

文章编号: 1000-8349(2007)02-0177-07

# 上海天文台新 SLR 站精密定位和归心测量

熊福文<sup>1,2,3</sup> 朱文耀<sup>1,4</sup> 章红平<sup>1,2</sup> 张忠萍<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 上海市地质调查研究院, 上海 200072 4. 同济大学 现代工程测量国家测绘局重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 为使上海天文台新 SLR 站尽早投入全球 SLR 网的运行, 根据中国 SLR 网的有关要求, 对该站进行了精密定位和归心测量。测量中安置了特制的对中滑块设备, 在小范围内采用三角测量的高差替代大地高差的近似, 取得了较好的效果。测量结果表明: 上海天文台新 SLR 站相对于上海 IGS 站归心测量精度可优于 5 mm, 由上海 IGS 站引得的点位精度可优于 10 mm。

**关键词:** 天体测量学; 人卫激光测距; GPS; 精密定位

**中图分类号:** P129; P228; P237 **文献标识码:** A

## 1 概 述

上海天文台佘山观测基地的新 SLR(卫星激光测距) 站于 2005 年建成, 并于当年 8 月成功搬迁安装了激光测距设备, 新 SLR 站位于上海天文台 1.56 m 望远镜观测室西面 50 m 处, 离上海天文台 IGS(国际 GPS 服务) 站约 1 400 m。为了检测观测设备性能, 发现可能存在的系统偏差(如测距偏差、时间偏差等), 尽早恢复正常参与全球 SLR 网的运行, 中国 SLR 网要求及时确定该站厘米级的精密点位和优于 1 cm 相对 IGS 站的归心测量结果。SLR 站精密点位测定, 实际上就是确定该激光观测设备水平轴和垂直轴几何旋转中心不动点的精确空间位置。本次激光站的定位、归心测量工作, 我们采用了 3 台 GPS 接收机和两台全站仪。3 台 GPS 接收机构成将激光站包围在内的三角形, 这为全站仪的角度测量和三角高程测量的图形几何强度提供了有力的保障。精确确定激光设备水平轴和垂直轴几何旋转中心不动点的位置, 是完成这次精密测量的关键, 为此我们安置特制的对中滑块设备。在 GPS 测量之前, 先利用两台全站仪交会观测, 找出通过激光测距设备几何旋转中心的垂直方向, 并用一根特制的细螺杆铅垂放置标志出该方向。然后, 在这 3 个 GPS 点上架设全站仪, 对激光设备垂直轴标志进行三角测量, 同时在标志上安装有一红外反射片, 用以进行三角高程测量。为了保

收稿日期: 2006-03-15; 修回日期: 2006-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10603011)

障测量的精度,三角测量采用正倒镜观测,并且进行了4个测回的重复测量。为了保障3个三角测量起算点的精度,GPS测量进行了55h的连续观测。整个测量工作自2005年10月8日开始,至10月13日结束。

这次测量结果表明:上海新SLR站相对于上海IGS站归心测量的精度可优于5mm,由上海IGS站引得的上海新SLR站的点位精度可优于10mm。

## 2 测量原理

从原理上讲,整个测量工作涉及到两方面的内容:望远镜水平轴、垂直轴旋转中心不动点的确定;GPS测量、三角测量与坐标系之间的关系。

### 2.1 旋转中心不动点的确定

望远镜旋转中心不动点在水平面上的位置的确定类似于经纬仪视准轴误差 $2C$ 的调整和校正,确定的步骤如下:

- 1) 调整望远镜视准轴仰角高度,使仰角为 $0^{\circ}0'0''.00$ ,以保持视准轴水平;
- 2) 安置特制的对中滑块,使滑块中心大致在通过望远镜旋转中心不动点的铅垂线上,保持2个微调手柄分别平行于视准轴和横轴,旋紧4个固定螺丝;
- 3) 在互成 $90^{\circ}$ 的两个方向上分别安置两台全站仪,水平旋转望远镜,使视准轴对准B000点全站仪;
- 4) 调整B000、C000点全站仪,使十字丝瞄准滑块中心对中螺杆,并设置水平度盘读数为 $0^{\circ}0'0''.00$ ;
- 5) 顺时针旋转望远镜 $180^{\circ}$ ,操作2台全站仪,再次瞄准对中螺杆,记下水平角读数;按照水平角读数的一半分别反向旋转B000、C000全站仪,然后调整垂直于全站仪视准轴方向的微调螺旋,使对中螺杆位于全站仪十字中心;
- 6) 重复第4步、第5步2~3次,使对中螺杆精确位于通过望远镜旋转中心(图1中 $O$ 点)的铅垂线上。

在图1中, $FO'G$ 为实施第5步前望远镜的初始位置, $F'O''G'$ 为旋转 $180^{\circ}$ 后的位置, $O$ 点是望远镜旋转中心不动点的水平位置。

旋转中心高程的确定采用测量目标高程与查阅SLR望远镜设计参数相结合的方法。在水平位置确定以后,在对中螺杆处安置反射片,精确测量反射片中心的高程,随后用游标卡尺测量反射片中心至望远镜镜筒顶部平面的垂直距离,镜筒顶部平面至垂直不动点的距离则可通过查阅设计图纸获得,将反射片中心的高程减去上述两垂直距离之和,即可得到旋转中心的高程。

### 2.2 GPS测量、三角测量与坐标系之间的关系

在图2中的A040、B000、C000三点安置GPS接收机,通过与IGS SHAO(Shanghai Astronomical Observatory,上海天文台)站长时间的连续观测,可精确求得A040、B000、C000三个控制点的ITRF2000坐标。

三角网测量时,分别在A040、B000、C000三点设站,观测A040、B000、C000、 $O$ 四个点之间的平距、斜距、角度、高差,按照四等三角测量技术要求精确测量它们的相对关

系。因 A040、B000、C000 三个控制点之间最大边长(自 A040 至 C000)为 14.244 m, 为了建立 GPS 网与三角网之间的关系, 采取了高斯投影的方法。具体方法是: 首先, 求 A040、B000、C000 三点经度平均值, 确定三点的平均中央经线位置; 其次, 采用 WGS-84 椭球, 进行高斯投影正算, 将三个控制点空间坐标投影到平面, 利用三角测量的边、角、高差的关系, 采用严密的边角网平差软件(清华山维)可求得  $O$  点的坐标(平面坐标、大地高); 最后, 采用 WGS-84 椭球, 进行高斯投影反算, 得到  $O$  点的大地坐标  $B$ 、 $L$ 。

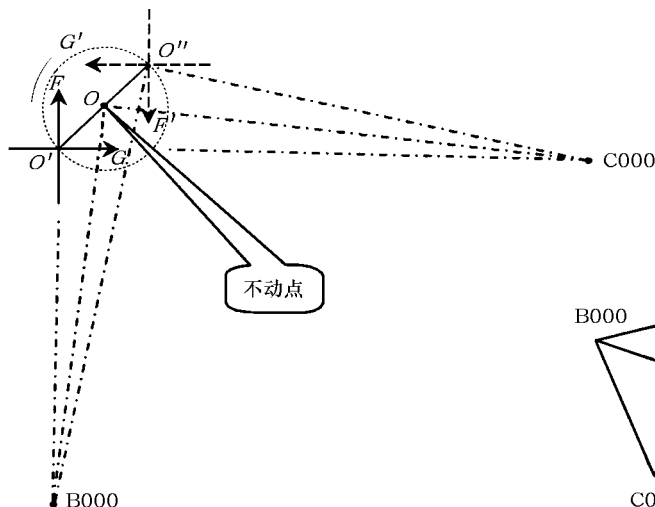


图 1 不动点确定示意图

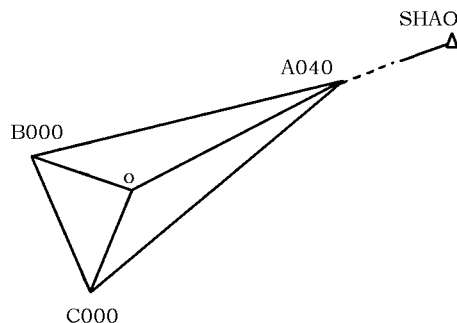


图 2 三角网示意图

利用三角高程求大地高差时, 需顾及误差的垂线偏差。当将由铅垂线确定的天顶距加上垂线偏差改化为以该点椭球面的法线确定的天顶距时, 即可获得大地高差。由于本文涉及的情况下, 三角高程测量中的基线很短(在图 1 所示由 A040-B000-C000 组成的三角形范围内, 最长基线仅为 14.244 m), 垂线偏差亦不大(小于  $20''$ ), 其对大地高的影响亦可忽略不计(小于 1 mm), 可以认为全站仪测得的两点之间的高差就等于大地高差。

### 3 数据处理

#### 3.1 参考历元及起算数据

数据处理时, 选取山脚下的 SHAO 站为起算基准。作为 IGS 站, 在 ITRF2000 地球参考架中, 历元 1997.0 的 SHAO 站坐标三分量  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的精度分别为 1 mm、2 mm、2 mm, 其速度三分量  $V_X$ 、 $V_Y$ 、 $V_Z$  的精度分别为 0.4 mm/a、0.5 mm/a 和 0.5 mm/a。观测时刻(2005 年的第 285 天,  $t = 2\ 005.780\ 8$ )时的 SHAO 站站坐标  $X(t)$ 、 $Y(t)$ 、 $Z(t)$  可下式求得:

$$\begin{aligned} X(t) &= X(t_0) + V_X(t - t_0) = -2\ 831\ 733.538\ \text{m} \\ Y(t) &= Y(t_0) + V_Y(t - t_0) = 4\ 675\ 665.941\ \text{m} \\ Z(t) &= Z(t_0) + V_Z(t - t_0) = 3\ 275\ 369.403\ \text{m} \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $t_0 = 1\,997.0$ 。根据误差传播定律,可以得到观测时刻 SHAO 站坐标  $X(t)$ 、 $Y(t)$ 、 $Z(t)$  精度分别为: 3.65 mm、4.82 mm、4.82 mm。

### 3.2 GPS 数据处理

数据处理采用了 GAMIT(美国麻省理工学院 GPS 数据处理软件)10.05 版软件和 SP3 格式 IGS 精密星历,在 Sittbl. 文件中未固定任何点,只是给 SHAO 站较强的约束值,按照年积日分别计算出 2005 年的第 284、285、286 天的单日基线解(见表 1,其中  $L$  表示基线的长度);最后通过计算  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  和基线长度的重复性来评定基线的精度(见表 2、表 3)。

表 1 基线精度统计一览表

基线	Day	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$L$	m			
						$\sigma X$	$\sigma Y$	$\sigma Z$	$\sigma L$
A040-	284	10.450 6	8.463 2	2.917 1	13.760 5	0.000 5	0.000 7	0.000 6	0.000 4
B000	285	10.451 3	8.464 2	2.911 1	13.762 2	0.001 2	0.001 5	0.001 4	0.007
	286	10.450 4	8.464 2	2.917 6	13.761 0	0.000 4	0.000 5	0.000 4	0.000 2
	加权平均	10.450 5	8.464 1	2.917 1	13.761 0	0.000 2	0.000 7	0.001 0	0.000 3
A040-	284	6.585 5	9.850 6	-7.912 8	14.248 4	0.000 5	0.000 7	0.000 6	0.000 4
C000	285	6.586 0	9.854 6	-7.907 3	14.248 3	0.001 2	0.001 5	0.001 4	0.000 7
	286	6.585 3	9.851 3	-7.913 6	14.249 2	0.000 4	0.000 5	0.000 4	0.000 3
	加权平均	6.585 4	9.851 3	-7.913 0	14.248 8	0.000 1	0.000 7	0.001 0	0.000 3
A040-	284	-982.768 5	-907.252 3	292.605 8	1 369.145 3	0.000 8	0.001 1	0.000 8	0.000 6
SHAO	285	-982.768 8	-907.251 1	292.612 0	1 369.146 1	0.001 2	0.001 5	0.001 4	0.000 7
	286	-982.770 8	-907.253 2	292.606 0	1 369.147 6	0.000 4	0.000 6	0.000 4	0.000 3
	加权平均	-982.770 2	-907.252 8	292.606 3	1 369.147 0	0.000 7	0.000 5	0.001 0	0.000 7
B000-	284	-3.865 1	1.387 4	-4.995 6	6.466 8	0.000 5	0.000 7	0.000 5	0.000 4
C000	285	-3.865 3	1.387 4	-4.996 1	6.467 4	0.000 4	0.000 5	0.000 3	0.000 2
	286	-3.865 2	1.387 1	-4.996 1	6.467 2	0.000 3	0.000 4	0.000 3	0.000 2
	加权平均	-3.865 2	1.387 2	-4.996 0	6.467 2	0.000 0	0.000 1	0.000 1	0.000 1
B000-	284	-993.219 1	-915.715 5	295.522 9	1 382.878 5	0.000 8	0.001 1	0.000 8	0.000 6
SHAO	285	-993.220 2	-915.718 3	295.523 2	1 382.881 1	0.000 4	0.000 6	0.000 4	0.000 3
	286	-993.221 3	-915.717 4	295.523 5	1 382.881 4	0.000 4	0.000 5	0.000 3	0.000 3
	加权平均	-993.220 6	-915.717 5	295.523 4	1 382.880 9	0.000 5	0.000 6	0.000 1	0.000 6
C000-	284	-989.354 1	-917.102 9	300.518 5	1 382.103 7	0.000 8	0.001 1	0.000 8	0.000 6
SHAO	285	-989.354 9	-917.105 7	300.519 3	1 382.106 3	0.000 4	0.000 6	0.000 4	0.000 3
	286	-989.356 1	-917.104 5	300.519 6	1 382.106 4	0.000 4	0.000 5	0.000 3	0.000 3
	加权平均	-989.355 3	-917.104 8	300.519 4	1 382.106 1	0.000 5	0.000 6	0.000 2	0.000 6

由于 A040 处附近是 40 cm 双筒望远镜的大圆顶,挡住了来自东面的卫星,另外,该圆顶还会对 GPS 信号产生反射,使观测量中存在多路径误差,该点的观测条件较差。因此,与 A040 相连构成的基线重复性相对较差,最大在 Z 方向上的误差达到了 6.5 mm,而其它基线的互差一般在 2 mm 左右。总体而言, GAMIT 解算的基线结果较好,除与 A040 相连的基线外,其余基线的三分量上重复性精度达到了 1 mm 左右。

表 2 基线绝对精度统计表

m			
<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>L</i>
0.000 36	0.000 91	0.001 15	0.000 48

表 3 基线重复率统计表

$10^{-8}\text{m}$			
<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>L</i>
56.604 28	-2.277 73	-27.802 88	47.649 92

GPS 网平差采用 GPS\_NET 软件, 在 ITRF2000 框架下, 固定 SHAO 站 2 005.780 8 历元坐标, 进行三维空间平差。平差后 A040、B000、C000 三点的 *X*、*Y*、*Z* 坐标精度可达 0.6 mm, 坐标值及其精度见表 4。

表 4 三维空间平差结果统计表

m						
点号	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	$m_x$	$m_y$	$m_z$
A040	-2 830 750.768	4 676 573.193	3 275 076.795	0.000 6	0.000 6	0.000 6
B000	-2 830 740.317	4 676 581.658	3 275 073.88	0.000 6	0.000 6	0.000 6
C000	-2 830 744.183	4 676 583.045	3 275 068.884	0.000 6	0.000 6	0.000 6
SHAO	-2 831 733.538	4 675 665.941	3 275 369.403	0.000 0	0.000 0	0.000 0

严格地讲, 在评定 A040、B000、C000 三点测量精度时, 应考虑 GPS 测量的旋转, 即星历旋转对测量精度的影响。因本次 GPS 数据处理时采用了 IGS 精密星历, 且 A040、B000 距 SHAO 站距离很短, 故 GPS 星历误差对测量精度的影响可忽略不计。

### 3.3 三角测量及其平差

将三个 GPS 点的坐标, 按三个控制点组成区域的平均经度 ( $121^{\circ}11'11''.846\ 156\ 3$ ) 可以得到其中央子午线, 将其进行高斯投影, 可得到平面坐标 (见表 5)。再以这些点为平面控制点, 输入三角测量观测数据, 利用清华山维软件, 进行平差计算, 得到 *O* 点的平面坐标 (平差结果见表 6), 相对于这三个 GPS 起算点, *O* 的平面点位精度为 0.6 mm。

表 5 高斯投影后平面坐标

m		
控制点	<i>x</i>	<i>y</i>
A040	3 441 633.199	500 008.019
B000	3 441 629.758	499 994.696
C000	3 441 623.833	49 9997.284

表 6 *O* 点平面坐标、平差后误差椭圆参数

m					
<i>x</i>	<i>y</i>	长轴	短轴	长轴方位	点位中误差
3 441 628.3441	499 998.961 9	0.000 5	0.000 4	76.003 8	0.000 6

### 3.4 高程测量计算

在对 A040、B000、C000 进行三角测量时,同时测量了三角高程。在忽略大地水准面不平行性改正(在 A040-B000-C000 组成的三角形范围内,此项改正在  $10^{-6}$  m 量级,故可以忽略)情况下,由测站点的大地高、观测的高差,就可分别得出  $O$  点的高程值(大地高),取平均即可得到  $O$  点的大地高(表 7)。

表 7  $O$ 点高程计算

m				
基线	起算点大地高	高差	大地高	平均 $H$
A040- $O$	99.615 6	0.808 7	100.424 3	100.420 8
B000- $O$	99.676 9	0.7428	100.419 7	
C000- $O$	99.826 7	0.591 7	100.418 4	

从高程值的离散度上看,三角高程的精度约为 3 mm。上表的数据表明,由 A040 计算得到的  $O$  点的大地高与其他两个差异较大,这是由于 A040 点周围的观测条件较差,影响了整体的三角高程计算结果。若不考虑 A040- $O$  基线高差,三角高程的精度约可达 1 mm。

根据  $O$  点的平面坐标,由高斯正反算公式,求得  $O$  点的经纬度  $B$ 、 $L$ ,从而相应得到三维空间坐标(见表 8)。

表 8  $O$ 点大地坐标、三维空间坐标

$B/(^{\circ} ' '' )$	$L/(^{\circ} ' '' )$	$H/m$	$X/m$	$Y/m$	$Z/m$
31 05 45.940 05N	121 11 11.806 98E	100.420 8	-2 830 744.675 1	4 676 580.618 3	3 275 073.053 6

## 4 精度评定

作为 IGS 站,SHAO 站在观测历元时位置的 3 个分量  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的精度分别为 3.65 mm, 4.82 mm, 4.82 mm, 根据表 3 和误差传播定律,可得到 A040、B000、C000 三点的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标精度分别为 3.70 mm、4.86 mm、4.86 mm,点位精度为 7.8 mm。相对于 A040、B000、C000 三个测站点, $O$  点位置的精度分别为 0.85 mm、0.85 mm、3.5 mm,点位精度为 4 mm。最终  $O$  点三维空间坐标  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  精度分别为 3.80 mm、4.93 mm、5.99 mm,点位精度为 8.64 mm。若考虑不动点的确定误差(约 2 mm), $O$  点位精度为 8.87 mm。

## 5 结 论

上海天文台新 SLR 站的精密定位采用了 GPS 技术与常规三角测量相结合的方法,并有效地实现了激光站望远镜旋转不动点的归心测量,测量结果表明:上海天文台新 SLR 站相对于上海 IGS 站归心测量精度可优于 5 mm,由上海 IGS 站引得的上海新 SLR 站的点位精度为  $\pm 8.87$  mm,达到预期的精度要求。

在本次归心测量中安置了特制的对中滑块设备,有利于精密确定 SLR 站望远镜旋转不动点的位置;在三个测站点围成的小范围区域内,采用三角测量的高差替代大地高差的近似是切

实可行的。激光站望远镜旋转不动点的准确度还有待国际 SLR 联测和数据综合处理的验证。

### 参考文献:

- [1] 朱文耀, 熊永清, 程宗颐, 等. 中国科学院上海天文台年刊, 1996, 17: 7-8
- [2] 王解先, 季善标, 施一民. 解放军测绘学院学报, 1997.3, 14(1): 7-8
- [3] 陈廷武. 上海天文台并址 VLBI、SLR 和 GPS 站空间相对关系精确测定. 硕士论文, 上海: 同济大学, 2004

## Precise Determination of the new SLR Station of Shanghai Observatory

XIONG Fu-wen<sup>1,2,3</sup>, ZHU Wen-yao<sup>1,4</sup>, ZHANG Hong-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhong-ping<sup>1</sup>

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China*; 4. *Key Laboratory of Advanced Engineering Survey of SBSM, Tongji university, Shanghai 200092, China*)

**Abstract:** To merge the new SLR observation-station in Shanghai Astronomical Observatory into the federal operation of global SLR network, here the high-precision GPS positioning and accurate reduction to the mark center of the new SLR station using traditional optical-electronic observation equipments are performed according to the precision requirements of the fiducial stations in Chinese SLR observation network. A little special sliding centering equipment is set on the SLR telescope to help find the real center of the vertical wheeling axes, which is based on the un-movement characteristics of the vertical wheeling axes wherever the telescope wheeling toward. After the vertical axes is found, the plane center is then determined according to the vertical distance from the reference point at the sliding centering equipment to the reference wheeling plane of the telescope. The whole surveying process is accomplished with three steps. First, set three reference points around the telescope, obtain their three-dimension coordinates in the ITRF at the observing epoch using three GPS receivers' observations linking to the IGS permanent station-SHAO. Second, using two total stations to get the plane coordinates and geodetic height based on the three ITRF coordinates and the agreement between the geodetic height difference and the leveling height difference in a small area. Combining the GPS precise engineering surveying technology and the traditional optical spatial direction intersection, we get a good result of three-dimension coordinate. The result indicates that the baseline's accuracy between the IGS SHAO and the mark center of the new SLR observation station is about 5 mm, the absolute positioning error related to the geo-center is about 10 mm while taking account into the accuracy of IGS SHAO in the ITRF.

**Key words:** astrometry; global positioning system(GPS); satellite laser ranging(SLR); precise determination