

佘山 1.56 米望远镜与 SLR 望远镜 旋转不动点的测量

周加晟^{1,2}, 徐春雷³, 唐正宏¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 上海弘缜测量技术有限公司, 上海 201615)

摘要: 佘山 1.56 米光学望远镜观测站与卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 观测站是进行天文地球动力学研究的重要观测站。应用这些观测站进行空间测量需要这两个观测站在空间的准确坐标。为此重点介绍了 1.56 米望远镜与 SLR 望远镜旋转不动点的观测方案和计算方法。归心结果经确认达到厘米精度, 能够实施相应的观测任务。

关键词: GPS; SLR; 旋转不动点; ITRF

中图分类号: P111.2

1 引言

上海天文台在佘山建有 1.56 米光学望远镜和 SLR 观测站。鉴于近些年来, 随着经济发展和旅游行业的快速成长, 佘山地区的夜天光背景越来越亮, 1.56 米望远镜可以转向高轨卫星 (带反射器) 的激光测距、低轨人造卫星的白天精密定位等应用型的课题研究。

为了进行高轨卫星的激光测距等应用, 需要精确测定 1.56 米望远镜和 SLR 望远镜参考点在地固坐标系中的坐标, 即旋转不动点的测量。测站的旋转不动点是整个测站的观测参考点, 通常是指主动轴与从属轴所在平面的交点, 位于设备的内部, 并非一个具体可以观测的物理参考点^[3, 6]。为了测得该旋转不动点在地固坐标系中的坐标, 选用国际地球参考架 (international terrestrial reference frame, ITRF) 作为参考框架, 首先建立控制网, 通过全球定位系统 (global positioning system, GPS) 测量获得控制点在 ITRF 下的坐标, 然后通过常规的测量方法, 建立参考点与控制点的位置关系, 即可解算出参考点在 ITRF 下的坐标。

2 测控网的布设与旋转不动点的测量

2.1 测控网的布设

1.56 米望远镜与 SLR 望远镜所在的佘山地形比较复杂, 植被茂密, 对 GPS 观测收星有一定影响。为了保证之后常规测量的通视和 GPS 控制点的精度, 如图 1 所示, 选取 001, 002,

收稿日期: 2014-12-30; 修回日期: 2015-05-08

通讯作者: 周加晟, jszhou@shao.ac.cn

003, 004 点组成控制网。从 2014 年 8 月 30 日开始, 连续 5 天对 001 至 004 号控制点构成的所有基线进行等精度观测。观测采用型号为 Leica GS15 的接收机, 采样率设定为 30 s, 截止高度角为 10° , 有效观测卫星数不少于 4 颗, 观测时段数不少于 4。GPS 观测信息见表 1, 其中的 GPST 表示 GPS 时间, DOY 为年积日 (day of year, DOY)。

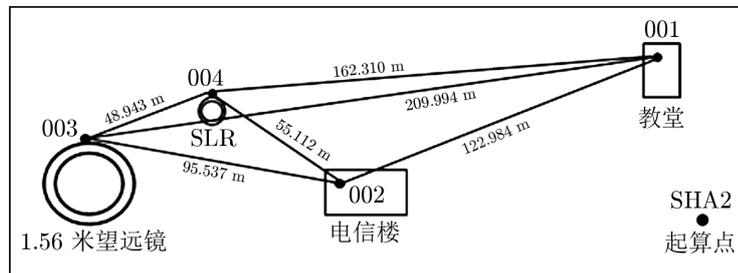


图 1 佘山观测站控制网布设

表 1 GPS 观测实施表

| 控制点 | 开始时间 (GPST) | 结束时间 (GPST) |
|-----|--------------|--------------|
| 001 | DOY242 02:45 | DOY246 02:28 |
| 002 | DOY242 02:48 | DOY246 02:53 |
| 003 | DOY242 06:27 | DOY246 09:47 |
| 004 | DOY242 08:27 | DOY246 03:44 |

为了检核控制网的测量精度, 同时进行了控制点之间边长和角度的测量。采用型号为 Leica TS30 全站仪进行测量, 测角精度为 $0.5''$, 测距精度为 $0.6 \text{ mm} \pm D \times 10^{-6} \text{ mm}$ (D 为测量距离, 单位为 km), 采用四个测回进行测量。

2.2 SLR 望远镜参考点的测量方案

在 SLR 望远镜底座上安装 3 个观测靶点, 令望远镜绕竖直轴每次旋转大约 15° , 共旋转一圈。利用 2 台全站仪观测 3 个观测靶点在测站站心地平坐标系中的位置, 可以得到靶点在空间分布的离散点。利用这些离散点的坐标进行圆拟合, 拟合出每个观测靶点旋转一圈所在圆的圆心。由 3 个圆心连线即可得到望远镜在空间中的竖直轴。以同样方法, 望远镜筒绕水平轴旋转, 每次 15° 。由每个靶点旋转得到的离散点同样可以拟合圆心, 利用圆心连线得出水平轴的位置。水平轴和竖直轴的交点即为望远镜的参考点。

2.3 1.56 米望远镜参考点的测量方案

1.56 米望远镜的情况较 SLR 望远镜更为复杂一些。1.56 米望远镜处于独立建筑体内, 只能通过一道天窗与外界通视。为解决这一难题, 首先在 1.56 米望远镜室内布设 2 个转点, 使其位于望远镜两侧。然后在望远镜两侧安装观测靶点, 并令望远镜绕极轴每次旋转 15° 。在望远镜旋转的范围内, 测量每个观测靶点, 使离散点多于 5 个。利用圆拟合可以得出极轴的位置。

置。保持望远镜绕极轴不旋转, 在镜筒上安装 3 个观测靶点, 使望远镜绕赤纬轴每次旋转 15° 左右, 对观测靶点进行观测, 使得离散点多于 6 个。利用圆拟合, 可以得出离散点的圆心的位置。连线这些圆心可以测出赤纬轴的位置。由于 1.56 米望远镜的赤纬轴和极轴是空间互异的两条直线, 参考点即为赤纬轴与极轴的公垂线与极轴的交点。

3 GPS 数据解算与归心测量

3.1 GPS 控制网平差

GPS 观测数据首先采用 GAMIT 软件进行基线解算, 利用国际全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 服务 (international GNSS service, IGS) 的精密星历, 结合软件的单基线模式或多基线模式进行解算。选取网中 SHA2 点作为起算点, 经检验合格的基线作为观测值进行无约束平差, 输出各基线向量的改正数及边长、方位、点位的精度信息。基线向量的改正数绝对值需要满足下式的要求:

$$V_{\delta X} \leq 3\sigma, \quad V_{\delta Y} \leq 3\sigma, \quad V_{\delta Z} \leq 3\sigma, \quad (1)$$

式中 $V_{\delta X}$, $V_{\delta Y}$, $V_{\delta Z}$ 为基线向量的改正数, σ 为对基线测量中误差的要求。约束平差是在无约束平差的基础上进行的, 按照三等网和 ITRF2008 坐标进行约束平差, 将 SHA2 点坐标定为 ITRF2008 参考框架下历元 2014.665 75 (即 2014-09-01 00:00 时) 时刻的坐标, 进行网平差。约束平差结束后, 应该统计出下列信息:

- (1) 网中相邻点最小距离和最大距离;
- (2) 最弱边边长相对中误差和最弱点点位中误差;
- (3) 约束平差与无约束平差同名基线改正数较差的绝对值要满足下式:

$$dV_{\delta X} \leq 2\sigma, \quad dV_{\delta Y} \leq 2\sigma, \quad dV_{\delta Z} \leq 2\sigma, \quad (2)$$

式中 $dV_{\delta X}$, $dV_{\delta Y}$, $dV_{\delta Z}$ 为约束平差与无约束平差同名基线改正数较差的绝对值。GPS 网平差结束后, 结果如表 2 所示。

表 2 GPS 网平差后控制点坐标及其误差

| 控制点 | X (m) | Y (m) | Z (m) | δX (m) | δY (m) | δZ (m) |
|------|------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| 001 | -2 830 886.194 1 | 4 676 504.562 1 | 3 275 095.562 1 | 0.000 8 | 0.000 8 | 0.000 8 |
| 002 | -2 830 789.931 0 | 4 676 567.458 0 | 3 275 051.393 4 | 0.000 8 | 0.000 8 | 0.000 8 |
| 003 | -2 830 706.403 8 | 4 676 610.069 0 | 3 275 069.693 9 | 0.000 8 | 0.000 8 | 0.000 8 |
| 004 | -2 830 742.469 9 | 4 676 577.892 0 | 3 275 077.391 6 | 0.000 8 | 0.000 8 | 0.000 8 |
| SHA2 | -2 831 733.804 0 | 4 675 665.841 0 | 3 275 369.317 0 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.000 0 |

由于短距离内全站仪测距精度极高, 在毫米级别, 为了检核 GPS 网数据解算的精度, 采用全站仪的测距值作为检核值。由 GPS 解算坐标反算 001, 002, 003 三个点距离和高差值, 以及全站仪对应的值, 如表 3 所示。

表 3 GPS 数据解算检核

| 点 1 | 点 2 | GPS 观测 | | 全站仪观测 | | 平距差值 (m) | 高差差值 (m) |
|-----|-----|-----------|----------|-----------|----------|-------------|-------------|
| | | 两点平距 (m) | 两点高差 (m) | 两点平距 (m) | 两点高差 (m) | | |
| 001 | 002 | 121.483 6 | 19.140 0 | 121.486 7 | 19.141 2 | 0.003 1 | 0.001 2 |
| 002 | 003 | 95.467 2 | 3.629 3 | 95.464 0 | 3.621 3 | 0.003 2 | 0.008 0 |

3.2 归心测量

采用导线测量的方法,从 001 点观测到 002 点,再从 002 点观测转点。通过转点,按照上述旋转不动点的测定方法,利用全站仪观测碎部点。每个测站采用四个测回,同时进行正倒镜观测,以减小测量仪器中经纬仪的视准轴不垂直于水平轴产生的偏差以及垂直角误差对坐标精度的影响。由于仪器、观测等产生的误差和仪器本身加工精度等因素的存在,每个观测标志旋转产生的离散点并不严格的在同一个圆心上,所以采用最小二乘拟合,来求得圆心在站心地平坐标系中的位置。利用如下的圆拟合公式,可拟合出观测标志在空间旋转的圆心。

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (3)$$

式中, a, b, c 为系数,可以利用离散点求得最小二乘解。由上式即可得到拟合的圆心,形成望远镜在空间的轴线。再利用轴线相交解算出旋转不动点在测站的站心地平坐标系中的位置。通过转点测站在 ITRF 中的位置,再通过地固坐标系与站心地平坐标系的转换,就可以求得 SLR 和 1.56 米望远镜的旋转不动点在 ITRF 中的位置。

经过上述的数据处理后,最终得到 SLR 和 1.56 米望远镜在 ITRF2008 参考框架下历元 2005.0 时刻的坐标,如表 4 所示。

表 4 SLR 和 1.56 米望远镜旋转不动点的坐标

| | X(m) | Y(m) | Z(m) |
|-------------|----------------|---------------|---------------|
| SLR 望远镜中心 | -2 830 744.457 | 4 676 580.291 | 3 275 072.825 |
| 1.56 米望远镜中心 | -2 830 708.338 | 4 676 619.159 | 3 275 062.440 |
| 参考框架 | ITRF2008 | | |
| 参考历元 | 2005.0 | | |

4 解算结果的外符合精度

上海佘山 SLR 站是 ITRF 参考站之一,ITRF2008 公布有佘山 SLR 站 7821 的坐标,如表 5 所示。

ITRF2008 中的坐标精度很高,可作为真值。把表 5 的坐标和表 4 中的 SLR 坐标进行比

表 5 上海 SLR 观测站 7821 在 ITRF2008 框架下的坐标和速度

| | $X(m)$ | $Y(m)$ | $Z(m)$ | $V_X(m)$ | $V_Y(m)$ | $V_Z(m)$ |
|------|----------------|---------------|---------------|----------|----------|----------|
| 7821 | -2 830 744.445 | 4 676 580.293 | 3 275 072.790 | -0.030 0 | -0.011 7 | -0.011 9 |
| 精度 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | | | |
| 参考框架 | IFRF2008 | | | | | |
| 参考历元 | 2005.0 | | | | | |

较, 即可得出本次测量结果的外部符合精度:

$$\delta X = \begin{pmatrix} -0.012 \\ 0.002 \\ 0.035 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

通过比较 SLR 坐标, 可以验证本次测量结果达到 3 cm 左右的外部符合精度。

5 结束语

本文利用 GAMIT 等数据处理软件, 对 2014 年佘山 SLR 望远镜和 1.56 米天体测量望远镜进行了旋转不动点的测量。在本次测量中, 我们克服了佘山地形复杂、通视困难、1.56 米望远镜处于室内等不利因素, 利用 GPS 控制和采用转点等方法, 在 GPS 观测、GPS 数据处理与分析、内部全站仪观测等工作中, 严格控制误差影响, 并且反复检核解算结果的精度, 最后达到较满意的结果。由于 SLR 和 1.56 米望远镜旋转不动点并非物理实点, 因此, 我们采用了绕轴旋转测量离散点, 并拟合圆心形成空间轴线, 最后利用空间轴线相交或者公垂线相交的方法, 得到了旋转不动点在空间中的位置。经过外部比较, 该测量精度达到厘米级, 可以用于后续相关的科研项目。

参考文献:

- [1] 王解先, 季善标, 施一民. 工程勘察, 1997, 03: 52
- [2] 朱文耀, 熊永清, 程宗颐, 等. 中国科学院上海天文台年刊, 1996, 17: 72
- [3] 沈云中, 陈延武. 同济大学学报, 2006, 34(2): 217
- [4] Garayt B, Kaloustian S, Long J, et al. Sheshan Co-location Survey Repor. Patias: Institut Géographique National, 2005
- [5] 李金岭, 乔书波, 刘鹏, 等. 武汉大学学报 (信息科学版), 2010, 12: 1387
- [6] 张阿丽, 熊福文, 朱文耀. 测绘通报, 2013, 12: 4

Surveying of Sheshan 1.56 Meters Optical Telescope and SLR Telescope's Fixed-rotation Point

ZHOU Jia-sheng^{1,2}, XU Chun-lei³, TANG Zheng-hong¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. ShangHai Hongzhen Survey Technology Limited Liability Company, Shanghai 201615)

Abstract: Sheshan 1.56 meters optical telescope and SLR (satellite laser ranging) telescope are important instruments for the astrometry and astro-geodynamic research. Accurate coordinates of these two observations are necessary to such scientific applications as satellite orbit determination, plate motion and so on. In this paper, we emphasize on the presentation of the strategy and processing of the station coordinate determination. At last, we find that the accuracy meets cm level which means that it can come into use in the following applications.

Key words: GPS; SLR; rotating-fixed point survey; ITRF