot \frac{\Delta l}{\Delta L}. \quad (14)$$

计算得到相机1焦距最小为44.2 mm, 相机2焦距最小为100.3 mm, 在满足精度的前提下, 相机1焦距选取60 mm, 相机2焦距选取120 mm, 具体参数如表3所示.

6 总结

本文提出了一种基于图像传感器的快速摄影测量方法, 将110 m口径天线的主反射面分成16个测量单

表 1 靶标点位置与测量精度的关系

Table 1 The relationship between target position and measurement accuracy

序号	靶标点初始坐标 (m)	夹角 α (°)	相机测量精度 ΔL (mm)	靶标点在反射面法向偏差量 ΔS (mm)
1	(8.650, 0, 0.515)	16.654	0.05	0.12386
2	(13.650, 0, 1.283)	43.977	0.05	0.06905
3	(18.250, 0, 2.294)	59.536	0.05	0.05801
4	(23.150, 0, 3.690)	69.778	0.05	0.05227
5	(28.250, 0, 5.496)	76.755	0.05	0.04852
6	(33.650, 0, 7.798)	81.937	0.05	0.04989
7	(39.100, 0, 10.529)	85.839	0.05	0.05001
8	(44.250, 0, 13.485)	88.762	0.05	0.05001
9	(48.700, 0, 16.334)	90.876	0.05	0.04994
10	(53.000, 0, 19.345)	92.651	0.05	0.04982

表 2 靶标点位置与测量相机最低精度要求

Table 2 Target point position and minimum accuracy requirements for measuring cameras

序号	靶标点初始坐标 (m)	夹角 α (°)	靶标点在反射面法向偏差量 ΔS (mm)	该点处相机最低测量精度要求 ΔL (mm)
1	(8.650, 0, 0.515)	16.654	0.05	0.0204
2	(13.650, 0, 1.283)	43.977	0.05	0.0365
3	(18.250, 0, 2.294)	59.536	0.05	0.0434
4	(23.150, 0, 3.690)	69.778	0.05	0.0483
5	(28.250, 0, 5.496)	76.755	0.05	0.0502
6	(33.650, 0, 7.798)	81.937	0.05	0.0501
7	(39.100, 0, 10.529)	85.839	0.05	0.0501
8	(44.250, 0, 13.485)	88.762	0.05	0.0501
9	(48.700, 0, 16.334)	90.876	0.05	0.0503
10	(53.000, 0, 19.345)	92.651	0.05	0.04982

表 3 相机关键参数

Table 3 Key parameters of cameras

传感器	测量半径 R (m)	焦距 (mm)	像元 (μm)	最远点测量精度 ΔS (mm)	最近点测量精度 ΔS (mm)
相机1	6–30	60	3.2	0.0377	0.0106
相机2	30–55	120	3.2	0.0427	0.0294

元, 每个测量单元配备两个不同焦距的测量相机, 每个相机测量不同区域, 从而放宽了对单相机光学系统的苛刻要求. 文章利用变形前后的反射面几何关系给出了像素偏移量与天线反射面法向偏差之间的数学关系, 解决了单相机无法获取径向位移量的问题. 通过比较不同靶标点数量下, 拟合结果与理想反射面之间的

均方根误差, 确定了最佳的靶标点数量. 同时, 文章还分析了面形测量精度的影响因素, 确定了每个测量单元上不同焦距的两个相机的安装位置和焦距等关键参数. 该测量方法有望实现QTT全工况下主动主反射面面形的快速高精度测量. 未来, 将进一步研究此方案的实际应用, 探索其在多工况下的适用性.

参考文献

- Wang N, Xu Q, Ma J, et al. The Qitai radio telescope. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2023, 66: 289512
- Wang W, Wang C, Duan B, et al. Compensation for gravity deformation via subreflector motion of 65 m shaped Cassegrain antenna. *IET Microw Antennas Propag*, 2014, 8: 158–164
- Qian H, Chen D, Fan F, et al. Evaluation of solar temperature field under different wind speeds for Shanghai 65 m radio telescope. *Int J Steel Struct*, 2016, 16: 383–393
- Wang C S, Liu X, Wang W, et al. Analysis method for temperature distribution characteristic and thermal distortion of large reflector antennas (in Chinese). *J Astron*, 2013, 34: 1523–1528 [王从思, 刘鑫, 王伟, 等. 大型反射面天线温度分布规律及变形影响分析. 宇航学报, 2013, 34: 1523–1528]
- Wang C S, Xiao L, Xiang B B, et al. Development of active surface technology of large radio telescope antennas (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 059503 [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. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 059503]
- Wang C S, Lei T, Yan Y F, et al. Real-time position calculation method for large-diameter radio telescope panel using angle sensor (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 46–55 [王从思, 雷婷, 严粤飞, 等. 基于角度传感器的大口径射电望远镜面板实时位置计算方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 46–55]
- Payne J, Parker D. The laser ranging system for the GBT. GBT Memo N57. 1990
- Sarti P, Vittuari L, Abbondanza C. Laser scanner and terrestrial surveying applied to gravitational deformation monitoring of large VLBI telescopes' primary reflector. *J Surv Eng*, 2009, 135: 136–148
- Hunter T R, Schwab F R, White S D, et al. Holographic measurement and improvement of the green bank telescope surface. *Publ Astron Soc Pac*, 2011, 123: 1087–1099
- Subrahmanyam R. Photogrammetric measurement of the gravity deformation in a Cassegrain antenna. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2005, 53: 2590–2596
- Fang P Z. Modern industrial geodesy system with electronic theodolite as sensor (in Chinese). *Geotech Invest Survey*, 1991, 3: 66–69 [方佩竹. 以电子经纬仪为传感器的现代化工业大地测量系统. 工程勘察, 1991, 3: 66–69]
- Gale D M. Experience of primary surface alignment for the LMT using a laser tracker in a non-metrology environment. In: *Ground-based and Airborne Telescopes IV*. New York: SPIE, 2012, 8444: 1649–1664
- Álvarez M L, Torres C T, Rios E H, et al. Metrology and surface adjustment of primary reflector panels on the LMT. In: *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation*. New York: SPIE, 2014, 9151: 1272–1285
- Jiang P, Yue Y L, Gan H Q, et al. Commissioning progress of the FAST. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 959502

- 15 Holst C, Nothnagel A, Blome M, et al. Improved area-based deformation analysis of a radio telescope's main reflector based on terrestrial laser scanning. *J Appl Geodesy*, 2015, 9: 1–14
- 16 Prestage R M, Constantikes K T, Hunter T R, et al. The green bank telescope. *Proc IEEE*, 2009, 97: 1382–1390
- 17 Salas P, Marganian P, Brandt J, et al. Evaluating a strategy for measuring deformations of the primary reflector of the Green Bank telescope using a terrestrial laser scanner. *Adv Control Appl*, 2022, 4: e99
- 18 Dong J, Zhong W, Wang J, et al. Correcting gravitational deformation at the Tianma radio telescope. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2018, 66: 2044–2048
- 19 Usik A A, Konyakhin I A. Study of a multi-array optoelectronic system for monitoring the elements of the Suffa RT-70 radio telescope. *J Opt Technol*, 2013, 80: 769–771
- 20 Li R, Qin X, Konyakhin I, et al. CMOS multi-matrix optoelectronic system for high speed measurement of main mirror deformation large diameter radio telescope. *IEEE Access*, 2020, 8: 51821–51829
- 21 Baqersad J, Poozesh P, Niezrecki C, et al. Photogrammetry and optical methods in structural dynamics—A review. *Mech Syst Signal Proc*, 2017, 86: 17–34
- 22 González-Jorge H, Riveiro B, Arias P, et al. Photogrammetry and laser scanner technology applied to length measurements in car testing laboratories. *Measurement*, 2012, 45: 354–363
- 23 Maghiar M, Maldonado G, Newsome S, et al. Accuracy Comparison of 3D Structural Models Produced via Close-range Photogrammetry and Laser Scanning. Boca Raton: CRC Press, 2016
- 24 Luhmann T. Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS J Photogram Remote Sens*, 2010, 65: 558–569
- 25 Dold J. The role of a digital intelligent camera in automating industrial photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 1998, 16: 199–212
- 26 Ličev L, Hendrych J, Tomeček J, et al. Monitoring of excessive deformation of steel structure extra-high voltage pylons. *Period Polytech Chem Eng*, 2018, 62: 323–335
- 27 Taşçi L. Deformation monitoring in steel arch bridges through close-range photogrammetry and the finite element method. *Exp Tech*, 2015, 39: 3–10
- 28 Higgins C, Turan O T. Imaging tools for evaluation of gusset plate connections in steel truss bridges. *J Bridge Eng*, 2013, 18: 380–387
- 29 Findlay J W. Operating experience at the National Radio Astronomy Observatory. *Ann New York Acad Sci*, 1964, 116: 25–40
- 30 Gale D M, Schloerb F P, Huerta A L, et al. Photogrammetry mapping and alignment of the LMT 50-meter primary reflector. In: *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III*. New York: SPIE, 2018, 10706: 1203–1212
- 31 Buffa F, Causin A, Cazzani A, et al. The Sardinia Radio Telescope: A comparison between close-range photogrammetry and finite element models. *Math Mech Solids*, 2017, 22: 1005–1026
- 32 Fan Q H, Fan S H, Xu Y X, et al. Application of digital industrial photogrammetric technology to measure the surface accuracy of 13.7 m millimeter-wave radio telescope antenna (in Chinese). *Acta Astronom Sin*, 2010, 2: 210–216 [范钦红, 范生宏, 左营喜, 等. 基于数字摄影测量技术的13.7 m毫米波天线面形检测. *天文学报*, 2010, 2: 210–216]

Rapid photogrammetry method for large-aperture antenna main reflector surface

GULJAINA Kazezkhan¹, WANG Na^{1,2,3*}, XU Qian^{1,2,3} & XUE Fei¹

¹ *Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;*

² *Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China;*

³ *Xinjiang Key Laboratory of Radio Astrophysics, Urumqi 830011, China*

**Corresponding author (email: na.wang@xao.ac.cn)*

This paper proposes a rapid photographic method based on an image sensor for the rapid and high-precision measurement of the main reflector surface of the Xinjiang Qitai 110-m Radio Telescope under all operating conditions. This method divides the main reflector surface into 16 measurement units. Two cameras with different focal lengths are employed to measure the pixel offset of fixed target points on the reflection surface of each measurement unit. Further, the reflection-surface deformation is calculated based on the relationship between the pixel offset and the normal deviation of the antenna reflection surface. The number of target points in each measurement unit is optimized, and the factors affecting the accuracy of the surface-shape measurement are analyzed to determine the key parameters, including the installation position and focal length of the two cameras with different focal lengths on each measurement unit. This method improves the measurement efficiency and accuracy and provides a new approach for the large-aperture antenna reflector-surface measurement.

QTT, large-aperture radio telescope, surface shape measurement, photogrammetry

PACS: 95.85.-e, 07.05.Fb, 07.05.Tp

doi: [10.1360/SSPMA-2023-0220](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0220)