

文章编号:0494-0911(2012)02-0048-04

中图分类号:P234.5

文献标识码:B

# 三维激光扫描仪在抛物面天线测量中的应用研究

原玉磊, 骆亚波, 郑 勇

(信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

## The Error Analysis of Antenna Measurements Using 3D Laser Scanner

YUAN Yulei, LUO Yabo, ZHENG Yong

**摘要:**目前大口径抛物面天线的测量方法为采用经纬仪或者全站仪的标志点测量,这种测量方法需要在天线表面粘贴标志点,而且不能获得抛物面天线的全部表面信息。三维激光扫描仪具有无需合作目标、获取信息量大的优点,研究采用三维激光扫描仪对抛物面天线进行测量。分别用三维激光扫描仪和全站仪对小型抛物面天线进行测量试验,对测量数据进行抛物面拟合,并对拟合结果进行分析。试验表明,三维激光扫描仪对抛物面天线面形描述比较全面,面形拟合精度比较高。

**关键词:**天线测量;三维激光扫描仪;抛物面拟合;测量精度;拟合误差

大口径抛物面天线是进行天文观测、深空探测等科学研究的重要设备。安装及维护过程中天线面形的测量精度直接决定了天线的工作状态及精度。目前对天线面形测量主要采用的仪器为全站仪或者电子经纬仪<sup>[1-4]</sup>。但全站仪和经纬仪测量需要在天线表面粘贴合作目标,对天线的工作造成一定的影响,而且经纬仪和全站仪只能测量天线面上的有限个标志点,不可能对整个天线抛物面全覆盖测量,因此必然会与实际情况有一定的偏差。而三维激光扫描仪具有快速获取目标物大量表面点的三维坐标信息的优点,可以实现对抛物面天线表面全覆盖的测量,且与全站仪测量相比具有无需在天线表面粘贴合作目标的优点<sup>[5]</sup>,对处于工作状态的天线进行测量时有着明显的优势。

本文对三维激光扫描仪在抛物面天线测量中的应用作了初步研究,使用三维激光扫描仪对小型抛物面天线进行了测量试验,并将测量数据的抛物面拟合结果与全站仪测量数据的抛物面拟合结果进行比较,得出了有益的结论。

### 一、测量仪器

#### 1. 激光扫描仪

本文试验选用的三维激光扫描仪为 Riegl VZ-400。Riegl VZ-400 是 Riegl 公司 2008 年 10 月推出的新型激光扫描仪。其测量速度快,每秒最多可测量 300 000 个点,发射激光为纤细激光束,角分辨率可达 1.8 角秒;测距系统采用全波形回波技术以及

实时全波形数字化处理和分析技术,单点测距精度在 100 m 以内可达  $\pm 2$  mm。

#### 2. 全站仪

为了评价三维激光扫描仪的测量结果,将其与全站仪测量结果进行比较。本文试验采用的全站仪为徕卡的 TCA2003。

TCA2003 是目前市场上精度最高的全站仪,在标准测量模式(单点测量时间为 3 秒)下,其测角精度为  $\pm 0.5''$ ,测距精度为  $\pm (1 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} D)$ 。

### 二、测量试验

为了方便对天线进行各种测量试验,在室内安装了一个直径为 2 m 的小型抛物面天线,对该小型天线进行各种测量试验来验证各种测量方案的可行性与精度。

室内安装的小型抛物面天线实物图如图 1(a)所示。天线抛物面架在底座上,面上贴了 62 个徕卡 TCA2003 全站仪的反射膜,这些反射膜也是测量的标志点。该反射膜主要用于徕卡全站仪对天线上标志点的测量。

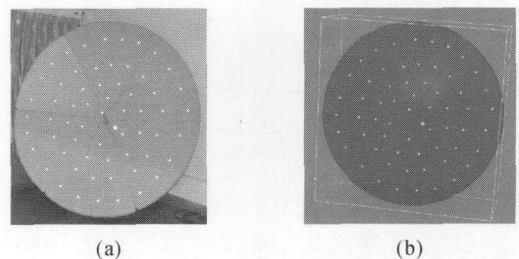


图 1 小型抛物面天线及其扫描影像图

收稿日期:2011-02-24

基金项目:国家自然科学基金项目(10878025)

作者简介:原玉磊(1984—),男,河南卫辉人,博士生,主要研究方向为大地测量学与测量工程。

使用三维激光扫描仪对天线面进行扫描,可以得到天线面扫描的三维点云数据。其影像如图1(b)所示。利用这些点云数据可以对天线表面的不同部位进行测量。

由图1可以看出,由于反射膜的表面反射率远高于天线抛物面的反射率,因此反映在扫描的三维点云影像图中,反射膜表面点的灰度值远高于抛物面表面点。因此,根据反射膜表面点云数据的这一特点,可以将标志点表面扫描点与天线表面扫描点区别开来。

### 三、抛物面拟合模型

由于天线面形为抛物面,因此为了评价测量结果,需要将测量结果拟合为抛物面。

抛物面属于一般二次曲面的特殊形式。一般二次曲面的方程为

$$a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xy + a_5yz + a_6zx + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9z^2 = 0 \quad (1)$$

式中,  $(x, y, z)$  为二次曲面表面上点的三维坐标;  $a_0, a_1, \dots, a_9$  为二次曲面中 10 个待解参数。

式(1)可以写成矩阵形式为

$$a_0 + [a_1 \ a_2 \ a_3] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + [x \ y \ z] \begin{bmatrix} a_7 & \frac{a_4}{2} & \frac{a_6}{2} \\ \frac{a_4}{2} & a_8 & \frac{a_5}{2} \\ \frac{a_6}{2} & \frac{a_5}{2} & a_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = 0$$

简写为

$$a_0 + [a_1 \ a_2 \ a_3] \mathbf{X} + \mathbf{X}^T \mathbf{D} \mathbf{X} = 0 \quad (2)$$

式(2)是一般二次曲面的方程,如果要求式(2)为旋转抛物面,还需要为式(2)加上两个限制条件:① 要求式(2)中的矩阵  $\mathbf{D}$  有一个特征值为 0, 即  $|\mathbf{D}| = 0$ , 该条件将使式(2)表述的一般二次曲面转换为椭圆抛物面;② 使椭圆抛物面化为旋转抛物面,要求式(2)中的系数满足

$$(a_7 + a_8 + a_9)^2 + a_4^2 + a_6^2 + a_5^2 - 4a_7a_8 - 4a_7a_9 - 4a_8a_9 = 0 \quad (3)$$

联立式(2)、式(3)以及  $|\mathbf{D}| = 0$ , 建立误差方程,按照附有限制条件的平差方法可以解出式(1)中的 10 个参数。

式(1)为旋转抛物面的一般方程,为了便于误差分析,将式(1)经过坐标旋转和平移,转化为旋转抛物面的标准方程。转换方法如下:

设矩阵  $\mathbf{D}$  的特征值为  $\Lambda$ , 对应的特征向量为  $\mathbf{R}$ ,

有  $\mathbf{R}^T \mathbf{D} \mathbf{R} = \Lambda$ , 令  $\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \mathbf{R}^T \mathbf{X}$ , 代入式(2), 由于矩

阵  $\mathbf{D}$  为实对称矩阵, 所以  $\mathbf{R}^T = \mathbf{R}^{-1}$ , 可得

$$a_0 + b_1p + b_2q + b_3r + \lambda_1p^2 + \lambda_2q^2 + \lambda_3r^2 = 0 \quad (4)$$

式中,  $[b_1 \ b_2 \ b_3] = [a_1 \ a_2 \ a_3] \mathbf{R}$ ;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为矩阵  $\mathbf{D}$  的 3 个特征根, 由于矩阵  $\mathbf{D}$  必有一个特征根为 0, 不妨设  $\lambda_3 = 0$ , 则式(4)可化为

$$\lambda_1 \left( p + \frac{b_1}{2\lambda_1} \right)^2 + \lambda_2 \left( q + \frac{b_2}{2\lambda_2} \right)^2 + a_0 - \lambda_1 \left( \frac{b_1}{2\lambda_1} \right)^2 - \lambda_2 \left( \frac{b_2}{2\lambda_2} \right)^2 - b_3 \left( r + \frac{a_0 - \lambda_1 \left( \frac{b_1}{2\lambda_1} \right)^2 - \lambda_2 \left( \frac{b_2}{2\lambda_2} \right)^2}{b_3} \right) = 0$$

经过坐标平移可得

$$\frac{x'^2}{\lambda_1} + \frac{y'^2}{\lambda_2} = z' \quad (5)$$

其中, 坐标平移量为

$$\Delta \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \frac{b_1}{2\lambda_1} \\ \frac{b_2}{2\lambda_2} \\ \frac{a_0 - \lambda_1 \left( \frac{b_1}{2\lambda_1} \right)^2 - \lambda_2 \left( \frac{b_2}{2\lambda_2} \right)^2}{b_3} \end{bmatrix}$$

### 四、测量结果分析

为了对测量结果进行评价, 采用了常用的抛物面测量数据评价方法, 将测量数据用抛物面进行拟合, 然后分析抛物面的拟合误差以及拟合的抛物面方程与实际的测量数据之差。

抛物面拟合误差可由拟合结果给出。对于拟合的抛物面方程与实际的测量数据之差, 可通过下述方法计算: 首先将拟合的抛物面方程通过坐标转换转化为标准方程; 然后将实测的点坐标  $(x, y, z)$  转换到抛物面标准方程所在的坐标系中, 设为  $(x', y', z'_0)$ ; 最后根据抛物面标准方程以及实测坐标转换后的  $x', y'$  坐标可以计算出  $z'$  坐标值, 以  $z'$  和  $z'_0$  的差作为拟合的抛物面方程与实际测量数据的误差。

#### 1. 全站仪测量结果分析

对全站仪测量的 60 个标志点坐标进行拟合, 得到全站仪测量下的该天线抛物面标准方程为

$$\frac{x'^2}{-3.661\ 903} + \frac{y'^2}{-3.614\ 731} = z'^2 \quad (6)$$

拟合误差的平均值为 0.19 mm; 拟合误差的均方差为  $\pm 2.0$  mm。

解算出的坐标旋转矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} -0.165278 & 0.775065 & -0.609883 \\ 0.154496 & 0.631100 & 0.760160 \\ 0.974071 & 0.031413 & -0.224052 \end{bmatrix}$$

坐标平移量为

$$T = [1.416506 \quad -0.857614 \quad -8.162749]$$

由此可得测量的标志点坐标到抛物面标准方程坐标系中的坐标的转换关系为

$$X' = RX + T \quad (7)$$

由式(7)可以计算每一个标志点在抛物面标准方程坐标系中的坐标,设为 $(x', y', z'_0)$ ,而由式(6)以及 $x', y'$ 可以计算抛物面方程中的 $z'$ 。通过比较 $z'$ 和 $z'_0$ 来分析全站仪测量的误差。误差图如图2所示。误差平均值为 $-0.38 \text{ mm}$ ,误差均方差为 $\pm 0.28 \text{ mm}$ 。

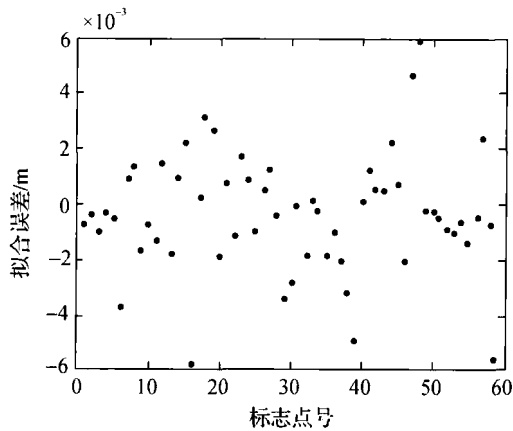


图2 全站仪测量值与拟合方程的误差

## 2. 扫描仪测量结果分析

通过对扫描仪得到的天线表面影像图进行分析,发现落在徕卡反射膜上的扫描点与实际位置相比有很大的偏差,如图3所示。



图3 标志点与周围天线面的横切影像图

图3中黑色的点为天线表面的三维点云数据,白色的点为该部分天线表面中反射膜表面的点云数据。可见中间明显有一段距离。这个距离的产生,可能是由于反射膜的反射率非常高,回波能量

非常大以至于影响到了扫描仪的测距,产生了测距的系统差。

为了避免这一误差对扫描仪测量结果的影响,在对扫描的点坐标进行抛物面拟合时,将落在标志点上面的扫描点剔除。剔除后的天线表面点云影像图如图4所示。

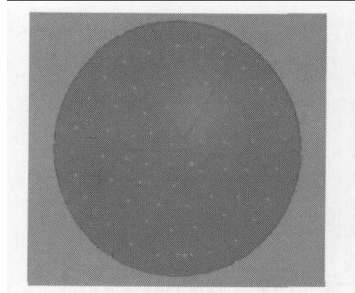


图4 剔除标志点后的天线影像图

对天线表面的扫描点坐标进行抛物面拟合,得到扫描仪测量下的该天线抛物面标准方程为

$$\frac{x'^2}{3.592581} + \frac{y'^2}{3.648481} = z'^2 \quad (8)$$

拟合误差的平均值为 $0.32 \text{ mm}$ ;拟合误差的均方差为 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 。

解算出的坐标旋转矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} -0.187125 & 0.916321 & -0.354034 \\ -0.309103 & 0.287169 & 0.906636 \\ 0.932437 & 0.279087 & 0.229502 \end{bmatrix}$$

坐标平移量为

$$T = [0.126887 \quad -1.157885 \quad 6.470893]$$

同样,根据坐标旋转后的 $z'_0$ 和根据拟合的抛物面方程计算得到的 $z'$ ,来分析扫描仪的测量误差。误差图如图5所示。误差平均值为 $0.018 \text{ mm}$ ,误差均方差为 $\pm 0.007 \text{ mm}$ 。

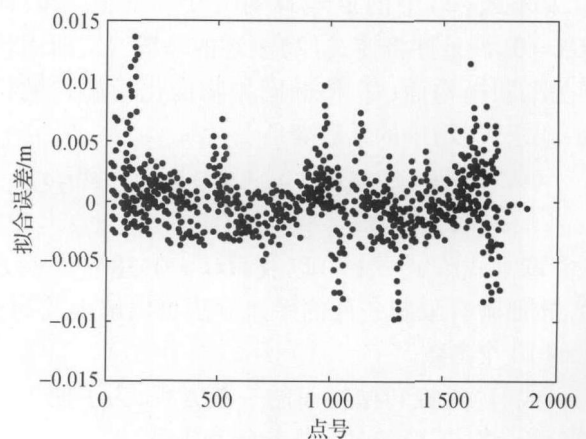


图5 扫描仪测量值与拟合方程的误差

由图5可以看出,误差值大部分都在 $\pm 5$  mm以内,但是在一些地方有细的、较大的波动。经过分析,这些波动位于天线面板结合处,由于在结合处有一定的凹凸,导致误差明显增大。

## 五、结论

为了研究三维激光扫描仪应用于抛物面天线测量,本文分别采用三维激光扫描仪和徕卡全站仪对小型抛物面天线进行了测量,对测量结果进行了抛物面拟合,通过对拟合结果比较分析,得出以下结论。

1) 根据全站仪测量结果拟合出来的抛物面方程存在系统差(误差均值 $-0.38$  mm),将近 $0.4$  mm;根据扫描仪测量结果进行拟合,这个误差一直存在于拟合过程中,拟合出的抛物面方程误差均值只有 $0.018$  mm,即没有明显的系统差。

2) 根据扫描仪测量结果进行的抛物面拟合,拟合出的抛物面标准方程的标准差( $\pm 0.05$  mm)要明显小于根据全站仪测量结果进行拟合的标准差( $\pm 2.0$  mm),这是由于扫描仪获取的数据量大,对天线面形的描述更为全面。

3) 虽然三维激光扫描仪的单点测量精度低于全站仪,但是根据其对天线表面扫描的大量点云坐标进行的抛物面拟合,精度要高于根据全站仪测量数据的拟合结果。

4) 采用扫描仪的测量结果可以发现天线表面的各种凹凸等局部区域的变形,而根据全站仪测量结果则很难发现。

在抛物面天线测量方面,三维激光扫描仪具有

获取信息量大的优点,相比全站仪或者经纬仪测量,对天线面形的描述更为全面,同时三维激光扫描仪测量不需要合作目标,对于处于工作状态的天线测量将更有优势。因此,研究应用三维激光扫描仪测量抛物面天线,对于发展天线测量技术有很大的意义。

## 参考文献:

- [1] 李宗春,李广云,张冠宇. TDA5005 全站仪用于11 m 天线测量[J]. 现代雷达,2007,29(8):89-92.
- [2] 许文学,李宗春,李广云,等. 50 m 天线轨道调整方法[J]. 测绘通报,2006(9):40-42.
- [3] 贺磊,李广云,李宗春,等. 50 m 天线模胎测量及精度分析[J]. 测绘通报,2006(2):9-11.
- [4] 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[J]. 测绘工程,2007,16(1):42-46.
- [5] 原玉磊,蒋理兴,张珂殊. 三维激光扫描仪在大型高温锻件测量中的应用研究[J]. 测绘通报,2009(6):45-47.
- [6] 原玉磊,蒋理兴,刘灵杰. 罗德里格矩阵在坐标系转换中的应用[J]. 测绘科学,2010,35(2):178-179.
- [7] 程效军,周适. 用二次曲面方程和抛物面限制条件拟合抛物面天线方程[J]. 铁道勘察,2008,24(1):4-7.
- [8] 陈继华,李广云. 离散点抛物面拟合的算法研究[J]. 无线电工程,2005,35(4):32-34.
- [9] 季凯敏,王解先. 椭圆抛物面的拟合问题[J]. 工程勘察,2009,37(1):78-83.
- [10] 程效军,顾孝烈. 工程结构物的抛物面方程回归计算[J]. 同济大学学报:自然科学版,2009,37(9):1246-1249.

## 收购苏州迅威,中海达进军全站仪市场

**【本刊讯】** 2月6日,中海达发布公告称,为弥补公司在全站仪等光电测绘产品领域的业务空白,完善公司产品链,公司拟使用2612.5万元的超募资金增资苏州迅威光电科技有限公司(以下简称“苏州迅威”)。此次增资完成后,中海达持有苏州迅威61.75%股权,苏州迅威成为中海达的控股子公司。

苏州迅威主要从事制造和销售光电测角传感器、自动安平控制器;光电仪器装配、维修及相关产品的技术开发和咨询服务。以全站仪、激光测距装置、绝对编码测角装置等光电产品的研发、生产与销售为主营业务。此前,苏州迅威主要以ODM模式向主要客户苏州一光仪器有限公司供货。中海达入主后,将改变苏州迅威单一的ODM模式,充分利用公司现有销售渠道和经销商资源以及公司自有品牌进行业务拓展,在2012—2014年力求保持快速增长,提升全站仪及其他系列光电测绘产品的产能规模。

中海达认为,此次投资的主要目的在于,全站仪存在较好的进入机会和增长空间,能拓宽中海达产品线及销售渠道,能充分整合双方的优势资源。

中海达表示,借助与苏州迅威的资本层面合作,可以迅速进入光电测绘仪器市场,从而与原有的GNSS业务形成有效互补,产生显著协同效应,并可通过拓宽产品线进一步加快销售队伍及销售渠道的建设。而且苏州迅威具有一定的技术优势和生产经验,能“以点带面”地使公司获得光电测绘产品业务快速增长机会,有效提升公司业绩。

(本刊编辑部)