



射电望远镜天线主反射面面形测量方法综述

班友^{1,2}, 刘源杰^{1,2}, 王娜^{2*}, 古丽加依娜·哈再孜汗², 冯树飞³

1. 新疆大学智能制造现代产业学院(机械工程学院), 乌鲁木齐 830017;

2. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011;

3. 东莞理工学院机械工程学院, 东莞 523808

*联系人, E-mail: na.wang@xao.ac.cn

收稿日期: 2023-07-14; 接受日期: 2023-10-11; 网络出版日期: 2023-12-26

国家重点研发计划(编号: 2021YFC2203501)、国家自然科学基金(编号: 12303094, 52165053)、新疆维吾尔自治区自然科学基金(编号: 2022D01C683)、中国博士后科学基金(编号: 2021M702751, 2023T160549)和广东省基础与应用基础研究基金(编号: 2020A1515111043)资助项目

摘要 射电望远镜主反射面面形精度是影响望远镜性能最重要的因素之一, 因此主反射面面形测量的研究和应用是评价和补偿天线性能的重要基础. 本文梳理了经纬仪测量法、激光测量法、全息测量法、摄影测量法等主要的大型反射面天线主反射面的面形精度测量技术, 并对每种测量方法的原理和应用案例进行了说明和总结, 为 QTT 天线的主面测量技术提供参考.

关键词 射电望远镜, 面形精度, 面形测量方法

PACS: 06.20.-f, 06.30.-k, 07.07.DF, 95.55.Jz

1 引言

大口径反射面天线是射电天文、深空探测等领域不可或缺的观测设备, 它的反射面精度直接影响其电性能, 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. 为了实现更高的观测分辨率、更远的通信距离和更强的深空探测能力, 天线主反射面的口径越来越大、工作频段越来越高^[1], 对其面形精度要求也愈加苛刻. 为了保证大型高频段射电望远镜天线主反射面的高精度要求, 减少天线主反射面面形精度偏差造成的电性能损失, 需要对天线主反射面面形误差来源进行分析和测量, 以保证其能够正常工作. 本文

首先概述了大型射电望远镜天线主反射面的误差来源, 之后对一些重要的天线主反射面测量技术原理和应用情况进行了总结说明, 为正在建设的新疆奇台 110 m 口径高频段全可动射电望远镜天线(QTT)主面快速测量的技术需求提供参考.

2 天线主面面形误差来源

射电望远镜天线的主反射面误差主要来源于两个方面. 一方面是源于加工制造和装配等初始机械误差, 目前反射面多采用蜂窝夹层以及蒙皮结构面板, 使用负压成型工艺制造, 如某 6 m 天线的 2 m×1 m 单块面板

引用格式: 班友, 刘源杰, 王娜, 等. 射电望远镜天线主反射面面形测量方法综述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54: 219503
Ban Y, Liu Y J, Wang N, et al. Review of measurement methods for the main reflection surface of radio telescope antennas (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2024, 54: 219503, doi: [10.1360/SSPMA-2023-0246](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0246)

反射面面形精度(RMS)优于 0.06 mm ^[2].

另一方面, 天线主反射面面形的误差主要由重力^[3,4]、温度^[5,6]、风载^[7-11]等环境载荷造成的结构变形所产生. 首先, 大型全可动天线在不同工况下其结构会有不同的重力变形, 且其副面和撑腿等部件也会有较大的变形误差, 从而会引起天线指向精度变化和主面面形变化^[12,13]. 其次, 天线表面温度变化会引起天线面板和背架结构的形变误差, 从而影响天线主面面形精度和指向精度^[14]. 例如上海65 m天线在日照温度变化 3°C 时, 其面形精度就会从 0.60 mm 变为 0.66 mm ^[15]. 此外, 不同量级的风速也会引起天线主反射面不同程度的变形误差, 影响天线的分辨率和灵敏度, 严重时会导致天线无法正常工作^[16,17].

由工程实际可知, 加工制造和装配等造成的射电望远镜天线主反射面表面初始误差量级较小, 且这些误差不具有实时性, 可以通过提升面板加工精度和预调等方式改善. 而天线受环境载荷变化影响所产生的变形误差具有较强的实时性, 并且这些误差会严重影响天线正常观测效率. 因此, 需要对天线主反射面进行较好的测量, 为提升或改善天线主反射面精度提供依据, 以保证其实现所需的电性能.

3 天线主反射面面形测量方法

早期天线主反射面面形应用过自动化程度较低的机械测量方式, 如三坐标仪测量法等, 这类测量方法效率低, 对天线口径限制很大, 不适合安装好的天线主面反射面面形的快速测量, 本文不再介绍.

随着技术的发展, 速度更快、精度更高的测量技术不断涌现并得到应用, 如经纬仪测量、全站仪测量、激光跟踪仪测量、射电全息测量、摄影测量等. 以下对这些测量方法的原理和应用情况进行说明.

3.1 经纬仪测量法

经纬仪测量法是国外早期大型反射面天线所采用的主面面形测量方法, 从测量方式上可划分为经纬仪钢带尺测量法和电子经纬仪交汇测量法.

3.1.1 经纬仪钢带尺测量法

经纬仪钢带尺测量法是较早使用的主反射面面形测量方式, 它的测量系统由一个经纬仪和一个钢带尺

组成, 其中经纬仪用于测角, 钢带尺用于测量从反射镜轴上的一点(通常是顶点)到天线主反射面上一点的距离. 钢尺需要沿着主面表面铺设或在两点之间拉伸, 同时要注意对钢带尺的凹陷进行修正, 此方法一般在天线处于仰天工况时进行测量, 30 m 范围内单点测距精度在 $\pm 0.2\text{ mm}$ 左右. 20世纪80年代, Greve^[18,19]使用该方法对德国Effelsberg 100 m 射电望远镜主反射面进行了初始设置. 同样使用该方法, 西班牙IRAM 30 m 反射面天线的主面在测量后通过调整使其初始表面精度达到了 $150\text{ }\mu\text{m}$.

3.1.2 电子经纬仪测量法

电子经纬仪测量法主要是以三维空间交汇理论为基础, 测量时通过布置多个经纬仪组成交汇测量系统, 解算出被测目标的空间位置. 在测量范围内(几米到几十米), 测量精度可达 $0.01\text{--}0.2\text{ mm}$ ^[20,21]. 其测量方式如图1所示.

澳大利亚Parkes 64 m 望远镜天线采用该方法测量了其在温度和风等环境载荷影响下的主反射面面形精度, 实验得到该方法的测量误差约为 $1\text{--}1.5\text{ mm}$ ^[22]. 国内多以莱卡公司开发的T3000系列电子经纬仪系统进行天线主面面形测量. 解放军信息工程大学利用该电子经纬仪和TC2003经纬仪组成的交汇测量系统应用在大型天线精密安装的测量中, 测量距离 20 m , 系统在 4 h 内测量722个点, 测量精度优于 0.3 mm , 天线调整后的主反射面面形均方根优于 0.5 mm ^[23]. 中国电子科技集团公司第五十四研究所使用莱卡公司生产的T3000/

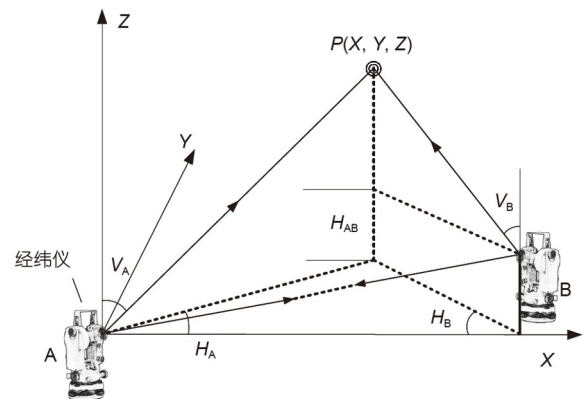


图1 电子经纬仪测量法工作示意图^[20]

Figure 1 The working intention of electronic theodolite measuring [20]. Copyright©2022, China Academic Journal Electronic Publishing House.

T2000s系列电子经纬仪工业测量系统对面积约为 600 m^2 的多波束天线主面进行测量, 测量距离 10 m , 用时 2 h , 测量精度为 $0.1\text{--}0.15\text{ mm}$, 经过多次的测量调整后, 将天线的面形精度控制在 0.67 mm 左右^[24], 也可以为大口径天线反射面天线主面面形测量提供一定参考.

从上述案例可以看出经纬钢带尺法只能在天线处于仰天工况时进行主面面形测量, 局限性较大. 而电子经纬仪测量系统测量一个点的时间约为 $5\text{--}7\text{ s}$ ^[25], 那么它对大型射电望远镜天线完成一次面形测量耗时较长, 测量速度较慢, 这两种测量方法适用于天线安装初期.

3.2 激光测量法

随着光学技术的发展, 激光测量在测绘领域应用越来越广泛. 全站仪测量法、激光跟踪测量法和激光扫描测量法逐渐应用到天线主面面形测量中. 国外在20世纪70年代开发出了基于激光测距的角度测量仪, 用于测量和调整美国国家射电天文台(NRAO)的一个 65 m 射电望远镜的主面面形精度以保证其能满足面形要求^[26].

3.2.1 全站仪测量法

全站仪是随着测绘、电子、机械等诸多学科的发展而出现的现代化测绘仪器. 其在经纬仪测角的基础上加入了激光测距功能, 利用极坐标的方式进行测量. 测量时操作全站仪测量一个斜距 S 和两个角度(水平角 α , 俯仰角 β)就可以得到被测点的三维坐标^[27]. 原理如图2所示.

全站仪具有测量范围广、可自由设站、测量成本低和测量时间相对较短等优点^[28], 在反射面天线主面面形测量中得到广泛应用. 例如, 1982年建立的日本野边山 45 m 毫米波射电望远镜, 经过全站仪的测量调整, 得到其主面面形精度优于 0.2 mm ^[29]. 1984年Greve和Harth^[30]将激光测距仪安装在经纬仪上组成测量系统, 用在调整 30 m 毫米波射电望远镜(MRT)主反射面面形上, $3\text{--}20\text{ m}$ 范围内的绝对测量精度可达到 $1/1000000$. 20世纪80年代Arecibo望远镜在安装时采用全站仪进行测量, 控制网的绝对精度达到 1 mm . 1998年美国GBT天线计量组对GBT 100 m 天线使用定制的全站仪进行测量, 得到主反射面表面精度约为 1.1 mm ^[31].

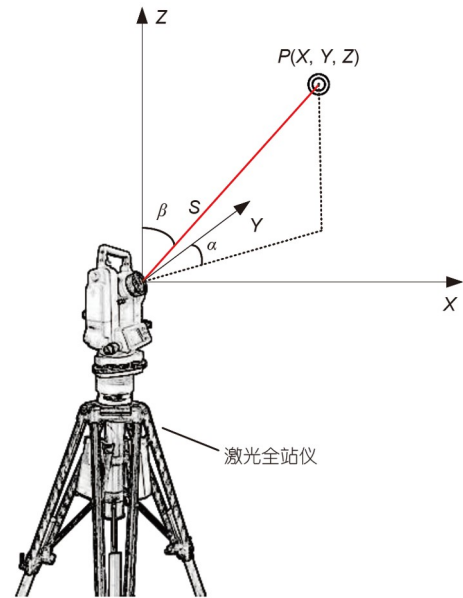


图2 激光全站仪测量法工作示意图

Figure 2 Schematic diagram of laser total station measurement.

2002年NASA在分析重力对深空网络 70 m 反射面天线(DSN)的影响时, 利用了莱卡TDM-5000全站仪系统, 分别在5个不同的仰角下对天线反射面靶标进行测量, 得到位置误差约 0.76 mm ^[32].

国内也应用全站仪测量系统做了许多测量工作, 中国电子科技集团公司第三十八研究所利用莱卡TS30全站仪测量系统对某平面天线进行面形测量, 该全站仪距离测量精度最高可以达到 $0.6\text{ mm}+1\text{ ppm}$, 测得天线平面精度为 0.249 mm ^[33]. 中国电子科技集团公司第三十九研究所利用全站仪对中国科学院国家天文台 70 m 大型射电望远镜天线座的安装调整进行跟踪, 保证了天线所有指标符合要求^[34]. 解放军信息工程大学提出了一种全站仪/INS组合位姿确定方法, 用于测量并确定馈源舱位姿, 满足了FAST总体运行对馈源舱位姿精度的要求^[35].

3.2.2 激光跟踪仪测量法

激光跟踪仪在全站仪的基础上加入了光线反馈功能, 使仪器能够自动跟踪目标. 相较于前两种测量方式消除了人为影响, 极大地提高了测量精度和效率. 以API公司的T3型激光跟踪仪为例, 一般在测量距离小于 60 m 时, 它的三维空间静态测量精度为 $5\text{ }\mu\text{m/m}$, 动

态测量精度可达到 $10\text{ }\mu\text{m/m}$ ^[36].

激光跟踪仪主要由激光跟踪头、目标反射镜和配套的控制系統组成. 测量方式如图3所示. 工作时由激光跟踪头向被测目标上放置的反射镜发射激光, 系统在接收到反射光线后自动计算出激光头与反光镜的距离 r , 联合当前的水平角 φ 和俯仰角 θ , 根据球坐标原理(式(1))即可解算出目标点的空间坐标^[37].

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi, \\ y &= r \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi, \\ z &= r \cdot \cos\theta. \end{aligned} \quad (1)$$

该设备也有许多的应用, 例如智利北部的ALMA 12 m天线在建造初期使用Faro激光跟踪仪测量并调整主反射面, 测量精度为 $25\text{ }\mu\text{m}$, 将天线主反射面面形精度调整到 $35\text{ }\mu\text{m}$. 张洁等人^[38]使用激光跟踪仪对7.3 m天线进行载荷动态测量, 得到天线背架上的振动变形. 胡静等人^[39]进一步改良了API公司的LTS-3000激光跟踪仪测量系统, 将反射镜面安装在一个可移动的小车上从而保证光路不间断, 并在激光跟踪仪上安装了一个高精度电子罗盘以获得角度信息, 克服了大型天线测量时光路易断的缺点. 此改进系统在50 m测量范围的动态精度为5 ppm ($\mu\text{m/m}$), 极大地提高了此类设备的测量效率. 陈佳夷等人^[40]使用4台激光跟踪仪搭建了测量系统来测量一抛物面天线, 成功测得了天线的面形参数.

3.2.3 激光扫描测量法

激光测量方式进一步发展到激光扫描测量. 激光扫描仪测量速度快, 测量精度一般在 $\pm 0.2\text{ mm}$ 左右^[41]且不需要合作靶标, 能够在很短的时间里建立被测目标的三维形貌, 被广泛用于三维建模和测量中. 它的测量方式如图4所示, 激光扫描仪采用干涉式测量法测量激光头到被测目标的距离, 再结合激光扫描头记录的角度信息, 可计算得到被测目标中某一点的空间位置, 经过电机驱动进行扫描后即可得到大量三维点云数据, 继而获得被测件的三维形貌.

2009年Starti等人^[42]已经使用激光扫描仪测量了天线主反射面面形, 他们选用Trimble-Mensi公司的GS200激光扫描仪对意大利Medicina和Noto的两个32 m射电望远镜天线进行测量, 并分析了重力对天线主反射面面形精度的影响. 该设备测量范围在100 m

左右时精度为3 mm, 使用它能够较好地得到天线焦距变化规律, 但面形测量结果并不理想. 2013年Holst等人^[43]利用激光扫描仪对德国Effelsberg 100 m望远镜主反射面面形进行测量, 测量距离为30–50 m, 分析了扫描仪的系统误差以便提高测量的准确性. 2017年Holst等人^[44]又使用相同的方法分别测量并分析了Onsala 20 m和Effelsberg 100 m天线在重力载荷下参考点的稳定性和主面板的位移情况. Rasha^[45]用激光扫描仪测量了AUT 30 m射电望远镜的主面面形, 得到其主面表面均方根值约为3 mm, 该天线表面在不同仰角下均未发现明显的重力变形.

国内也应用该类设备做了许多测量工作, 上海天文台在对65 m天线进行安装时, 引入了Riegl VZ400激

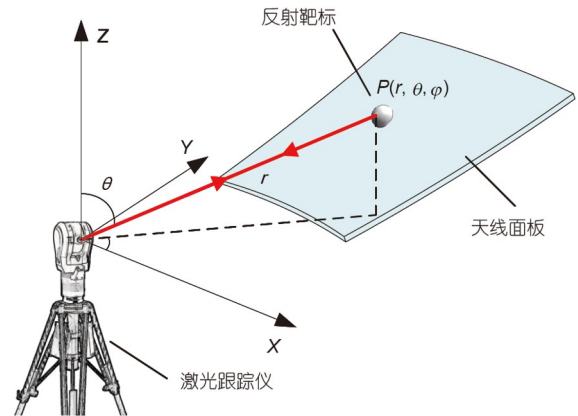


图3 激光跟踪仪测量法工作示意图

Figure 3 Schematic diagram of the laser tracker measurement method.

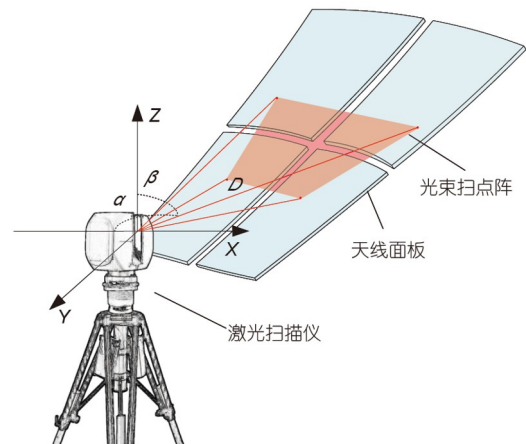


图4 激光扫描测量法工作示意图

Figure 4 Schematic diagram of the laser scanning measurement.

光扫描仪对天线背架的几何尺寸进行快速测量, 在 30 m 范围内扫描仪系统点位精度约为 ± 0.98 mm^[46]. 中国科学院国家天文台利用 s150 三维激光扫描仪对天津武清 70 m 口径天线的主面面形进行测量, 其在 150 m 量程内测距误差为 ± 1 mm, 实验中采集了 6.4 万个点, 耗费约 1 h, 实现了对其面板变形的监测^[47]. 贺燕等人^[48]详细介绍了激光雷达的工作原理和特点, 并在 SAR 天线上进行了测试实验, 成功完成了对整个网状天线的扫描, 得到其面形精度为 2.94 mm.

对比可见, 激光扫描测量方式相比于全站仪和激光跟踪仪, 具有测量速度更快的优点, 但是当测量距离太大时它的测量精度损失较大. 因此, 需要根据天线口径大小等实际情况选择合适的激光测量方式.

3.3 微波全息测量法

全息测量法是利用天线主面面形变化量与天线远区电磁辐射场强之间的映射关系, 在测量得到天线远场幅值方向图和相位方向图后, 使用傅里叶变换解算得到天线表面节点位移, 继而获得天线主面面形精度. 微波全息测量法具有测量精度高、测量周期短等优点, 它在 20 世纪 60 年代被提出, 但直到 80 年代才得到应用, 且近几十年来逐渐受到世界各国天文界的重视, 已被评为是一种较为理想的测量天线反射面精度的方法^[49-51]. 目前, 该方法的相关测量理论已趋于成熟, 应用案例也较为丰富. 全息法根据有无参考天线可分为相位干涉测量法和相位恢复测量法.

3.3.1 相位干涉测量法

相位干涉测量法需要另外一台参考天线协同, 也可叫做相位参考测量法. 测量方式如图 5 所示, 需要在被测量天线附近布置一台姿态不变的天线, 用来接收射电源信号作为参考, 在对参考信号和远场信号分析计算后可得到被测量天线面形精度. 相位干涉测量法根据测量天线频率要求的不同, 选择的信号源也不同, 主要有宇宙源、人造卫星源和人造高塔信号源等^[52].

20 世纪 80 年代, Morris 等人^[53]采用微波全息法测量了 IRAM 30 m 望远镜的反射面, 测量精度为 25 μm , 测量时以 1.75 m 天线作为参考, 得到天线有效表面精度约为 65 μm . 2006 年应用在大型毫米波天线阵 ALMA 12 m 口径毫米波天线上时, 测量误差小于 10 μm , 调整后的反射面精度优于 20 μm ^[54]. 2014 年 Yebes 实验室采

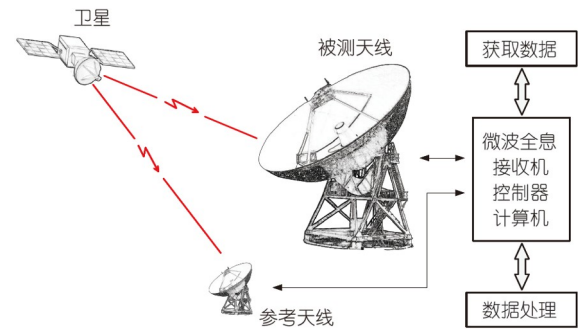


图 5 微波全息测量法工作示意图^[52]

Figure 5 Working diagram of microwave holography measurement [52]. Copyright©2018, Electronic Design Engineering.

用该方法测量了 Yebes 40 m 天线的表面精度, 将表面精度从 485 μm 调整到 194 μm , 极大地提高了天线的接收效率^[55]. 国内, 上海天文台利用该方法对佘山 25 m 射电望远镜表面精度进行测量, 调整后天线表面精度从 0.94 mm 提高到 0.52 mm^[56]. 中国科学院新疆天文台 25 m 射电望远镜天线长期运行后老化趋势严重面板精度降低, 为改进面板精度, 尽可能地提高天线高频波段观测效率, 于 2015 年对天线进行了升级改造, 主反射面增加至 26 m 并利用微波全息法对其进行了天线主面面形检测^[57].

3.3.2 相位恢复测量法

相较于相位干涉测量法, 相位恢复测量法不需要参考天线, 只需要将馈源置于不同位置(对焦、正离焦、负离焦)测得幅度方向图后使用相应算法(Misell 和 OOF 算法等)迭代即可计算得到天线主面面形精度. 美国 GBT 天线利用该方法测量其反射面精度时, 测量精度可以达到 100 μm ^[58]. 西班牙 IRAM 30 m 天线应用该方法测量并将天线表面精度调整到 50 μm ^[59]. 国内, 殷兴辉等人^[60]利用该方法对紫金山天文台 13.7 m 天线进行快速测量, 测试精度约 0.16 mm, 测得天线面形精度约为 0.248 mm. 2016 年, 王锦清等人^[61]对天马 65 m 天线进行测量, 将表面精度调整到 0.28 mm, 在 Ka 波段上效率由原来的 37% 改善到约 56%. 2021 年, Sun 等人^[62]再次使用该方法对天马 65 m 天线进行测量、调整, 并将其表面精度提升至 0.19 mm. 由实际应用可知, 微波全息测量法可以对任意口径的射电望远镜天线进行测量, 且能在满足测量精度的同时对更大口径的天线具有更好的适用性.

3.4 摄影测量法

随着工业检测对实时性要求的不断提高, 工业摄影测量技术迅速发展起来, 并在目标的空间坐标测量与三维重建、空间中目标的几何尺寸测量和大型目标的空间三维姿态监测等方面逐渐得到应用^[63].

摄影测量法的优点非常明显, 它的测量精度高且适用于动态测量^[64], 能够在设备安装调整后快速测量得到天线主反射面面形. 为保证测量的精度、降低环境对成像质量的影响, 摄影测量法的工作距离一般小于 100 m, 因此摄影测量一般又称为近景摄影测量^[65]. 其测量方式如图 6^[66]所示, 根据三角交汇原理, 在不同角度对测量目标进行拍摄, 获得两张及以上图像, 经过计算机数字图像处理得到被测目标的精确三维空间坐标^[67].

国际学者较早对近景摄影测量的相关理论、算法及硬件设备进行了研究, 并将成果应用到工业测量领域. 德国的Luhmann教授^[68]对摄影测量时的光源、成像传感器、相机镜头、相机模型、摄站排布、图像处

理和被测物体坐标系的物理尺度等参数的确定做了大量研究工作. 美国GSI公司开发的V-STARS系统配备有专业的智能测量相机INCA3a, 该相机镜头经过专业设计与加工, 镜头畸变小, 相机内参数在出厂前已经过检校, 相机内参数已知并且很稳定^[69].

在使用相机对天线测量前一般先在天线反射面上粘贴一定数量的测量标志, 反光靶标实物粘贴如图 7 所示. 注意在天线反射面上粘贴标志时应尽可能地拟合天线面形, 并根据天线的大小和测量距离适当调整粘贴反光标志的大小, 在测量得到标志点的坐标后通过拟合计算即可以得到主反射面面形精度.

1962年摄影测量已经应用在射电望远镜上, 分别测量了NRAO的300英尺(91.44 m)和85英尺(约26 m)的天线, 且都能满足测量要求^[70]. 新墨西哥天文台对VLA天线的主反射面进行了多次测量, 反射面重复测量精度可达 $65\ \mu\text{m}$, 满足高精度测量需求^[71]. 2001年GSI公司开发了基于微处理器控制的胶片相机, 用于测量阿雷西博300 m口径的大型射电望远镜在第二次升级后的主面面形精度, 他们在天线上共计安装了6台摄像机, 对天线表面的40000个直径7 cm的标志进行摄影测量, 目标的均方根值达到0.3 mm, 相当于百万分之一的精度^[72,73]. Gale等人^[74]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, 推算出主面面形测量误差为 $70\ \mu\text{m}$, 经过调整后的天线反射面误差约为 $100\ \mu\text{m}$. Subrahmanyam^[75]测量澳大利亚22 m卡塞格伦反射面天线的结构重力变形, 得到 $1/500000$ 的相对测量精度和 $1/60000$ 的绝对精度. Buffa等人^[76]

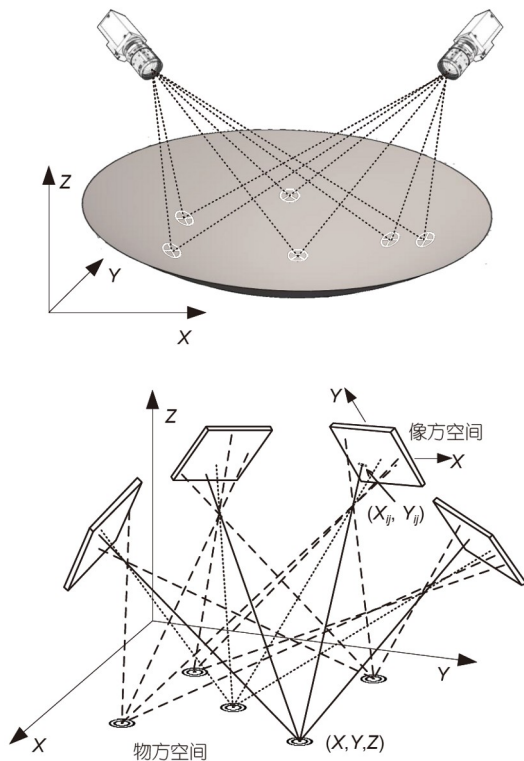


图 6 摄影测量法工作示意图^[66]

Figure 6 Schematic diagram of the method of photogrammetry [66]. Copyright©2010, Acta Astronomica Sinica.



图 7 天线主面摄影测量靶标粘贴实物图

Figure 7 Primary reflector photogrammetry targets.

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面形变化的影响,并将有限元模型与摄影测量结果进行了详细匹配.

国内多采用V-STARs测量系统对天线主反射面面形进行摄影测量,该测量系统的三维测量精度能达到 $4\text{ }\mu\text{m}+4\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$.解放军信息工程大学采用该测量系统测量50 m天线在某一工作状态下的主面面形精度,该系统的点位测量精度优于0.11 mm,在对1196个标志点进行测量后计算得到天线面形精度为0.4 mm^[77].中国电子科技集团公司第三十九所利用V-STARs/S8系统,测量了某66 m抛物面天线受重力影响时的主面面形精度,测量完成后将天线面形精度调整到0.25 mm^[78].赵艳等人^[79]测量某12 m抛物面通讯天线主面面形时,使用吊车将相机吊装至天线上方对面板进行拍摄测量,测量精度为 $5\text{ }\mu\text{m}+5\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$,计算得到天线面形精度为0.78 mm.紫金山天文台为测量13.7 m毫米波天线的主面面形,专门根据现场条件设计了环形轨道来输送相机进行测量,该测量系统的点位测量精度达到1/120000 (测量距离为5 m时,智能测量精度达到0.05 mm),经过6次反复调整后天线面形精度达到0.083 mm^[66].

此外,中国电子科技集团公司第五十四所使用解放军信息工程大学的DPM摄影测量系统测量某12 m天线的面形,经过三次测量调整后,将主面面形精度提升至0.294 mm,满足0.5 mm的面形精度设计要求^[80].中国电子科技集团公司第三十九所利用郑州辰维科技公司开发的MPS摄影测量系统对某15 m抛物面天线进行测量,经过多次的测量调整后,天线的反射面精度达到0.31 mm,实现了天线系统电性能的恢复^[81].

相机在进行测量时,测量精度会受环境影响,如相机受到振动时可能会导致测量失效.中国科学院光电技术研究所研究了振动对航空CCD相机成像质量的影响,利用调制传递函数(MTF)对成像质量进行评价,指出角位移是主要影响因素,并提出了减震设计方法以提高成像质量^[82].除了环境会影响摄影测量精度之外,天线反射面上标志点分布情况和摄像机(摄站)的布置方式也会影响天线主面面形的测量精度.上述测量案例中,对于尺寸相对较小的天线,只需要将相机在地面按照空间交汇原理进行布置并标定完成后即可进行测量,而对更大型的天线,需要使用特殊方式布置相机(摄站),如吊车吊装相机、无人机吊装相机等方

式进行拍摄测量.

摄影测量法在监测桥梁等大型构件变形中的应用,也可以为QTT, FAST等有远距离摄影测量需求的大型反射面天线测量提供思路和良好的参考.如薛爱新等人^[83]对桥塔的外观进行检测,在小于300 m的范围内通过摄影测量的方式观测桥塔表面病害情况.测量中的最大误差为 $\pm 0.1\text{ mm}$,满足工程监测需求. Vasi-leva等人^[84]设计了一种工程结构长期远程监测系统,为保持其高性能,所有计算操作由FPGA (现场可编程逻辑门阵列)完成,在距离50 m时测量精度达到0.45 mm,即使在恶劣环境下也能满足这一测量精度.武汉大学陈思和仲思东^[85]设计了一套基于CCD相机的桥梁变形三维实时监测系统.对桥梁的监测涉及到许多复杂环境情况,特别是拍摄距离问题,如图8所示,实验中为了进行相隔2000 m的远距离拍摄,使用长焦望远镜镜头提高了相机在拍摄测量时的精度,该系统在500 m的距离进行测量时误差在1 mm以下.以上案例可为大型天线主面面形精度的摄影测量提供参考.

3.5 其他测量方法

除了以上测量方式外,一些新的、实时性更好的主面面形测量方法也逐渐得到应用,主要有光电角度传感器测量法、光电图像位移测量法和反射面粘贴加速度传感器测量方法.这些测量方法是在反射面天线经过前期大量校准,将主面面形精度调整到一个较高的工作精度后再使用的测量方式,其本质是测量面板间微小角度和位移的相对变化量.然后经过计算来评估天线主面整体面形精度.可为大型天线主反射面面形快速测量提供参考.

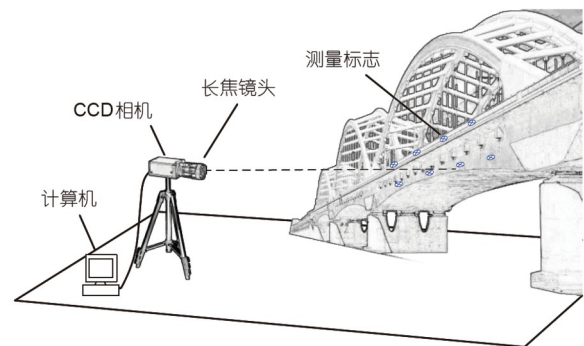


图8 桥梁摄影测量示意图

Figure 8 Schematic diagram of bridge photogrammetry.

3.5.1 光电传感器测量法

(1) 光电角度传感器测量法

光电角度传感器测量系统由一个光电角度传感器和一个反射镜组成^[86]. 其测量方式如图9^[87]所示, 将反射镜和光电传感器分别固定在会产生相对位移的两个实体上, 当两个实体产生相对位移或角度变化时, 系统能够检测出变化值, 通过合理地布置传感器后经计算可以分析出天线主面面形变化情况.

俄罗斯的Konyakhin等人^[88-90]多年来研究光电角度传感器测量系统在反射面天线上的应用, 开发了曲面非线性光电控制系统, 建立了相应的数学模型, 并将其应用于测量RT-70 m天线的指向精度. Dang和Konyakhin^[91]为了控制RT-70 m反射面天线副反射面和主反射面结构受重力、风载以及温度等自然载荷引起的主面面形变化, 研究了两种光电角度传感器面形测量方案及对应的计算方法. 王从思等人^[87]提出了放置于面板边缘的光电角度传感器面形测量法, 该方法将光电角度传感器放置于天线主面每块小面板边缘处, 可以测量天线面板之间的相对角度变化. 该方法具有一定的实时性, 其Matlab仿真计算结果表明该方法可以用于大口径反射面天线面板调整时的高精度测量.

(2) 光电图像位移测量法

如图10所示, 光电图像位移测量系统由放置在被测面节点处的光源和放置在固定基底处的感光仪器两个部分组成. 其中感光仪器由物镜和光电COMS矩阵接收机组成, 用于接收节点处的发射光线, 经过算法处理后能快速测得反射面各连接点处的变形情况.

Konyakhin等人^[92]提出基于三角法的RT-70 m射电望远镜主反射面面形测量系统, 此系统由几个独立的基本单元组成, 每个基本单元只包含一个物镜和一个光电耦合装置(COMS矩阵接收机), 整个系统能同时测量40个点的位置, 在工作距离为25 m时计算机模拟误差和实验误差在0.05 mm左右, 能够满足射电望远镜结构变形的快速测量需求. 2013年, Arakantsev等人^[93]和Usik等人^[94]介绍了一种监测RT-70 m天线面形的光电系统, 列出了该系统的参数包括物镜焦距和接收阵列个数以及光源类型, 还有光电接收仪和光源在反射面上的布置方式, 建立了相应的线性模型, 分析得到在15 m的测量距离内实际测量误差不超过0.025 mm, 在30 m距离上测量误差不超过0.1 mm, 满足测量要求. Li等人^[95,96]提出了多矩阵光电测量系统,

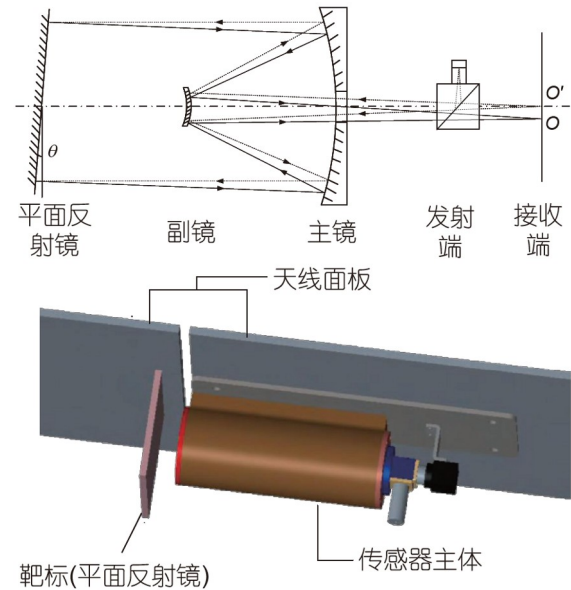


图9 光电角度传感器测量法示意图^[87]

Figure 9 Schematic of angle sensor measurement [87]. Copyright©2019, Science China Press.

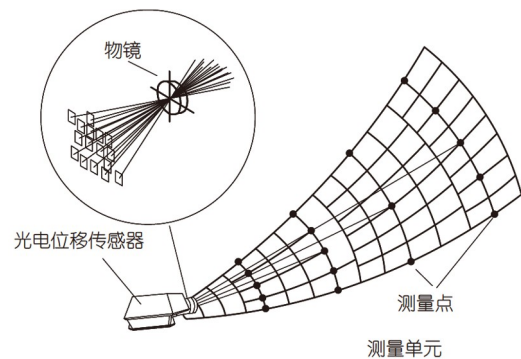


图10 光电图像位移测量法示意图

Figure 10 Schematic diagram of photoelectric image displacement measurement method.

能够在21 s内实现多点位测量, 该系统在6 m的基底上布置24个光电接收仪器, 每个测量仪能够同时测量天线上19个发光光源标志, 实验表明在30 m距离上的均方根期望误差不超过0.05 mm.

3.5.2 反射面粘贴加速度传感器测量法

加速度传感器测量的是天线面板的微小位移量, 测量速度快, 精度高, 能做到微米级的位移检测精度, 适合风载等快速变化的载荷影响下的主面面形测量.

Snel等人^[97]已在ALMA天线上布置了加速度传感器,用来测量风载荷作用下的动力学特性.

3.6 测量方法对比

为更好地梳理每种测量方式的原理、精度和特点,将四种主要的天线测量方法总结如表1. 首先经纬仪测量法、全站仪测量法和激光跟踪仪测量法测量速度相对较慢,适合反射面天线建造初期安装时的测量,不适合天线运行时主反射面面形的快速测量与调整. 其次,激光扫描测量法能够在天线任意工况下进行主面面形快速测量,但测量精度受距离影响很大,不适合超大口径天线主面面形的测量,全息测量法测量时不受天线口径限制,但每次测量都需要将天线转到固定的角度与相应的射电源配合才能完成测量,耗时较长,适合用于天线主反射面表面面形精度的定期维护. 最后,摄影测量、光电传感器测量等方法测量速度更快、精度更高,更适合大口径天线主面面形快速测量,有很好的应用前景. 可见天线反射面测量方式正向着非接触、实时性更好、测量精度更高的方向发展.

4 讨论与总结

本文综述了射电望远镜天线主反射面面形测量的方法,介绍了每种测量方法的原理,并列举了每种测量方法的国内外应用情况,有助于了解反射面天线面形测量方法的发展趋势,为射电望远镜天线主面面形测量方法的选择提供一定参考.

当前射电望远镜正朝着更大口径、更高频段的方向发展,与几米到几十米尺寸的天线对比,新型大口径天线的主反射面测量距离更远、测量精度要求更高. 并且,现有的各种测量技术的测量精度易受到风、温度和湿度等环境因素的影响,所以超大口径高性能反射面天线的主面面形高精度快速测量为测量技术带来了更大的挑战.

QTT将会成为国际典型的高性能超大口径反射面天线,其重约6000吨,主反射面口径为110 m,并且天线设计需要满足15 MHz到115 GHz的宽频带、高灵敏度观测要求,主面精度在不用主动面调整的情况下要求达到0.6 mm,采用主动面时初期达到0.3 mm,经长期运行校准后达到0.2 mm^[98-100]. 如此大的主反射面尺寸下要实现较为快速的面形高精度测量,给测量技术提出了更高的要求:

(1) 远距离下的高精度测量: 要保证主面面形在长期运行时保持在0.2 mm的精度,那么测量仪器50 m范围内测量精度要高于0.07 mm,这对测量技术是一个很大的挑战.

(2) 任意工况下的快速测量: 需要保证在数分钟内获取整个天线的主面面形,最好能做到全天候测量.

(3) 体积小且非接触的测量设备: 该系统在进行面形测量时,必须要保证设备本身重量轻且遮挡少,保证不会影响到射电望远镜的正常运行.

(4) 抗干扰能力强的测量设备: QTT整体都暴露在室外,要保证测量系统在受到温度、湿度、风等环境影响时的远距离测量精度.

表 1 反射面天线主反射面面形测量方法总结

Table 1 Summary of main reflector measurement methods for reflector antenna

测量方法		原理	测量距离 (m)	测量精度	测量速度	是否接触测量	靶标
经纬仪测量	经纬仪尺带法	角度+钢尺	<30	0.1–0.2 mm	最慢	是	需要
	电子经纬仪	交汇测量	<50	0.01–0.2 mm		否	
激光测量	全站仪		<200	0.2–1.0 mm	慢	是	需要
	激光跟踪仪	球坐标原理	<60	10 μm/m	较快	是	需要
	激光扫描仪		<70	<0.2 mm	快	否	不需要
全息测量	相位干涉测量	微波信息变化	任意口径	0.05–0.5 mm	快	否	不需要
	相位恢复测量						
摄影测量		三角交汇原理	<200	4 μm+4 μm/m	快	否	需要
其他测量方法	光电传感器测量	相对位置变化	<30	0.05 mm	最快	否	需要
	加速度传感器		任意口径	微米级	最快	是	不需要

综合以上要求并结合本文所综述的方法可知, 单纯的经纬仪测量法、激光测量法等显然不能满足 QTT 这样高性能、超大口径天线的快速测量要求. 而摄影测量法、光电图像位移测量法具有测量距离远、速度

快、精度高和非接触等优点, 若能有效补偿由环境引起的误差, 并与主反射面主动调整技术相结合, 将会在天线主面面形快速测量与调整技术上有更好应用前景.

参考文献

- Li Z C, Li G Y. Measuring Theory, Technique and Application of Antenna (in Chinese). Beijing: Surveying and Mapping Press, 2009 [李宗春, 李广云. 天线几何量测量理论及其应用. 北京: 测绘出版社, 2009]
- Feng Z G, Zheng Y P. A method to manufacture reflector panel with high surface precision (in Chinese). Radio Commun Technol, 2009, 35: 39–41 [冯贞国, 郑元鹏. 一种高精度天线反射面制造方法. 无线电通信技术, 2009, 35: 39–41]
- von Hoerner S. Design of large steerable antennas. Astron J, 1967, 72: 35
- Greschik G. Truss beam with tendon diagonals: Mechanics and designs. AIAA J, 2008, 46: 557–567
- Wang C S, Yuan S, Liu X, et al. Temperature distribution and influence mechanism on large reflector antennas under solar radiation. Radio Sci, 2017, 52: 1253–1260
- Ning L, Lei Z, Liu Y H, et al. Analysis of solar thermal deformation of large aperture radio telescope panels (in Chinese). Technol Market, 2022, 29: 78–80 [宁亮, 雷震, 刘宇华, 等. 大口径射电望远镜面板日照热变形分析. 技术与市场, 2022, 29: 78–80]
- Huang Q Q, Qin X Z, Huang H Y. Analysis of stress and strain on radar antenna based on wind loads (in Chinese). Modern Radar, 2007, 29: 99–102 [黄琼琼, 秦显柱, 黄红艳. 雷达天线风荷的应力应变分析. 现代雷达, 2007, 29: 99–102]
- Liu Y, Qian H L, Fan F. Reflector wind load characteristics of the large all-movable antenna and its effect on reflector surface precision. Adv Steel Constr, 2016, 12: 380–409
- Liang W, Huang J, Zhang J. A new adaptive system for suppression of transient wind disturbance in large antennas. Int J Antennas Propag, 2019, 2019: 1–13
- Gawronski W. Modeling wind-gust disturbances for the analysis of antenna pointing accuracy. IEEE Antennas Propag Mag, 2004, 46: 50–58
- Gawronski W, Mellstrom J A, Bienkiewicz B. Antenna mean wind torques: A comparison of field and wind-tunnel data. IEEE Antennas Propag Mag, 2005, 47: 55–59
- Li Z, Zhang H B, Kong D Q, et al. Design of a control system of compensation for the focal displacement of feed of a 50 m antenna (in Chinese). Astron Res Technol, 2009, 6: 271–275 [李喆, 张洪波, 孔德庆, 等. 50米天线馈源焦点偏移补偿控制系统的设计. 天文研究与技术, 2009, 6: 271–275]
- Fu L, Dong J, Ling Q B, et al. Effect of gravity deformation of TianMa telescope structure on the surface and pointing accuracy (in Chinese). Chinese J Radio Sci, 2017, 32: 314–322 [付丽, 董健, 凌权宝, 等. 天马望远镜结构重力变形对面形和指向精度影响. 电波科学学报, 2017, 32: 314–322]
- Qian H L, Liu Y, Fan F, et al. Non-uniform temperature field and effects of Shanghai 65 m radio telescope (in Chinese). Opt Precis Eng, 2014, 22: 970–978 [钱宏亮, 柳叶, 范峰, 等. 上海65 m射电望远镜非均匀温度场及其效应. 光学精密工程, 2014, 22: 970–978]
- Li G, Li Z C, Mou A G. An experimental research on sunshine temperature effect upon the back structure of the 65 m radio telescope (in Chinese). Acta Astron Sin, 2013, 54: 189–198 [李干, 李宗春, 牟爱国. 65 m射电望远镜背架结构日照温度效应实验研究. 天文学报, 2013, 54: 189–198]
- de Young D S, Vogiatzis K. Numerical simulations of airflow in very large telescope enclosures. In: Proceedings of the 2nd Backaskog Workshop on Extremely Large Telescopes. Backaskog, 2004, 5382: 379–387
- Fu L, Wang Y F, Qian H L. The effect of mean wind power on antenna surface accuracy and pointing accuracy of the TianMa telescope (in Chinese). Prog Astron, 2019, 37 [付丽, 王宇飞, 钱宏亮. 平均风作用对天马望远镜面形精度和指向精度的影响. 天文学进展, 2019, 37]
- Greve A. Metrology of the Effelsberg 100 meter radio reflector. Zeitschrift Vermessungswes, 1981, 106: 308–315
- Greve A. Reflector surface measurements of the IRAM 30 m radio telescope. Int J Infrared Milli Waves, 1986, 7: 121–135
- Wang J J, Di X, Jin S K, et al. Industrial measurement system based on an electronic theodolite and precision analysis (in Chinese). Acta Armamentarii, 2002, 23: 392–394 [王晋疆, 邸旭, 金素坤, 等. 电子经纬仪工业测量系统及精度分析. 兵工学报, 2002, 23: 392–394]

- 21 Li X P. Contactless 3D precision positioning measurement system with electronic theodolite as sensor (in Chinese). *Eng Surv Mapp*, 1995, 1: 31–37 [李小鹏. 以电子经纬仪为传感器的无接触三维精密定位测量系统. *测绘工程*, 1995, 1: 31–37]
- 22 Puttock M J, Minnett H C. Instrument for rapid measurement of surface deformations of a 210ft radio telescope. *Proc Inst Electr Eng UK*, 1966, 113: 1723
- 23 Li Z C, Li G Y, Tang T S, et al. Electronic multi-theodolite measuring system applied in the precision installation of a large antenna (in Chinese). *Hydrographic Surv Charting*, 2005, 25: 26–30 [李宗春, 李广云, 汤廷松, 等. 电子经纬仪交会测量系统在大型天线精密安装测量中的应用. *海洋测绘*, 2005, 25: 26–30]
- 24 Jin C, Lu Z H, Li G Y, et al. Application of industrial measurement system in multi-beam antenna installation and detection (in Chinese). *J PLA Coll Surv Mapp*, 1998, 15: 173–177 [金超, 芦志辉, 李广云, 等. 工业测量系统在多波束天线安装检测中的应用. *解放军测绘学院学报*, 1998, 15: 173–177]
- 25 Fang P Z. Modern industrial geodesy system with electronic theodolite as sensor (in Chinese). *Eng Surv*, 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]
- 26 Payne J M. An optical distance measuring instrument. *Rev Sci Inst*, 1973, 44: 304–306
- 27 Li G Y. The state of the art and applications of the industrial measuring systems (in Chinese). *Eng Surv Mapp*, 2001, 10: 36–40 [李广云. 工业测量系统最新进展及应用. *测绘工程*, 2001, 10: 36–40]
- 28 Li G Y, Fan B X. The development of precise engineering surveying technology (in Chinese). *Acta Geodaetica et Cartographica Sin*, 2017, 46: 1742–1751 [李广云, 范百兴. 精密工程测量技术及其发展. *测绘学报*, 2017, 46: 1742–1751]
- 29 Morimoto M. Results from nobeyama radio observatory (NRO)—A progress report. *Astrophys Space Sci*, 1986, 118: 63–65
- 30 Greve A, Harth W. Laser-diode distance meter in a KERN DKM 3A theodolite. *Appl Opt*, 1984, 23: 2982–2984
- 31 Hall R, Goldman M A, Parker D H, et al. Measurement program for the green bank telescope. In: *Proceedings of the Advanced Technology MMW, Radio, and Terahertz Telescopes*. Kona, 1998, 3357: 265–276
- 32 Brenner M, Britcliffe M J, Imbriale W A. Gravity deformation measurements of 70 m reflector surfaces. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2002, 44: 187–192
- 33 Zhu K. Application of total station measurement system in antenna surface accuracy measurement (in Chinese). *Sci Technol Vision*, 2015, 14: 82 [朱凯. 全站仪测量系统在天线表面精度测量中的应用. *科技视界*, 2015, 14: 82]
- 34 Yan H T, He X G, Zhang J Y, et al. Installation and adjustment of antenna pedestal for 70 m large radio telescope (in Chinese). *Electro-Mech Eng*, 2022, 2: 38 [阎宏涛, 贺新刚, 张洁钰, 等. 70 m大型射电望远镜天线座的安装与调整. *电子机械工程*, 2022, 2: 38]
- 35 Zhang Z F, Chen C X, Zhan W C, et al. Total stations/INS integrated method for measurement of FAST feed cabin (in Chinese). *J Nav Positioning*, 2017, 5: 105–110 [张志峰, 陈楚湘, 詹婉婵, 等. 全站仪/INS组合确定FAST馈源舱位姿. *导航定位学报*, 2017, 5: 105–110]
- 36 Sun H L, Yao L B, Zhou Y Y, et al. Analysis of measurement accuracy of laser tracker (in Chinese). *J Geodesy Geodyn*, 2015, 35: 177–181 [孙海丽, 姚连璧, 周跃寅, 等. 激光跟踪仪测量精度分析. *大地测量与地球动力学*, 2015, 35: 177–181]
- 37 Zhang B, Peng J. Laser tracker system for measurement (in Chinese). *Metrol Meas Technol*, 2006, 26: 5–6 [张博, 彭军. 激光跟踪测量系统. *计量技术*, 2006, 26: 5–6]
- 38 Zhang J, Huang J, Liang W, et al. A correction method of estimating the pointing error for reflector antenna. *Shock Vib*, 2018, 2018: 1–12
- 39 Hu J, Gu Y G, Zhai C, et al. A smart car for the surface shape measurement of large antenna based on laser tracker (in Chinese). *Mach Electron*, 2013, 9: 52–54 [胡静, 顾永刚, 翟超, 等. 基于激光跟踪仪的大型天线面形测量的辅助系统. *机械与电子*, 2013, 9: 52–54]
- 40 Chen J Y, Wang C, Huo T F, et al. Research on detection method of large-aperture aspheric surface by laser tracker (in Chinese). *J Appl Opt*, 2021, 42: 299–303 [陈佳夷, 王聪, 霍腾飞, 等. 激光跟踪仪检测大口径非球面方法研究. *应用光学*, 2021, 42: 299–303]
- 41 Zhang Q F, Sun X S, Wang L. Research of methods to test accuracy of RIEGL VZ-400 laser scanner based on simple six-range analytical method (in Chinese). *Geotech Invest Surv*, 2011, 39: 63–66 [张启福, 孙现申, 王力. 基于简易六段法的RIEGL VZ-400激光扫描仪精度测试方法研究. *工程勘察*, 2011, 39: 63–66]
- 42 Sarti P, Vittuari L, Abbondanza C. Laser scanner and terrestrial surveying applied to gravitational deformation monitoring of large VLBI telescopes' primary reflector. *J Surv Engi*, 2009, 135: 136–148
- 43 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
- 44 Holst C, Schunck D, Nothnagel A, et al. Terrestrial laser scanner two-face measurements for analyzing the elevation-dependent deformation of

- the on-sala space observatory 20 m radio telescope's main reflector in a bundle adjustment. *Sensors*, 2017, 17: 1833
- 45 Rasha A R. Analysis and optimization of the AUT 30 metre radio telescope: Pointing and surface. Dissertation for Master's Degree. Auckland: Auckland University of Technology, 2016
 - 46 Li G, Li Z C, Li G Y, et al. Application of Riegl VZ400 laser scanner in detection of 65 m antenna backrest (in Chinese). In: Proceedings of the National Engineering Survey 2012 Technical Symposium. Shenyang, 2012 [李干, 李宗春, 李广云, 等. Riegl VZ400激光扫描仪在65 m天线背架检测中的应用. 见: 全国工程测量2012技术研讨交流论文集. 沈阳, 2012]
 - 47 Fu L B, Liu J J, Ren X, et al. Rapid inspection method and accuracy analysis of large antenna panel deformation (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2022, 51: 0612002 [付连波, 刘建军, 任鑫, 等. 大型天线面板形变快速检测方法和精度分析. 光子学报, 2022, 51: 0612002]
 - 48 He Y, Liu Y, Wang D W, et al. The principle of laser radar and the application in measuring mesh antenna (in Chinese). *Shanghai Meas Test*, 2013, 1: 13–17 [贺燕, 刘勇, 王东伟, 等. 激光雷达扫描仪原理及在网状天线测量中的应用. 上海计量测试, 2013, 1: 13–17]
 - 49 Rahmat-Samii Y. Microwave holography of large reflector antennas—Simulation algorithms. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1985, 33: 1194–1203
 - 50 Yang K Z. Antennas of the Deep Space Survey (in Chinese). Beijing: Posts & Telecom Press, 2014 [杨可忠. 深空探测天线. 北京: 人民邮电出版社, 2014]
 - 51 Morris D, Hein H, Steppe H, et al. Technical memorandum: Phase retrieval radio holography in the Fresnel region: Tests on the 30 m telescope at 86 GHz. *IEE Proc H Microw Antennas Propag UK*, 1988, 135: 61
 - 52 Bai Y, Qin S Y. Holography measurement methods of large reflector antenna surface accuracy (in Chinese). *Electron Design Eng*, 2018, 26: 84–88 [白杨, 秦顺友. 大型反射面天线表面精度的全息测量方法. 电子设计工程, 2018, 26: 84–88]
 - 53 Morris D, Baars J W M, Hein H, et al. Radio-holographic reflector measurement of the 30 m millimeter radio telescope at 22 GHz with a cosmic signal source. *Astron Astrophys*, 1988, 203: 399–406
 - 54 Baars J W M, Lucas R, Mangum J G, et al. Near-field radio holography of large reflector antennas. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2007, 49: 24–41
 - 55 López-Pérez J A, de Vicente Abad P, Lopez-Fernandez J A, et al. Surface accuracy improvement of the Yebes 40 meter radiotelescope using microwave holography. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, 62: 2624–2633
 - 56 Wang J Q, Yu H. The measurement of the precision of antenna's surface with holograph (in Chinese). *Shanghai Astron Obs Ann*, 2007, 28: 109–118 [王锦清, 余宏. 全息法测量天线表面精度. 中国科学院上海天文台年刊, 2007, 28: 109–118]
 - 57 Pei X, Li J, Chen M Z, et al. Holographic measurement system of Nanshan 26 m telescope in Xinjiang astronomical observatory (in Chinese). *Astron Res Technol*, 2017, 14: 288–296 [裴鑫, 李健, 陈卯蒸, 等. 新疆天文台南山26米天线全息法测量系统. 天文研究与技术, 2017, 14: 288–296]
 - 58 Nikolic B, Prestage R M, Balser D S, et al. Out-of-focus holography at the Green Bank Telescope. *Astron Astrophys*, 2007, 465: 685–693
 - 59 Morris D, Bremer M, Butin G, et al. Surface adjustment of the IRAM 30 m radio telescope. *IET Microw Antennas Propag*, 2009, 3: 99
 - 60 Yin X H, Xu Z C, Han P, et al. Real-time detection of surface accuracy of large antenna (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2000, 15: 229–231 [殷兴辉, 徐之材, 韩溥, 等. 大型天线表面精度实时检测. 电波科学学报, 2000, 15: 229–231]
 - 61 Wang J Q, Zuo X T, Zhao R B, et al. TM65 m radio telescope microwave holography (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 099502 [王锦清, 左秀婷, 赵融冰, 等. TM65 m射电望远镜面形微波全息测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 099502]
 - 62 Sun Z X, Wang J Q, Yu L F, et al. Research on the panel adjustment method of an active main reflector for a large radio telescope. *Res Astron Astrophys*, 2021, 21: 038
 - 63 Yu Q F, Lu H W, Liu X L. Image-based Precision Measurement and Motion Measurement (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002 [于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量. 北京: 科学出版社, 2002]
 - 64 Feng W H. Close photogrammetry: Lecture 4 analytical method close photogrammetry (2) (in Chinese). *Surv Mapp Technol*, 1989, 4: 6 [冯文灏. 近景摄影测量: 第四讲 解析法近景摄影测量(二). 测绘技术, 1989, 4: 6]
 - 65 Chen C, Jiang X Y, Zhang X M, et al. The research on the application of close-range photogrammetry in the landslide monitoring (in Chinese). *Urban Geotech Invest Surv*, 2015, 1: 105–108 [陈楚, 姜兴钰, 张学民, 等. 近景摄影测量在滑坡监测中的应用研究. 城市勘测, 2015, 1: 105–108]
 - 66 Fan Q H, Fan S H, Zuo 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 Astron Sin*, 2010, 2: 210–216 [范钦红, 范生宏, 左营喜, 等. 基于数字摄影测量量技

- 术的13.7 m毫米波天线面形检测. 天文学报, 2010, 2: 210–216]
- 67 Li G Y, Li Z C. The Principles and Applications of Industrial Measuring Systems (in Chinese). Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011 [李广云, 李宗春. 工业测量系统原理与应用. 北京: 测绘出版社, 2011]
- 68 Luhmann T. 3D imaging: How to achieve highest accuracy. In: Proceedings of the Videometrics, Range Imaging, and Applications XI. Munich, 2011, 8085: 11–21
- 69 Feng W H. Introduction of V-STARs industrial camera measurement system (in Chinese). Wtism Bull Sci Technol, 2000, 4: 42–47 [冯文灏. V-STARs型工业摄像测量系统介绍. 测绘信息与工程, 2000, 4: 42–47]
- 70 Findlay J W. Operating experience at the National Radio Astronomy Observatory. *Ann New York Acad Sci*, 1964, 116: 25–40
- 71 Butler B, Ruff J, Thunborg J. Photogrammetric measurement of VLA and VLBA subreflectors and VLA primary reflector. VLA Test Memo #220, National Radio Astronomy Observatory, 1999
- 72 Fraser C S. Microwave antenna measurement. *Photogramm Eng Remote Sens*, 1986, 52: 1627–1635
- 73 Edmundson K, Baker L. Photogrammetric measurement of the arecibo primary reflector surface. In: Proceedings of the 17th Annual Coordinate Measurement Systems Committee Conference. Albuquerque, 2001. 13–17
- 74 Gale D M, Schloerb F P, Huerta A L, et al. Photogrammetry mapping and alignment of the LMT 50 meter primary reflector. In: Proceedings of the Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III. Austin, 2018, 10706: 1203–1212
- 75 Subrahmanyam R. Photogrammetric measurement of the gravity deformation in a Cassegrain antenna. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2005, 53: 2590–2596
- 76 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
- 77 Wang B F, Li G Y, Li Z C, et al. Application of high accuracy digital photogrammetry technology in a 50 meter large antenna (in Chinese). *Eng Surv Mapp*, 2007, 16: 42–46 [王保丰, 李广云, 李宗春, 等. 高精度数字摄影测量技术在50 m大型天线中的应用. 测绘工程, 2007, 16: 42–46]
- 78 Yang Y Z, Lv C J. The application of digital photogrammetry technology in the measurement of paraboloid surface accuracy and gravity deformation (in Chinese). *China New Technol Prod*, 2014, 4: 9–10 [杨永忠, 吕传景. 数字摄影测量技术在抛物面天线型面精度, 重力变形测试中的应用. 中国新技术新产品, 2014, 4: 9–10]
- 79 Zhao Y, Huang M, Zhang Q. V-STARs based photogrammetry system and its application in paraboloid antenna testing (in Chinese). *J Hebei Univ Technol*, 2012, 41: 6–9 [赵艳, 黄敏, 张强. V-STARs摄影测量系统及其在抛物面天线测量中的应用. 河北工业大学学报, 2012, 41: 6–9]
- 80 Cheng Z F, Jin C, Sun W. Application of digital photogrammetry in main surface measurement of large antenna (in Chinese). *J Hebei Acad Sci*, 2019, 36: 47–50 [程志峰, 金超, 孙伟. 数字摄影测量在大型天线主面测量中的应用. 河北省科学院学报, 2019, 36: 47–50]
- 81 Zang X P. Application of digital industrial photogrammetry to realize antenna reflector pose recovery (in Chinese). *J Astron Metrol Meas*, 2017, 37: 16–21 [张新盼. 应用数字工业摄影测量实现天线反射体姿态恢复. 宇航计测技术, 2017, 37: 16–21]
- 82 Qian Y X, Cheng X W, Gao X D, et al. Effect of vibration on imaging quality of airborne CCD camera (in Chinese). *Electron Opt Control*, 2008, 15: 55–58 [钱义先, 程晓薇, 高晓东, 等. 振动对航空CCD相机成像质量影响分析. 电光与控制, 2008, 15: 55–58]
- 83 Xue A X, Liu Y L, Wang P Y. Application of close-range photogrammetry technology in tower health monitoring of cable-stayed Bridges (in Chinese). *J China Foreign Highway*, 2017, 37: 90–93 [薛爱新, 刘晏玲, 王培玉. 近景摄影测量技术在斜拉桥桥塔健康监测中的应用研究. 中外公路, 2017, 37: 90–93]
- 84 Vasileva A V, Vasilev A S, Konyakhin I A. Vision-based system for long-term remote monitoring of large civil engineering structures: Design, testing, evaluation. *Meas Sci Technol*, 2018, 29: 115003
- 85 Chen S, Zhong S D. 3D real-time bridge deformation detection system based on CCD (in Chinese). *Comput Meas Control*, 2006, 14: 583–585 [陈思, 仲思东. 基于CCD的桥梁变形三维实时监测系统. 计算机测量与控制, 2006, 14: 583–585]
- 86 Chen Y, Zhang X D, Lu X L, et al. Current situation and development trend of autocollimator (in Chinese). *OME Inform*, 2011, 28: 6–9 [陈颖, 张学典, 逯兴莲, 等. 自准直仪的现状与发展趋势. 光机电信息, 2011, 28: 6–9]
- 87 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: 099506 [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: 099506]
- 88 Konyakhin I, Stepashkin I, Petrochenko A. System of the optic-electronic sensors for control position of the radio telescope elements. In:

- Proceedings of the Optical Sensing and Detection IV. Brussels, 2016, 9899: 688–693
- 89 Konyakhin I A, Timofeev A N, Usik A A, et al. Optic-electronic systems for measuring the angle deformations and line shifts of the reflecting elements at the rotateable radio-telescope. In: Proceedings of the Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII. Munich, 2011, 8082: 1127–1132
- 90 Konyakhin I A, Kopylova T V, Konyakhin A I. Optic-electronic autocollimation sensor for measurement of the three-axis angular deformation of industry objects. In: Proceedings of the Optical Sensing and Detection II. Brussels, 2012, 8439: 424–430
- 91 Dang D D, Konyakhin I A. Optic-electronic autocollimation system for measuring line and angular deformation. In: Proceedings of the Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII. 2021, 11782: 465–472
- 92 Konyakhin I, Artemenko Y, Timofeev A. Control of the deformation for the millimeter wave range radiotelescope mirrors. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Instrumentation Science and Technology. Shenyang, 2009, 7133: 969–974
- 93 Arakantsev K G, Konyakhin I A. Approximation of large radio telescope surface with measurement data of optic-electronic stereoscopic system. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation. Chengdu, 2013, 8759: 807–812
- 94 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
- 95 Li R, Igor K, Hoa T M, et al. Multi-matrix opto-electronic system for measuring deformation of the millimeter range radiotelescope elements. [Optoelectron Lett](#), 2019, 15: 144–146
- 96 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
- 97 Snel R C, Mangum J G, Baars J W M. Study of the dynamics of large reflector antennas with accelerometers. [IEEE Antennas Propag Mag](#), 2007, 49: 84–101
- 98 Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 783–794 [王娜. 新疆奇台110米射电望远镜. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 783–794]
- 99 Wang N, Xu Q, Ma J, et al. The Qitai radio telescope. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2023, 66: 289512
- 100 Ban Y, Feng S, Vandenbosch G A E, et al. Calculation of the best fit subreflector and its application in eliminating the harmless error of deformed large subreflectors. [IEEE Trans Antennas Propag](#), 2020, 68: 5855–5863

Review of measurement methods for the main reflection surface of radio telescope antennas

BAN You^{1,2}, LIU YuanJie^{1,2}, WANG Na^{2*}, GULJAINA Kazezkhan² & FENG ShuFei³

¹ School of Intelligent Manufacturing Modern Industry (School of Mechanical Engineering), Xinjiang University, Urumqi 830017, China;

² Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

³ School of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China

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

The accuracy of the main reflector surface is one of the most significant factors influencing radio telescope performance. Thus, research on and application of main reflector surface measurement are an important foundation for evaluating and compensating the antenna performance. In this review, theodolite measurement, laser measurement, holographic measurement, photogrammetry, and sensor measurement are assessed, and the principles and application cases of each measurement method are explained and summarized to offer a reference for the main surface measurement technology of QTT.

radio telescope, reflector accuracy, reflector measurement method

PACS: 06.20.-f, 06.30.-k, 07.07.DF, 95.55.Jz

doi: [10.1360/SSPMA-2023-0246](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2023-0246)