

引用格式: FU Lianbo, LIU Jianjun, REN Xin, et al. Rapid Inspection Method and Accuracy Analysis of Large Antenna Panel Deformation[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(6):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[J].光子学报,2022,51(6):0612002

大型天线面板形变快速检测方法和精度分析

付连波^{1,2},刘建军^{1,2},任鑫^{1,2},严韦^{1,2},孔德庆^{1,2},陈王丽¹,黄海^{1,2},高兴焯¹

(1 中国科学院国家天文台 中国科学院月球与深空探测重点实验室,北京 100101)

(2 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:大型天线面板在使用的过程中受到环境及自身重力的影响,不可避免会发生形变,对天线性能产生影响。针对大型天线面板形变的快速动态检测需求,设计了基于高精度三维激光扫描仪的天线面板形变测量方案。采用拟合抛物面的算法进行点云数据配准,统计学和曲面拟合算法进行滤波和天线面板形变分析,通过测量、分析处理天线面板点云数据,获得了 70 m 天线面板形变信息,实现了高效率、高精度和自动化的大型天线面板形变检测。

关键词:大型天线;形变分析;快速检测;三维激光扫描仪;点云数据处理;精度分析

中图分类号:TN82

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225106.0612002

0 引言

大型天线在建造过程中,需要通过形变测量进行数次调整来达到天线面板结构的设计要求。同时大型天线使用过程中,由于受到温度、风、冰霜、雨雪等自然因素和自身重力的影响,天线结构随着时间的推移和天线俯仰角的变化,会不可避免地会发生变形。这些天线面板形变会严重影响天线的性能参数。天线面板辐射能量集束程度的相对损失可以用增益损失^[1]来计算,当天线使用的是 X 频段,天线面板形变为 1 mm,增益损失为 0.53 dB,对于 Ka 频段,天线面板形变为 1 mm,增益损失为 6.86 dB,天线性能严重下降。为了满足工程任务对天线面型快速调整和天线性能分析的要求,高效率、高精度的获取天线形变量非常重要。

天线面板形变测量可以分为传统测量方法、工业测量方法和射电全息法。传统测量方法包括样板法、经纬仪带尺法等;工业测量方法按照仪器的不同可以分为,光学经纬仪测量方法、全站仪测量方法和摄影测量方法;射电全息法按照射电源的距离可以分为远场射电全息法和近场射电全息法。曲永欣等^[2]采用样板方法对小型天线进行形变测量,测量精度为 0.2 mm。JACOB W M 等^[3]采用经纬仪带尺方法对 IRAM 30 m 的天线面板形变测量分析,测量精度达到 0.12 mm。李宗春等^[4]使用经纬仪方法对面积 600 m² 天线进行形变分析,其中测量数据时间 4 h,精度为 0.5 mm。阿雷西博望远镜采用全站仪方法测量天线控制网,精度达到 1 mm^[5]。王保丰等^[6]使用摄影测量方法对密云 50 m 天线进行形变分析,其中测量数据时间 1h,处理数据时间 9 h,精度达到 0.4 mm。BAARS J W M 等^[7]使用近场射电全息法方法对 ALMA12 m 天线进行测量分析,数据采集和处理时间数小时,精度为 0.01 mm。韩溥等^[8]使用远场射电全息法方法对 13.7 m 天线进行测量分析,数据采集 2.5 h,测量精度为 0.16 mm。

天线面板三大类测量方法,已经成功应用在不同的天线面板。传统的测量方法存在量程较小、测量过程较为繁琐等局限性;工业测量方法量程较大、精度较高、测量速度较快、自动化程度较高,但受环境影响较大;射电全息法具有量程无限制、精度较高的优点,但是测量数据时间长^[9]。此外,三种测量方法均对天线姿

基金项目:中国科学院重点部署项目(No.ZDBS-SSW-TLCOO1),国家自然科学基金(No.11803056),中国科学院太空应用重点实验室开放基金(No.LSU-2016-05-3)

第一作者:付连波(1993—),男,博士研究生,主要研究方向为天线面板形变分析和点云数据处理。Email: fulianbo@bao.ac.cn

导师(通讯作者):刘建军(1976—),男,研究员,博士,主要研究方向为月球与行星探测,行星遥感与制图。Email: liujj@nao.cas.cn

收稿日期:2021-12-14;**录用日期:**2022-03-03

<http://www.photon.ac.cn>

态有一定要求,实际操作过程中存在局限性。因此,采用以上方法测量大型天线面板形变,尽管可以实现高精度的测量,但天线面板数据的采集和数据处理都需要较长时间,同时测量过程中对测量环境、天线面板的姿态都有特殊的要求,大多需要专业测量人员完成,效率不高。

随着三维激光扫描技术的发展,近些年开始应用于大型天线面板的形变检测,例如, Effelsberg 100 m 望远镜^[10]、Onsala 20 m 望远镜^[11]和 Azel 32 m 望远镜等^[12]。在 Effelsberg 100 m 望远镜采用徕卡 HDS6100,点云数据的精度为 4 mm,使用了 orthogonal distance regression 算法分析天线面板不同俯仰角度焦距的变化。在 32 m AZ-EL 望远镜使用天宝 GS200,点云数据的精度是 1.5 mm,应用最小二乘法拟合天线面板点云数据获得天线面板的方程,比较不同俯仰角度焦距的变化。在 20 m Onsala 望远镜使用徕卡 P20,点云数据的精度是 1.5 mm,也是使用最小二乘法拟合天线面板点云数据获得天线面板的方程,比较不同俯仰角度焦距的变化。这些应用分析了不同俯仰角度天线面板受重力场的影响,随着三维激光扫描仪性能的提高,这为大型天线形变测量提供了新的技术途径,但如何在大型天线建造和使用过程中实现高效率、高精度和自动化的测量仍需做大量的工作研究。比如用于测量的扫描仪在天线上的安装布局,不同天线姿态的点云数据的配准,天线面板点云测量数据的有效滤波处理,天线形变量的快速获取方法等问题。

围绕上述问题,本文设计了基于高精度三维激光扫描仪测量天线面板形变的方案,构建了一套大型天线面板形变动态检测系统(以下简称 Large Antenna Panel Deformation Dynamic Detection System, LAP3D),并将其应用到我国天问一号火星探测工程建设的天津武清站亚洲最大的全可动 70 m 天线。通过测量、分析处理天线面板点云数据,获得了 70 m 天线面板形变信息,实现了高精度、高效率、自动化天线面板形变检测。

1 LAP3D 设计

以天问一号地面应用系统天津武清站 70 m 口径天线为测量对象。该 70 m 口径天线为轮轨式全可动卡塞格伦天线,工作频段为 S、X 和 Ka,总重约 2 700 t,高 72 m,主反射面直径 70 m,由 16 圈共 1 328 块高精度的实面板组成,面积 3 840 m²,是目前亚洲最大的单口径全可动天线,也是中国首个火星探测器主要的数据接收天线,天线面板结构示意图如图 1。

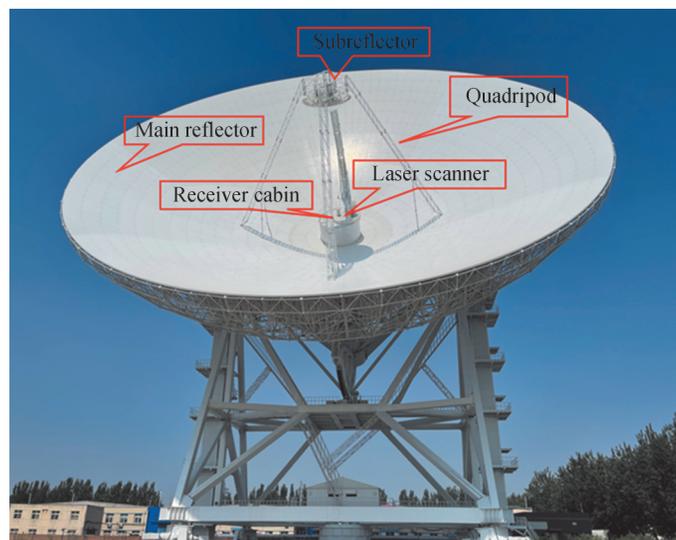


图 1 天线面板结构示意图

Fig. 1 Antenna panel structure schematic

LAP3D 包括天线面板数据采集和天线面板点云数据数据处理,数据采集主要目的是获得高质量天线面板点云数据;数据处理是对采集的天线面板点云数据进行滤波、配准和形变分析,实现获得天线面板形变信息的功能。

本文使用法如 s150 三维激光扫描仪。通过现场验证,将三维激光扫描仪放置在天线馈源仓上的方案,采集数据较为完整且实施起来比较安全,天线面板馈源仓顶部加工安装了 14 个立方体基座,方便后续天线面

板点云数处理。最终通过笔记本电脑远程控制三维激光扫描仪实现快速、完整和准确的天线面板数据采集。

三维激光扫描仪放置于一个固定在天线馈源旁的支架上,随着天线俯仰一同运动。在测量数据的过程中,笔记本电脑远程控制扫描仪,实现天线面板点云数据采集,并将采集数据传输至电脑。采用法如S150三维激光扫描仪测量天线面板数据,一个天线俯仰姿态角的单站点云数据量为2 500万个,数据获取时间为90 s。除了天线支撑结构和馈源的遮挡外,可测量获取天线面板大部分的点云数据,结果如图2。

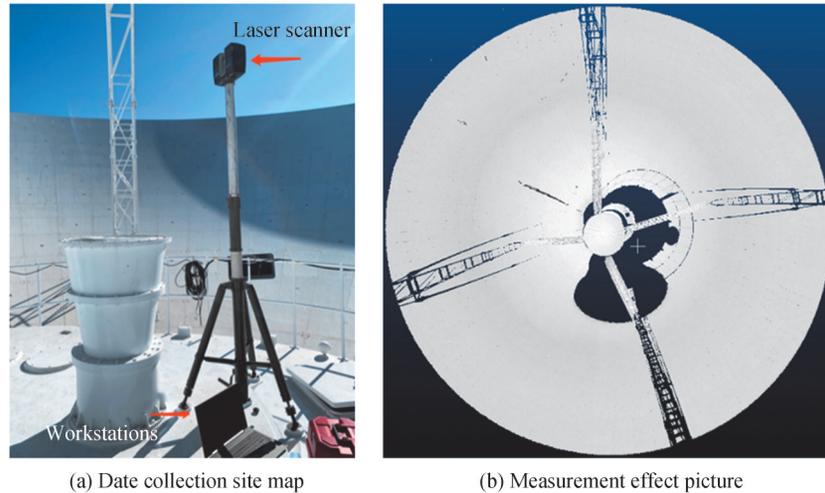


图2 天线面板点云数据采集
Fig.2 Antenna panel point cloud acquisition

三维激光扫描仪的激光发射器发射主动脉冲信号,经过天线表面漫反射,沿相同的路径传回到接收器,记录天线面板目标点到扫描仪的距离 s 、脉冲信号的垂直角度 β 和水平角度 α ,从而达到快速获取天线面板位置信息的目的。其测量原理如图3, O 点为三维激光扫描仪位置, P 点为天线面板目标点。

$$P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha \\ s \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \\ s \cdot \cos \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

LAP3D采用的是法如s150三维激光扫描仪(图4),其量程为150 m,测距误差 ± 1 mm,水平角精度和垂直角精度都是 $19''$ 。

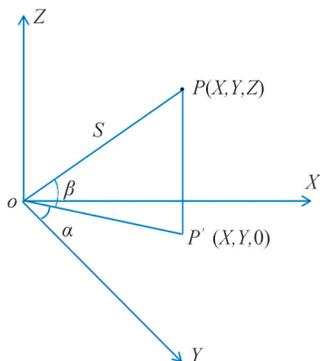


图3 三维坐标测量示意图
Fig. 3 Three-dimensional coordinate measurement schematic



图4 法如三维激光扫描仪
Fig. 4 Faro 3D laser scanner

天线馈源仓顶部平台设计安装的14个立方体基座(图5)。该基座外表面为精密加工的弧形,严格处于一个规则圆柱面上,据此可以确定天线理论模型的坐标原点。扫描仪对立方体基座的测量,可以测量基座最外弧形坐标,建立天线面板的测量坐标系与天线设计坐标系之间的转换关系。根据该坐标转换关系,实

现三维激光扫描仪观测点云数据的测量坐标与天线设计坐标系坐标的转换。

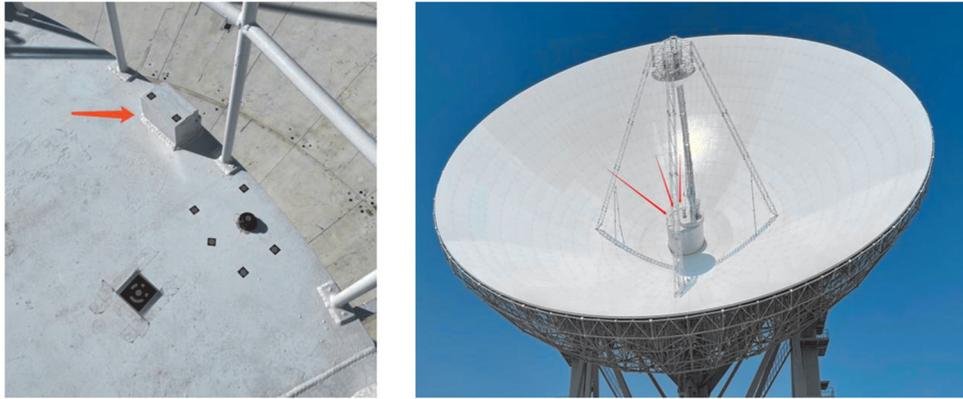


图5 武清70 m天线面板形变监测示意

Fig. 5 Wuqing 70 m antenna panel deformation monitoring schematic

提取立方体基座坐标的过程如下:通过交互方式选取立方体基座顶部的任意一点云数据,获得其点云坐标;以该选择点为圆心,立方体基座对角线长度为半径,采用半径搜索算法,获得立方体基座顶面附近点云;设置顶面高程阈值,根据选择点高程进行高程过滤,得到高质量顶部点云;采用平面模型的随机采样一致性算法^[13],进一步优化顶部点云,获得基座顶部最优点云数据;采用平面模型的最小二乘法^[14],拟合顶面平面模型,通过多次迭代,获得顶部最优平面模型;按照相同步骤处理,完成基座外表面点云数据提取和平面模型构建;根据立方体基座顶面和外表面的相交线,提取顶面和外表面的交线,取其线中心作为立方体基座坐标。

重复以上步骤,最少选择三个立方体基座的坐标用于实测天线面板的点云数据和天线面板理论模型的配准,最终实现实测点云数据和理论模型的粗配准功能。利用粗配准的点云数据实现滤波、精配准和形变量获取处理,实现LAP3D 70 m天线形变量的获取。

2 LAP3D数据处理算法

从天线面板获取的点云数据获取天线面板形变,需要对天线面板点云数据进行滤波处理,获取高质量的点云数据;天线面板实测点云数据和天线面板理论模型的配准,以及计算实测天线面板的点云数据到理论模型的距离,提取天线面板的形变信息。

2.1 数据滤波

实测天线面板点云数据包括天线面板点云数据和噪声点云数据。根据点云数据特点,采用特定算法滤波处理,获得高质量天线面板点云数据。

扫描仪测量天线面板数据过程中,会出现超出天线面板范围的点云数据;激光束的离散性,一个发射光束可能接收到不同物体返回的反射光束而产生的噪声点云数据;测量过程中受到震动、风、温度的影响引起的噪声等因素会产生不需要的点云数据。最终天线面板的点云数据包括噪声点云数据、超出范围其它点云数据、天线面板馈源和副反射面支架的点云数据、天线面板本身的点云数据。针对天线面板点云数据的特点,第一步采用Statistical Outline Remove算法对杂乱点云数据进行统计滤波;第二步采用Random Sample Consensus算法对点云数据进行滤波^[13],将副面和馈源的点云数据进行删除,并且对天线面板点云数据进行抽稀,获得高质量的点云数据;第三步对主面点云数据进行高次方程拟合,根据点云数据到拟合方程的距离,进行距离阈值滤波,最终通过以上三个步骤实现点云数据的高效滤波。

2.2 主面数据精配准和形变量获取

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。滤波以后的点云数据是高质量的点云数据,这时点云数据坐标作为抛物面节点进行拟合,最佳拟合剖面面也随即确定,可用6个参数表述最佳拟合抛物面^[15]。

根据最佳拟合抛物面的6个参数, $d_x, d_y, d_z, \varnothing_x, \varnothing_y$ 和 d_f , 其中 d_x, d_y, d_z 指的最佳拟合抛物面的顶点相对于理论抛物面顶点的偏移量, \varnothing_x 和 \varnothing_y 分别代表拟合抛物面的焦轴绕原坐标轴 x, y 的转角, d_f 焦距相对变化量, f 是天线面板焦距, 为 30 m。理论抛物面方程和最佳拟合抛物面方程可分别表示为

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

$$z = \frac{(x - d_x)^2 + (y - d_y)^2}{4(f + d_f)} + d_z + y \cdot \varnothing_x - x \cdot \varnothing_y \quad (3)$$

根据近似不等式

$$\frac{1}{4(f + d_f)} \approx \frac{1}{4f} \left(1 - \frac{d_f}{f}\right) \quad (4)$$

假设 p 点理论模型坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 与实测形变点 $p'(x'_p, y'_p, z'_p)$ 的轴向误差 Δz_p 可以表示为

$$\Delta z_p = z'_p - z_p = z'_p - \left(z_p - \frac{x_p}{2f} d_x - \frac{y_p}{2f} d_y + d_z + y_p \varnothing_x - x_p \varnothing_y - \frac{z_p}{f} d_f \right) \quad (5)$$

设有 n 个采样点, 其中 (x_s, y_s, z_s) 为第 s 个点的坐标, 偏移后该点的坐标表示为 (x'_s, y'_s, z'_s) 。实现实测点云数据和理论模型的最佳配准, 其轴向误差的平方和取最小, 则

$$T_w = \sum_{s=1}^n \Delta z_s^2 \quad (6)$$

T_w 值取最小的条件是最佳拟合抛物面的六个参数的偏导为 0, 即

$$\frac{\partial T_w}{\partial d_x} = 0, \frac{\partial T_w}{\partial d_y} = 0, \frac{\partial T_w}{\partial d_z} = 0, \frac{\partial T_w}{\partial \varnothing_x} = 0, \frac{\partial T_w}{\partial \varnothing_y} = 0, \frac{\partial T_w}{\partial d_f} = 0 \quad (7)$$

化简可得

$$A_n \beta = H_n \quad (8)$$

式中

$$A_n = \begin{bmatrix} \sum_{s=1}^n \frac{x_s^2}{2f} & \sum_{s=1}^n \frac{x_s y_s}{2f} & -\sum_{s=1}^n x_s & -\sum_{s=1}^n x_s y_s & \sum_{s=1}^n x_s^2 & \sum_{s=1}^n \frac{x_s z_s}{2f} \\ \sum_{s=1}^n \frac{x_s y_s}{f} & \sum_{s=1}^n \frac{y_s^2}{2f} & -\sum_{s=1}^n y_s & -\sum_{s=1}^n y_s^2 & \sum_{s=1}^n x_s y_s & \sum_{s=1}^n \frac{y_s z_s}{2f} \\ \sum_{s=1}^n \frac{x_s z_s}{f} & \sum_{s=1}^n \frac{y_s z_s}{f} & -\sum_{s=1}^n z_s & -\sum_{s=1}^n y_s z_s & \sum_{s=1}^n x_s z_s & \sum_{s=1}^n \frac{z_s^2}{2f} \\ \sum_{s=1}^n \frac{x_s}{f} & \sum_{s=1}^n \frac{y_s}{f} & -n & -\sum_{s=1}^n y_s & \sum_{s=1}^n x_s & \sum_{s=1}^n \frac{z_s}{f} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\beta = [d_x \quad d_y \quad d_z \quad \varnothing_x \quad \varnothing_y \quad d_f]^T \quad (10)$$

$$H_n = \left[\sum_{s=1}^n (z_s - z'_s) x_s \quad \sum_{s=1}^n (z_s - z'_s) y_s \quad \sum_{s=1}^n (z_s - z'_s) z_s \quad \sum_{s=1}^n (z_s - z'_s) \right]^T \quad (11)$$

为了减少误差, 加入采样点分析误差的权重因子 d_i , 方程 $A_n \beta = H_n$ 变化为

$$A_n^T D_n A_n \beta = A_n^T D_n H_n \quad (12)$$

式中

$$D_n = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & d_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & d_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

权重因子 $d_i > 0 (i = 1, 2, \dots, n)$, 其表达式为

$$d_i = \frac{ns_i r_i}{\sum_{i=1}^n s_i r_i} \quad (14)$$

式中, n 是采样点的个数, s_i 为反射面第 i 个采样点 (x_i, y_i, z_i) 覆盖的天线面板面积, $r_i = 1 - \frac{CL_i^2}{R^2}$ 为采样点所在区域的照射系数, C 是焦距比, R 是天线面板口径, l_i 是采样点到天线焦轴的距离。

最终求解出旋转和平移参数, 将实测天线面板点云数据进行旋转平移, 通过多次迭代拟合平移, 实现实测主面点云数据和理论模型的精配准。

利用精配准后的天线面板点云数据, 与天线面板的三维理论模型进行比较, 计算和统计实测天线数据到理论模型的距离, 获取天线面板形变信息。

天线面板的理论数据作为母线, 旋转一周获得天线面板的三维理论模型, 将三维理论模型的数据构建三角格网, 获得天线面板理论模型。计算和统计实测数据到理论模型的距离。其中理论模型的数据为 1 100 万个, 构建的三角格网为 2 200 万个。

天线面板原始点云数据 2 500 万个, 滤波之后实测点云数据为 53 万个, 点云数据中仍存在测量的随机误差。

在测量过程中, 所获得的点云数据不仅仅包括天线面板形变信息, 还包括三维激光扫描仪的测量误差。通过地面验证试验, 发现三维激光扫描仪的测量误差符合正态分布。天线面板形变量获取, 不是某一个点云数据形变量作为该点的形变量, 而是该点附近的所有点云数据形变量的平均值作为该点的形变量。将点云数据构建格网, 然后将格网分割数个规则的小网格, 对小网格内点云数据的形变量进行平均处理。通过验证, 两个点云数据的间隔为 0.2 m 效果最好。据此分析形变量, 可以较好地剔除测量误差的影响。最终, 得到的实测数据 6.4 万个, 点间距为 0.2 m。

3 测量精度和效率分析

根据天线的设计, 天线俯仰 48° 形变量最小、性能最优, 70 m 天线在实际应用中, 大部分时间工作在俯仰角度 20° 至 70° 。因此, 本文选取了 20° 、 48° 、 70° 三个仰角进行天线面板点云数据的获取和分析, 利用全站仪的测量结果作为标准, 评估了形变监测系统的测量精度。结合 70 m 天线在 20° 、 48° 和 70° 俯仰角下的点云测量数据, 分析了天线面板测量数据的配准精度、滤波效果和天线形变监测结果, 以及测量效率。

3.1 形变监测系统的测量精度分析

3.1.1 重复测量标准差

三维激光扫描仪重复测量精度实验包括测量光滑的面板和规则的靶标球精度实验。

如图 6 所示, 在三维激光扫描仪前方 10、20、30 m 处放置表面光滑的面板, 用三维激光扫描仪对面板做多次测量, 取其中任意一组的点云数据作为面板测量参考值, 然后分析重复测量的偏差, 可见在 10、20、30 m 处测量标准差均优于 0.3 mm (如表 1)。偏差值为 1~2 mm, 可能是在测量过程中两次点云数据不能完全重合, 以及被测面板不是完全光滑导致的。

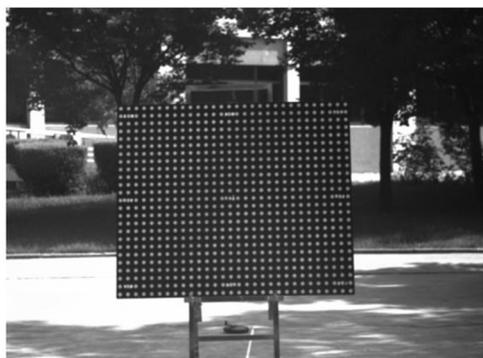


图 6 表面光滑的面板
Fig. 6 Smooth surface panel



图 7 靶标球布设
Fig. 7 Target ball layout

如图7所示位置布设了6个靶标球,其中1号和2号靶标球距离扫描仪10 m,3号和4号靶标球距离扫描仪20 m,5号和6号靶标球距离扫描仪30 m。用三维激光扫描仪对靶标球进行了7次扫描,通过对球面的拟合,计算球心的位置。表2为三维激光扫描仪多次测量偏差统计,可见6个靶标球的X坐标标准差、Y坐标标准差、Z坐标标准差达到1 mm测量精度,距离测量标准差均优于0.3 mm。

表1 水平面板多次测量的偏差分析

Table 1 Deviation analysis of multiple measurements of horizontal panels

d/m	Maximum/mm	Minimum/mm	Average value	Standard deviation/mm
10	1.12	0	0.08	0.18
20	2.66	0	0.03	0.22
30	1.15	0	0.01	0.27

表2 不同距离处靶标球位置测量误差分析

Table 2 Analysis of measurement error of target ball position at different distances

	X coordinate standard deviation/mm	Y coordinate standard deviation/mm	Z coordinate standard deviation/mm	Distance standard Deviation/mm
Target ball 1	0.16	0.16	0.12	0.18
Target ball 2	0.20	0.15	0.15	0.13
Target ball 3	0.20	0.15	0.15	0.13
Target ball 4	0.24	0.23	0.13	0.11
Target ball 5	0.25	0.27	0.49	0.18
Target ball 6	0.57	0.34	0.88	0.21

3.1.2 与标准仪器的比较

用全站仪对上述6个靶标球的位置进行测量,作为标准对比数据。所用全站仪是徕卡Leica TS60,角精度为0.5",而且已经过定标。表3为以三维激光扫描仪测量的靶标球之间的相对距离与全站仪测量的靶标球之间相对距离的偏差。两种仪器测量结果的标准差小于0.60 mm。

表3 靶标球相对距离测量误差分析

Table 3 Target ball relative distance measurement error analysis

Distance between target balls	Maximum value/mm	Minimum value/mm	Average value/mm	Standard deviation
1 and 2	1.64	0.94	1.34	0.25
3 and 4	0.93	-0.57	4.3×10^{-4}	0.50
5 and 6	0.96	-0.74	-1.4×10^{-4}	0.54

综上,三维激光扫描仪在10、20、30 m测量光滑的面板和靶标球的重复测量精度均优于0.3 mm。三维激光扫描仪和全站仪对靶标球测量精度对比实验显示,二者测量偏差的标准差在0.60 mm以内,验证了三维激光扫描仪测量的精度和可靠性。

3.2 配准结果精度分析

通过算法提取了6个立方体基座的坐标,其中,实测点云数据坐标为 $A_0(-2.98, 0.58, 3.26)$ 、 $A_1(-2.53, 1.68, -3.27)$ 、 $A_2(-1.70, 2.51, 3.27)$ 、 $A_3(-0.62, 2.97, 3.27)$ 、 $A_4(0.55, 2.98, 3.27)$ 、 $A_5(3.03, 0.02, 3.27)$ 。理论模型参考点云数据坐标, $R_0(3.03, 0.0, 3.27)$ 、 $R_1(2.81, 1.16, 3.27)$ 、 $R_2(2.15, 2.14, 3.27)$ 、 $R_3(1.18, 2.80, 3.27)$ 、 $R_4(0.04, 3.03, 3.27)$ 、 $R_5(-2.97, 0.60, 3.27)$ 。通过计算得出旋转矩阵和平移矩阵^[16],实现了实测点云数据与理论模型的配准,最终的配准精度为0.23 mm,配准效果如图8。

旋转和平移矩阵转换关系为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_x(\alpha) R_y(\beta) R_z(\gamma) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + T \quad (15)$$



图8 点云数据配准效果
Fig. 8 Point cloud data alignment effect

式中, R_x 、 R_y 、 R_z 分别代表三个方向的旋转矩阵, T 代表了平移矩阵。

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \cos \beta \sin \gamma & -\sin \beta \\ -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (16)$$

3.3 滤波效果精度分析

通过滤波算法实现点云数据滤波, 实测点云数据滤波前如图9(a), 包括副面、副反射面支架、馈源和离散点云数据, 三幅图分别是天线面板俯视图、侧视图和带有副反射面支架的图, 其中副反射面支架图形长9 m、宽4.5 m。第一步采用统计算法对杂乱点云数据进行统计滤波, 20个点云数据进行统计标准差大于3倍进行删除; 第二步采用Random Sample Consensus算法对点云数据进行曲面拟合滤波, 副面和馈源点云数据和主面点云数据有差别, 根据曲面阈值进行删除, 并且对天线面板点云数据进行抽稀, 获得高质量的点云数据; 第三步对主面点云数据进行双曲面高次方程拟合, 根据点云数据到拟合方程的距离, 进行距离阈值滤波, 最终通过以上三个步骤实现点云数据的高效滤波。

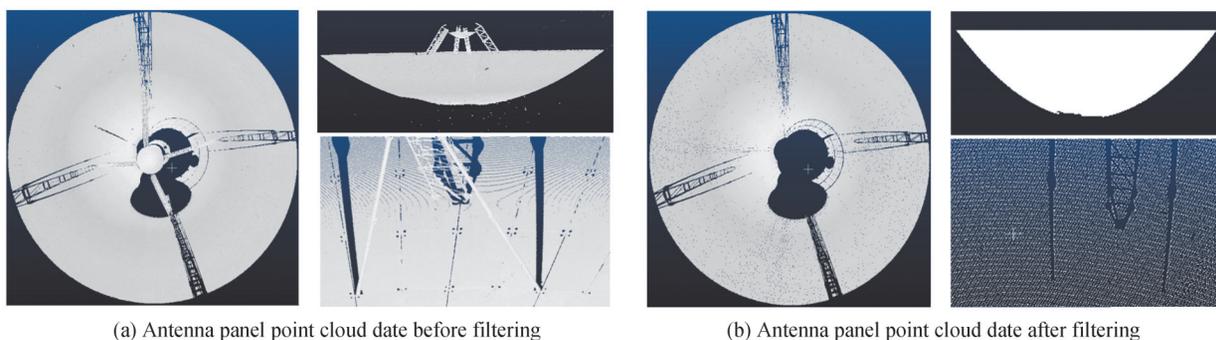


图9 点云数据滤波前后对比
Fig. 9 Comparison of point cloud data before and after filtering

滤波后效果如图9(b), 从俯视图角度可以看出, 通过以上滤波算法, 天线面板的副面和副反射面支架的点云数据已经删除, 从侧视图对比发现, 天线面板周围的杂散点云数据已经被删除, 带有副反射面支架的图对比发现, 天线面板对副反射面支架的滤波效果良好。对比发现, 已经把多余的点云数据删除, 仅保留了天线主面的点云数据, 实现滤波功能, 且滤波效果良好。原始点云数据为2 500万, 滤波之后剩余53万天线面板点云数据分布均匀, 满足形变分析需求。

3.4 主面数据精配准和点云数据形变量获取结果分析

主面数据通过多次迭代拟合,实现实测点云数据和理论模型的配准。本组数据通过十次迭代,已经实现主面数据精配准。其和理论模型的旋转和平移量分别为: x 方向平移量为 6.7×10^{-9} m、 y 方向平移量为 -1.0×10^{-9} m、 z 方向平移量为 1.8×10^5 m、 x 方向旋转量为 2.5×10^{-6} °、 y 方向旋转量为 1.6×10^{-6} °。这些平移和旋转量已经是非常小的值,对天线面板形变分析没有太大影响。因此通过主面点云数据多次迭代最佳拟合的方法,可以实现主面数据精配准。

通过以上步骤处理,48°天线面板的形变结果如图10,天线面板形变量的标准差为1.02 mm,形变点云数据极值区间是 $-4.40 \sim 2.33$ mm。

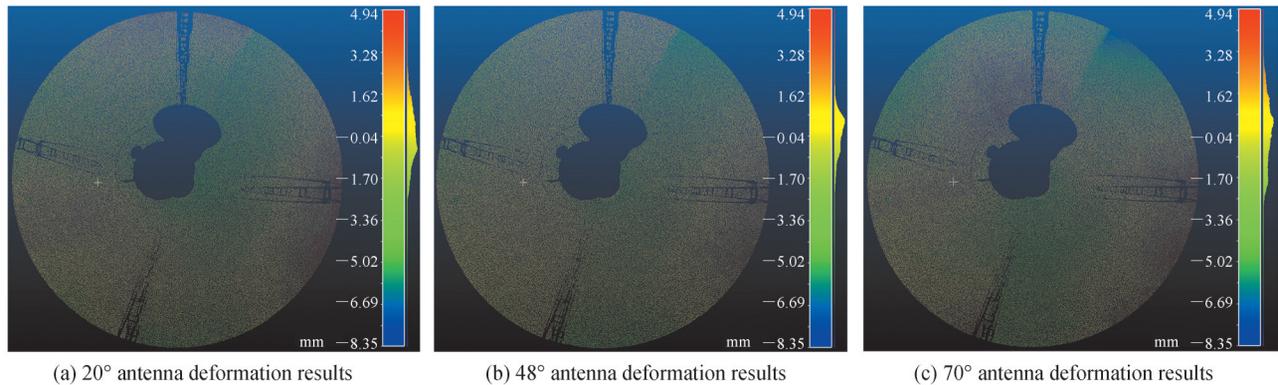


图10 整体形变分析

Fig. 10 Overall deformation analysis

相同方法处理20°和70°的同期天线面板点云数据。其结果为20°数据的标准差为1.38 mm,形变点云数据极值区间是 $-4.55 \sim 8.14$ mm;70°数据的标准差为1.25 mm,形变点云数据极值区间是 $-5.53 \sim 3.46$ mm。20°相对于48°天线面板形变区域在天线顶部区域和右侧区域,顶部区域形变面积为 270 m^2 ,形变量为0.55 mm,右侧区域形变面积为 340 m^2 ,形变量为0.47 mm。70°相对于48°天线面板形变区域在天线右侧区域、左下侧区域、顶部中间区域和顶部右侧区域,右侧区域形变面积为 340 m^2 ,形变量为0.99 mm,左下侧区域形变面积为 350 m^2 ,形变量为0.26 mm,顶部中间区域形变面积为 260 m^2 ,形变量为0.67 mm,顶部右侧区域形变面积为 85 m^2 ,形变量为1.74 mm。

可见,天线面板形变数据的最小标准差是在48°,符合设计要求,天线在不同俯仰角度时,天线面板和结构的自身重力,导致形变标准差变大,俯仰角度越大,形变量越大。

3.5 测量效率对比分析

为了分析LAP3D的测量效率,统计了70 m天线面板形变过程各个环节所需要的时间。其中,数据采集时间为90 s,点云数据配准5 min,点云数据滤波10 min,点云数据精配准30 min,以及形变获取10 min,整套系统可1个小时以内完成数据采集和处理。

与目前其他天线面板形变监测方法相比(如表4),本文计算了各种方法的采集效率、数据处理效率和测量效率,其中采集数据效率是指采集天线面板数据时间与天线面板面积的比值,数据处理效率是指数据处理时间与天线面板面积的比值,测量效率是采集数据和处理数据时间的总和与天线面板面积的比值。经纬仪方法的采集效率是 $40.00 \text{ min}/100 \text{ m}^2$;远场射电全息法的采集效率是 $102.04 \text{ min}/100 \text{ m}^2$;摄影测量方法的采集效率是 $3.06 \text{ min}/100 \text{ m}^2$,摄影测量的数据处理效率是 $27.55 \text{ min}/100 \text{ m}^2$,测量效率是 $30.61 \text{ min}/100 \text{ m}^2$;三维激光扫描仪方法采集效率是 $0.04 \text{ min}/100 \text{ m}^2$,数据处理效率 $1.43 \text{ min}/100 \text{ m}^2$,测量效率是 $1.56 \text{ min}/100 \text{ m}^2$ 。三维激光扫描仪的采集效率相对于经纬仪方法和远场射电全息法的采集效率提高了上千倍,相对于摄影测量方法提高77倍。在完成数据采集后,还需要进行数据处理和形变分析。三维激光扫描仪相对于摄影测量方法的数据处理效率提高了19倍,测量效率提高了20倍。所以,本文所使用三维激光扫描仪测量天线面板形变的方法效率大幅度提高,实现了高效率天线面板形变监测的功能。

表4 各种天线面板形变测量方法的测量效率对比表

Measurement method	Measurement accuracy and efficiency
Longitudinal method	Antenna area 600 m ² , acquisition time 4 hours, measurement efficiency is 40.00 min/100 m ² , accuracy 0.5 mm ^[3]
Photogrammetric measurements	Miyu 50 m antenna, 1 960 m ² , 1 hour data acquisition, 9 hours processing, measurement efficiency 30.61 minutes/100 m ² , accuracy 0.4 mm ^[5]
Radio holography	13.7 m antenna, 147 m ² area, 2.5 hours data acquisition, acquisition efficiency 102.04 min/100 m ² , accuracy 0.16 mm ^[5]
3D laser scanner method	70 m antenna, 3 840 m ² area, 1 hour of data acquisition and processing, measurement efficiency 1.56 min/100 m ² , accuracy better than 0.3 mm.

4 结论

LAP3D从数据采集到数据处理,得出天线形变量,能够在一个小时内完成,相对于其它方法的测量效率大幅度提高,实现了高效率的天线面板形变监测。三维激光扫描仪具有可靠单点测量精度和面测量精度,并且通过全站仪验证单点精度可靠性,三维激光扫描仪测量天线面板形变达到亚毫米精度,实现了高精度天线面板形变测量。天线面板点云数据的处理算法已经进行了集成,从数据采集到数据处理,操作简单,实现了自动化形变监测。

采用本文构建的LAP3D,能够获取70 m口径大型天线面板亚毫米量级的形变量,与传统的测量方法获取天线面板形变相比,在保证测量精度不降低的情况下,大幅度提高测量效率,可以快速完成不同俯仰角度下的天线面板数据的测量和分析功能。

参考文献

- [1] 秦顺友. 卫星通信地面站天线工程测量技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [2] QU Yongxin, CHEN Liying. The data processing of antenna measurement and the prospect of real-time measurement[J]. Radio Engineering, 1996, 26(4): 34-39.
屈永欣, 陈立英. 天线测量的数据处理及实时测量的前景[J]. 无线电工程, 1996, 26(4): 34-39.
- [3] BARRS J W M, ALBERT G, HAUKE H, et al. Design parameters and measured performance of the IRAM 30-m millimeter radio telescope[J]. Proceeding of the IEEE, 1994, 82(5): 687-696.
- [4] LI Zongchun, LI Guangyun, TANG Tingsong, et al. Electronic multithcodolite measuring system applied in the precision installation of a large antenna[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2005, 25(1): 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[J]. 海洋测绘, 2005, 25(1): 26-30.
- [5] LI Zongchun, LI Guangyun, WU Xiaoping. Review of accuracy measuring technology of antenna's surface[J]. Bull Survey Mapping, 2003, (6): 16-19.
李宗春, 李广云, 吴晓平. 天线反射面精度测量技术述评[J]. 测绘通报, 2003, (6): 16-19.
- [6] WANG Baofeng, LI Guangyun, LI Zongchun, et al. Application of high accuracy digital photogrammetry technology in a 50meter antenna[J]. Engineering of Surveying and mapping, 2007, 16(1): 42-46.
王保丰, 李广云, 李宗春, 等. 高精度数字摄影测量技术在50m大型天线中的应用[J]. 测绘工程, 2007, 16(1): 42-46.
- [7] BAARS J W M, LUCAS R, MANGUM J G, et al. Near-field radio holography of large reflector antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(1): 24-41.
- [8] HAN Fu, LÜ Jing, WU Wenda, et al. The first radio holography measurement for the 13.7 m telescope of purple mountain observatory[J]. Acta Astronomica Sinica, 1994, 35(2): 209-215.
韩溥, 吕静, 吴文达, 等. 紫金山天文台13.7米射电望远镜天线表面精度的首次射电全系测量[J]. 天文学报, 1994, 35(2): 209-215.
- [9] WANG Zan, KONG Deqing, CHEN Zhiping. Pointing error evaluation algorithm for large double-reflector antenna[J]. Astronomical Research and Technology, 2020, 17(1): 52-59.
汪赞, 孔德庆, 陈志平. 大型大型射电望远镜面形精度测量方法研究综述[J]. 天文研究与技术, 2020, 17(1): 52-59.
- [10] CHRISTOPH H, PHILIPP Z, AXEL N, et al. Estimation of focal length variations of a 100-m radio telescope's main reflector by laser scanner measurements[J]. Journal of Surveying Engineering, 2012, 138(3): 126-135.
- [11] PIERGUDIO S, LUCA V, CLAUDIO A. Laser scanner and terrestrial surveying applied to gravitational deformation monitoring of large VLBI telescopes's primary reflector[J]. Journal of Surveying Engineering, 2009, 135(4): 136-148.

- [12] CHRISTOPH H, DAVID S, AXEL N, et al. Terrestrial laser scanner two-face measurements for analyzing the elevation-dependent deformation of the onsalá space observatory 20-m radio telescope's main reflector in a bundle adjustment[J]. *Sensors*, 2017, 17(8): 1833.
- [13] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[C]. *Image Understanding Workshop*, 1980: 71-78.
- [14] LANCASTER P, SALKAUSKAS K. Surfaces generated by moving least squares methods [J]. *Mathematics of Computation*, 1981, 37: 141-158.
- [15] WANG Congsi, DUAN Baoyan, QIU Yuanying. Precise algorithm for surface errors of reflector antennas and analysis of its electrical performance[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2006, 21(4): 403-409.
王从思, 段宝岩, 仇原鹰. 天线表面误差的精确计算方法及电性能分析[J]. *电波科学学报*, 2006, 21(1): 403-409.
- [16] ZHANG Kai. Research on spatial registration for three-dimensional laser scanning data [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008.
张凯. 三维激光扫描数据的空间配准研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.

Rapid Inspection Method and Accuracy Analysis of Large Antenna Panel Deformation

FU Lianbo^{1,2}, LIU Jianjun^{1,2}, REN Xin^{1,2}, YAN Wei^{1,2}, KONG Deqing^{1,2}, CHEN Wangli¹,
HUANG Hai^{1,2}, GAO Xingye¹

(1 *National Astronomical Observatories, Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

Abstract: With the rapid development of China's planetary exploration project, the communication requirements between spacecraft and ground are getting higher and higher, the antenna aperture is getting bigger and the antenna panel structure is more complex. Large antenna use process, by the temperature, wind, frost, rain, snow and other natural factors, as well as the role of their own gravity, with the passage of time, the antenna structure will inevitably deformation. On the other hand, with the change of antenna pitch angle, the antenna panel will be deformed by gravity. In order to meet the requirements of fast adjustment of antenna face shape and antenna performance analysis for engineering tasks, it is very important to obtain antenna shape variables with high efficiency and high accuracy. This paper adopts the scheme of high precision 3D laser scanner to measure the antenna panel deformation, and constructs a large antenna panel deformation dynamic detection system. And it was applied to the largest fully movable 70 m antenna in Asia at Tianjin Wuqing Station, which was constructed by China's Tianqin-1 Mars Exploration Project. By measuring, analyzing and processing the antenna panel point cloud data, the 70 m antenna panel deformation information was obtained. According to the characteristics of the point cloud data of antenna panel, we adopt the fitting paraboloid specific algorithm for point cloud data alignment to realize the alignment between the point cloud data of theoretical model and actual measured point cloud data, and achieve high efficiency and high accuracy alignment after many falls. The statistical algorithm removes the discrete point cloud data, and the surface fitting algorithm removes the point cloud number data of antenna structure. Finally, the filtering of antenna panel point cloud data and antenna panel deformation analysis are realized, which realizes the high-efficiency, high-precision and automated large antenna panel deformation detection. The data of the theoretical model of the antenna panel is constructed as a grid, and the distance from the measured data to the theoretical model is calculated to obtain the deformation information of the antenna panel. The 3D laser scanner deformation measurement method is applied to the data of the antenna panel at 20, 48 and 70 degrees to obtain the deformation results of different pitch angles and compare and analyze the effect of gravity on the antenna panel. According to the measurement results, it is shown that this paper achieves the antenna panel deformation measurement by 3D laser scanner and the accuracy reaches sub-millimeter. The large antenna panel deformation dynamic monitoring system can be completed within one hour from data acquisition to data processing to derive antenna deformation variables. The photogrammetry method, total station method and radio holography method in the process of large antenna

panel deformation measurement, data acquisition all need one or two hours, as well as the subsequent data processing also need a long time, 3D laser scanner measurement of antenna panel deformation only need one hour to complete data acquisition and analysis, to achieve high efficiency of antenna panel deformation monitoring. The 3D laser scanner has reliable single point measurement accuracy and surface measurement accuracy, and the reliability of single point accuracy is verified by total station, and the 3D laser scanner measures antenna panel deformation to sub-millimeter accuracy, which realizes high precision antenna panel deformation measurement. The processing algorithm of the antenna panel point cloud data has been integrated, from data acquisition to data processing, with simple operation and automated deformation monitoring. The LAP3D constructed in this paper can obtain the sub-millimeter scale deformation of large antenna panel with 70 m aperture. Compared with the traditional measurement methods to obtain the antenna panel deformation, the measurement efficiency is greatly improved while the measurement accuracy is not reduced, and the measurement and analysis functions of the antenna panel data under different pitch angles can be completed quickly.

Key words: Large antenna; Deformation analysis; Rapid detection; Three-dimensional laser scanner; Point cloud data processing; Accuracy analysis

OCIS Codes: 120.2440; 010.3640; 120.5050; 120.5800