

基于数字摄影测量技术的 13.7 m 毫米波天线面形检测*

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

(1 郑州辰维科技有限公司 郑州 450001)

(2 中国科学院紫金山天文台青海观测站 德令哈 817000)

摘要 将工业数字摄影测量技术首次应用于 13.7 m 毫米波射电望远镜天线的面形精度检测中。为克服现场条件的限制，在测量中使用环形轨道输送相机，采用无线传输的方式进行现场摄影。采用回光材料制作人工的标志，利用编码标志完成摄站的自动定向和同名点匹配，用光束法平差的方法解算点的 3D 坐标。利用 CAD 面形转换法和自由拟合法计算面形偏差，最终 480 个调整点的面形 CAD 拟合后的偏差调整到了 0.083 mm。验证了摄影测量在射电天文天线测量中的可行性和优越性。

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

紫金山天文台青海观测站于 1982 年开始建设，位于青海省海西州州府德令哈市以东 30 km。该站装备了具有国际先进水平的 13.7 m 毫米波射电望远镜，该天线是目前国内最大的毫米波天线，主要用于宇宙毫米波射电天文观测^[1]。

该毫米波望远镜天线，主反射面口径为 13.7 m，焦距 5 080 mm，副面直径 1 085.1 mm。天线主反射面由 72 块铝制面板组成，内圈 24 块，外圈 48 块。内圈每块面板上有 8 个测靶，外圈每块板上有 6 个测靶，整个主面板上共有 480 个可调测靶。如图 1。整个天线放置在一个直径为 20.73 m 的罩壳内，如图 2。

对于射电望远镜天线，天线反射面精度是天线系统主要的技术性能指标，一般要求表面精度是天线工作波长的 1/16~1/32，而测量精度要达到表面精度的 1/3~1/5，工作波长越短，对测量提出的要求就越苛刻。

对于 13.7 m 天线，经典的经纬仪测量方法存在着很多缺点，如测量精度不高、只能对天线 90° 姿态进行测量、使用前必须对中、测量时对温度的要求比较严格等。而射电全

2009-11-02 收到原稿，2009-11-23 收到修改稿

* 国家自然科学基金 (10878023) 资助项目

† fanqinhong325@sina.com

息法, 对于天线测量来说, 是非常便利的, 它可以对天线的任意姿态进行测量, 而且测量时间短, 测量比较方便。但是, 对于 13.7 m 天线来说, 由于金属天线罩的存在以及毫米波段缺乏远场毫米波信号等原因的限制, 这并不是好的测量方法^[2]。这些传统测量方法中的不足, 需要一种新的测量技术来解决。

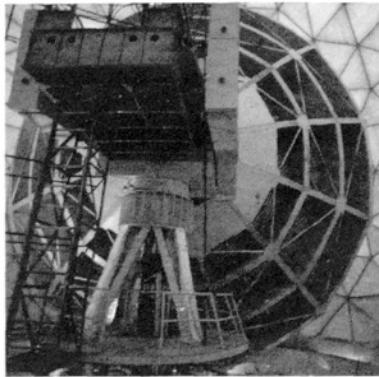


图 1 13.7 m 毫米波射电望远镜天线

Fig. 1 The antenna of 13.7 m millimeter-wave radio telescope



图 2 天线罩壳

Fig. 2 The sheathing of the antenna

工业数字摄影测量是建立在专业相机摄影和计算机图像处理基础上的一门新兴检测技术, 研究的重点是物体的几何尺寸及物体在空间的位置、姿态等^[3]。该方法主要特点包括: 非接触测量、动态性能好、检测速度快、受外界环境影响小等, 特别适合于天线面形的快速检测^[3-4]。本文利用该方法对 13.7 m 射电望远镜天线面形精度进行了成功的检测。

2 数字摄影测量的原理

数字摄影测量是通过在不同的位置和方向获取同一物体的 2 幅以上的数字图像, 经计算机对图像进行特征提取、定位、匹配等处理及相关数学计算后得到待测点精确的三维坐标。

在摄影中, 由一台相机在不同的位置(摄站)对同一物体进行拍摄, 获取被测目标的两张不同角度的像片(图 3), 从而构成立体像对(模型)。如果从多个摄站对目标进行拍摄, 即可获取被测物体的多个立体像对, 从而构成多目立体模型。设物方点 P_i 由 i 个摄站(i 条光线)相交(图 4), 则共有 i 个共线方程^[5], 如下

$$\begin{cases} (x + x_0 + \Delta x)_i = -f \frac{a_1(X_i - X_s) + b_1(Y_i - Y_s) + c_1(Z_i - Z_s)}{a_3(X_i - X_s) + b_3(Y_i - Y_s) + c_3(Z_i - Z_s)} \\ (y + y_0 + \Delta y)_i = -f \frac{a_2(X_i - X_s) + b_2(Y_i - Y_s) + c_2(Z_i - Z_s)}{a_3(X_i - X_s) + b_3(Y_i - Y_s) + c_3(Z_i - Z_s)} \end{cases} . \quad (1)$$

其中, X_s 、 Y_s 和 Z_s , a_i 、 b_i 和 c_i ($i=1, 2, 3$) 分别为像片的外方位元素的平移量及旋转矩阵的元素; x_0 、 y_0 、 f 、 Δx 、 Δy 为像片的内部参数, 预先已标定好, 可当作

已知值; x 和 y 为物方点坐标 X 、 Y 、 Z 所对应的像点坐标.

根据最小二乘原理, 将多个光线(束)的共线方程联立求解(光束法平差), 可以求得物方点的空间坐标 (X, Y, Z) .

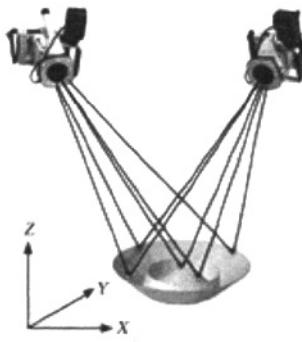


图 3 双摄站摄影

Fig. 3 The two-station photography

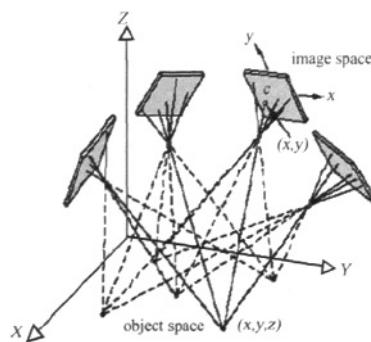


图 4 多摄站摄影与交会

Fig. 4 Multiple-station photography and intersections

3 测量过程及检测方案

3.1 测量过程

测量过程可以概括如下:

- (1) 准备工作: 在主面板上调整点附近粘贴摄影 RRT (retro-reflective target 回光反射标志) 和编码标志;
- (2) 现场对天线表面的 RRT 标志进行数字摄影;
- (3) 对图像进行处理和计算, 得到天线表面 RRT 标志的三维坐标;
- (4) 利用第 (3) 步中得到的三维坐标计算天线的面形偏差, 并将偏差值换算成测量靶点对应的经纬仪的调整角度;
- (5) 根据第 (4) 步中得到的调整角度对天线进行调整, 调整以后再次重复测量, 直到满足要求.

3.2 检测方案

3.2.1 导轨的设计与安装

对于 13.7 m 射电天线, 由于罩壳的存在, 对现场的测量条件有很大限制, 如测量空间狭小、天线与罩壳最小距离为 1.15 m、人员无法安全运送到天线上方一定距离.

综合考虑了现场的测量条件、工程的施工难度、测量网型的需求以及天线本身的一些特性等多方面因素后, 采用了以下方案:

设计制造一个半径 10 m、弧长为周长 1/4 的滑轨, 沿天线罩壳安装在上面, 该滑轨可实现人工控制相机位置. 在拍摄的过程中可采用移动相机, 旋转天线的方法实现多角度交会测量, 测量时通过无线传输卡以及遥控快门装置实现对照片的实时拍摄, 进而指

导调整天线的旋转, 如图 5。而且这种方法可以满足摄影网型和测量精度的要求。

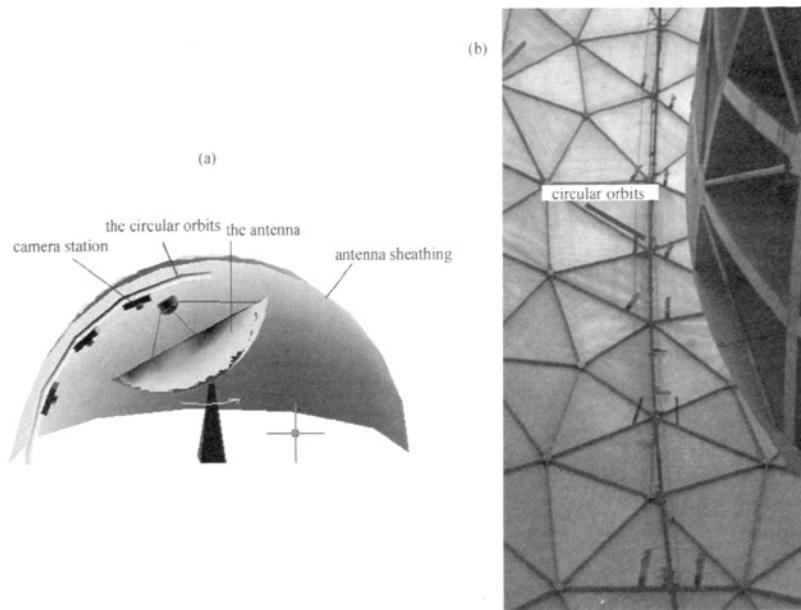


图 5 导轨的设计 (a) 及在罩壳内的安装情况 (b)

Fig. 5 The design of the circular orbits and their installation

3.2.2 RRT 标志及布设

在测量过程中主要用到两种人工标志: RRT 和编码标志 (如图 6)。RRT 的特点是

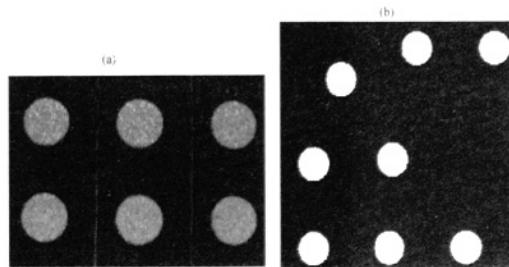


图 6 RRT 标志 (a) 和编码标志 (b)

Fig. 6 RRT (a) and coded targets (b)

反射亮度比漫射白色标志高出数百甚至上千倍, 可以轻松得到被测目标自身影像“消隐”, RRT 标志图像清晰的“准二值影像”^[6-7]。在天线主面板上的 480 个可调测靶附近粘贴摄影 RRT 标志, 为了很好地反映天线主面的面形情况, 在每两圈测靶中间又粘贴了一圈加密点 263 个, 总共 743 个 RRT 标志。另外还在面板上粘贴了 47 个编码标志, 它们在测量和计算中起衔接和匹配作用。

3.2.3 基准尺

测量中, 考虑到测量的范围较大, 为了提高测量的精度, 我们使用了 2 根组合的基准尺, 长度都为 1 471 mm, 使用基准尺首先可以对整个天线尺度进行约束, 其次还可以起互相检校的作用, 避免测量过程中出现粗差.

3.2.4 摄站的布设与摄影

由于天线自身的高度和倾斜角度, 考虑相机镜头视场角、摄影距离、测量精度、测量场地等问题, 摄影测量采用局部摄影、整体解算方法进行, 整体解算以编码标志作为图像之间的公共连接点. 常规条件下可以用吊车、升降机等设备将测量人员送至天线的正前方, 围绕着天线四周进行拍摄. 但是由于 13.7 m 天线测量现场条件的限制, 所以测量方案设计了一个环形导轨, 在拍摄的过程中可通过转动天线、沿导轨滑动相机来改变相机位置、变换相机姿态 3 种方法, 在不同的角度和高度对天线进行摄影, 而且这种方法可以满足摄影网型和测量精度的要求. 每次拍摄约 200 张照片. 图 7 为拍摄中摄站的分布.

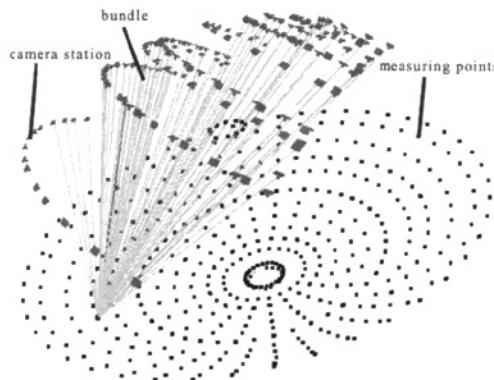


图 7 摄站的分布

Fig. 7 The distribution of camera stations

3.2.5 坐标计算

本次测量中使用的是高精度专业摄影数字相机, 对于点的测量精度很高, 相对测量精度可以达到 1/120000 (5 m 之内测量精度可达到 0.05 mm). 测量中通过后方交会原理确定相机的位置, 通过核线匹配原理进行同名点匹配, 最后采用光束法平差原理, 对相机的内外方位元素和空间点坐标一起进行计算.

3.2.6 面形偏差计算

面形偏差计算采用了 CAD 面形转换法, 它是用测量点和设计的 CAD 曲面 (与实际天线尺寸相对应的曲面) 直接进行转换. 其转换原理为: 坐标转换的初值可以手工输入或者通过公共点转换法计算给出, 然后将测量点投影到理论面上, 以投影点为公共点的设计坐标, 重新进行坐标转换, 获得新的转换参数, 然后重复上述步骤, 直到测量点相对于 CAD 曲面的点位精度最高时停止迭代计算^[6,8]. 图 8 为用 CAD 转换法计算的过程.

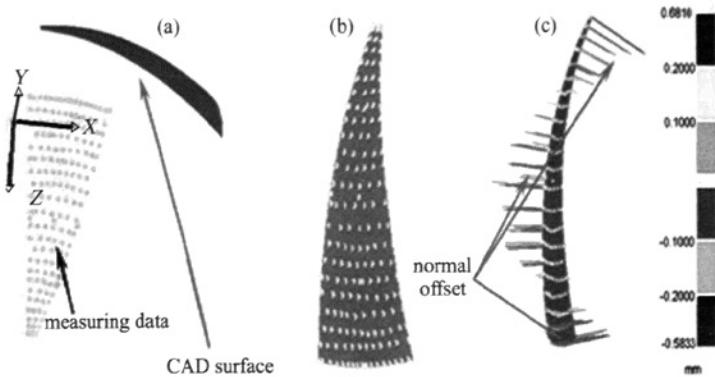


图 8 CAD 面形转换法计算过程

Fig. 8 The process of CAD surface conversion algorithm

对于 13.7 m 天线测量, 为使天线在其主要工作状态达到最大增益, 测量和调整主要在天线的 52° 姿态进行。在此姿态下对天线主面进行测量并根据计算得到的面形偏差结果进行调整, 直至主面的面形精度满足要求, 在此阶段共测量调整了 6 次。

由于测量数据多, 现将主面在 52° 姿态下调整前和调整后的测量结果列出, 如表 1。

表 1 主面的调整结果 (单位: mm)

Table 1 The results of the adjustment of the main reflector panel (unit: mm)

Adjustment date	CAD best fitting RMS
2009-07-10 (before adjustment)	0.768
2009-07-24 (after adjustment)	0.083

经过 6 次反复调整, 最终 13.7 m 天线的 CAD 拟合面形偏差 RMS 达到 0.083 mm, 达到了预期的调整要求。

4 结论

根据初步的望远镜观测结果显示, 调整后天线电信号的效率提高为原来的 2 倍, 达到了比较理想的效果。

从以上的测量与调整结果, 可以看出工业数字摄影测量方法应用于射电望远镜天线测量的可行性和可靠性:

- (1) 测量精度高, 此次测量中单点的测量精度可达 0.03 mm, 能够满足 13.7 m 天线测量的精度要求;
- (2) 测量方便灵活, 受空间条件的限制较少, 可以在任意姿态对天线进行测量, 这在重力变形测量中可以看出;
- (3) 测量速度快, 短时间可采集大量的数据, 而且处理是由计算机软件自动处理, 大大提

高了工作效率。

利用工业数字摄影测量技术对 13.7 m 天线的测量，解决了传统测量方法中的种种局限性和测量难题，充分体现了摄影测量在天线测量中自动化程度高、劳动强度小、测量精度高等优势，同时也为今后摄影测量在天文领域中的天线测量积累了有益的经验。

致谢 感谢南京中科天文仪器有限公司的邓其元、黄开平工程师对此工作的帮助和支持。

参 考 文 献

- [1] <http://www.pmodlh.ac.cn/>
- [2] 韩溥, 吕静, 吴文达, 等. 天文学报, 1994, 35: 209
- [3] 黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用. 天津: 天津大学, 2005
- [4] 王保丰, 李广云, 李宗春, 等. 测绘工程, 2007, 16: 42
- [5] 王之卓. 摄影测量原理. 北京: 测绘出版社, 1979: 157-164
- [6] 王保丰. 计算机视觉工业测量系统的建立与标定. 郑州: 解放军信息工程大学测绘学院, 2004
- [7] <http://chenweikeji.cn/> V-STARS 系统
- [8] 李宗春. 天线测量理论、方法及应用研究. 郑州: 解放军信息工程大学测绘学院, 2003: 49-51

Application of Digital Industrial Photogrammetric Technology to Measure the Surface Accuracy of 13.7 m Millimeter-wave Radio Telescope Antenna

FAN Qin-hong¹ FAN Sheng-hong¹ ZUO Ying-xi² LI Yang² SUN Ji-xian²

YANG Ji² LI Jing-jing² XU Ye² HE Deng-yun²

(1 Zhengzhou Sunward Technology Limited Company, Zhengzhou 450001)

(2 Qinghai Station of Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Delingha 817000)

ABSTRACT In this paper, the surface accuracy of 13.7 m millimeter-wave radio telescope antenna is measured by digital industrial photogrammetric technology. In order to overcome the inconvenience introduced by local conditions, the circular orbits are used to transport the camera and wireless transmission is used to take on-line photos. Measuring targets are made of retro-reflective material. All camera stations are orientated and the homologous image points are matched automatically by the coded targets. The 3D point coordinates are calculated by the bundle adjustment method. Using the methods of CAD surface conversion algorithm and best fitting to calculate the deviation value of the surface, the RMS of the 480 points gotten from CAD best fitting algorithm is adjusted to 0.083 mm. The feasibility and superiority of photogrammetric technology, which is used to measure the radio astronomy antenna's surface, is demonstrated.

Key words telescopes, instrumentation: miscellaneous

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>