

2008年佘山25 m射电天线归心测量 中的GPS资料归算

刘 鹏^{1,2}, 程宗颐¹, 李金岭¹

(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 100049)

摘 要: 处理了2008年8月佘山25 m射电天线归心测量中的GPS观测资料。针对每期测量时段仅6 h, 不足以平滑测站坐标在天以内的高频变化, 以及测量数据存在的严重周跳问题, 特别调整了GAMIT软件解算模式的设置, 即将参考站和待测站的坐标采用值做松弛约束(10 m)、参数解算模式选择快速迭代, 以避免周跳较大的观测数据被删除, 并且采取了手动和软件自动相结合修复周跳的方式, 得到了形式误差小于4 mm的基线向量解, 且测控点在ITRF2005系统下的坐标精度均好于2 mm。在此基础上, 讨论了测控网的GPS测量结果与光学测量结果之间的坐标转换参数求解问题。具体计算表明, 由于存在大的旋转和平移, 参数解难以收敛, 为此采用了大参数部分预先扣除的方式。经6种解算模式的比较, 最终获得了较高精度的转换参数, 拟合残差均小于5 mm。以上工作为佘山站后续VLBI、SLR归心测量及本地连接测量做了必要的铺垫。

关 键 词: GPS; VLBI; 归心测量; ITRF

中图分类号: P228.4

1 引 言

随着天文地球动力学研究的迅速发展, 以及空间大地测量技术VLBI、SLR、GPS和DORIS等测量精度的提高, 人们对国际地球参考架(ITRF)的长期稳定性和精确性提出了更高的要求^[1]。各技术测站的参考点会因设备维护、器件更换或地震等原因发生变化, 导致在研究地球物理现象或测定观测目标的位置时引入不确定性因素。因此国际相关学术组织一直倡导对ITRF中的基准站维持每年一二次的归心测量, 以及在测站大修或突发事件后的跟踪测量, 以监测和追踪参考点的可能变化。同时倡导对多技术并置站开展高精度的本地连接测量, 确定各技术测站参考点之间的三维坐标差, 为多技术综合建立地球参考架提供约束条件, 并用于分析不同技术间可能存在的系统差。

我国的多技术并置站在建立欧亚大陆中东部与全球框架之间的联系中, 具有举足轻重的作用。以上海佘山为例, 该站并置了VLBI、SLR、GPS等技术, 技术多且观测资料丰富, 但是一直缺乏高精度的本地连接参数。1993年对该站VLBI和SLR的本地连接测量中, SLR站在高程上存在9 cm的误差。1995年采用GPS技术按照常规的方向、距离和精密水准等对VLBI、SLR、GPS三站进行了本地连接测量, 坐标分量的精度为 $2\text{ cm}^{[2-4]}$ 。2001年国际自转服务中心(IERS)公布的关于多技术并置站本地连接测量的报告中指出, 佘山VLBI、SLR站

收稿日期: 2009-12-04; 修回日期: 2010-02-02

资助项目: 国家自然科学基金(10973030, 10778635); 探月工程(嫦娥一号); 上海市空间导航与定位技术重点实验室(06DZ22101); 国家科技部863计划(2008AA12A209, 2008AA12A210)

点间的本地连接参数,在东西、南北、高程方向各存在 2.4 cm, 1.3 cm 和 1.9 cm 的误差^[5]。虽然 IERS 于 2003 年 11 月曾委派法国国家大地测量研究所 (IGN) 和美国哥达德空间飞行中心 (GSFC) 有关专家前来余山站进行本地连接测量^[6, 7],但是当时的 SLR 站已搬移至目前的新站点,并且 25 m 射电天线于 2007 年进行过轨道地基维修以及轮轨滚轴更换,因而需要重新进行余山 VLBI、SLR 测站的归心测量,以及两站间的本地连接测量。

测站参考点通常指主转动轴与从属轴所在平面的交点,位于设备内部。为监测它在 ITRF 中的变化,一般通过常规大地测量建立参考点和测控点间的位置关系,通过 GPS 测量获得测控点在 ITRF 下的坐标,再经坐标转换最终得到参考点在 ITRF 中的坐标。由此可见, GPS 测量资料的归算精度及其与常规大地测量结果之间转换参数的求解精度将直接影响到归心测量和本地连接参数的确定精度。本文拟分析处理 2008 年 8 月余山 25 m 射电天线归心测量中的 GPS 观测资料,并分析确定其与常规大地测量结果之间的坐标转换,为高精度测定余山本地连接参数进行必要的方法准备和参数精度检验。

2 测控网的 GPS 测量与资料解析

余山 25 m 射电天线归心测量的局域网布设情况如图 1 所示,1 至 5 号测控点均为钢筋混凝土柱状结构,顶端为带有强制归心螺孔的不锈钢板,参照文献 [8] 设计加工。归算点在不锈钢板的上表面、螺孔中心处。除了 2 与 3 号点因天线控制室遮挡不能通视之外,其余点位之间均可通视。5 号点位于建筑物顶部,主要用于 VLBI 和 SLR 站点间的本地连接测量。图 1 中“GPS”所示位置为国际 GPS 服务 (IGS) 基准站 (SHAO)。

对 1 至 5 号测控点构成的所有基线进行 GPS 等精度测量,采用了型号为 Topcon Legend-C 的接收机,具体设置为采样间隔 5 s、截止高度角 10° 、静态处理模式。每测量时段约 6 h,共进行了 12 个测量时段。

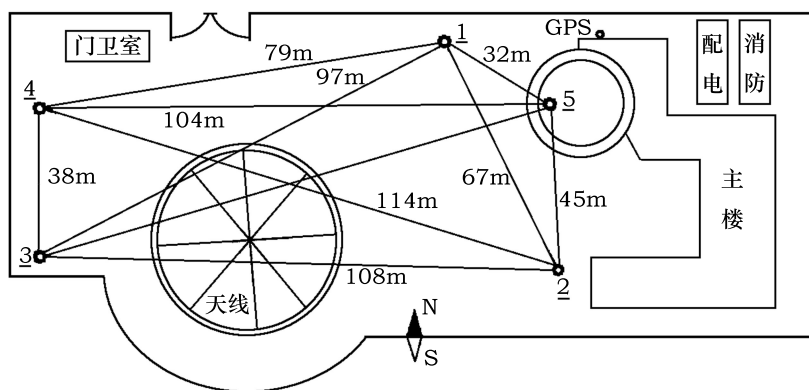


图 1 余山 25 m 天线周围测控点布设

2.1 GPS 资料解析

目前,国际上常用的 GPS 数据处理软件有美国麻省理工学院等单位研制的 GAMIT、瑞士伯尔尼天文研究所研制的 Bernese、美国宇航局喷气式推进实验室研制的 GIPSY^[9]等。利用精密星历,在参考站坐标精确已知的情况下,GAMIT 解算基线的相对精度可达 10^{-9} ,其源代码开放,用户可以根据需要进行源程序修改^[10]。鉴于余山 25 m 天线周围 GPS 观测采

用了单频接收机,且距离测控点 150 m 内的 SHAO 坐标精确已知,可作为参考站,与 5 个测控点组成了超短基线网。若利用 GAMIT 并采用双差固定解,可以有效地减弱卫星轨道误差、卫星钟差、接收机钟差以及电离层和对流层延迟误差等影响,有望获得较高的解算精度^[11]。虽然测量中所用的 Topcon Legend-C 接收机的随机软件 (Pinnacle) 也能提供较高精度的解算结果,但是采用的是 WGS84 坐标系,而我们需要的是 ITRF 下的坐标,故本文选用了 GAMIT 软件进行 GPS 资料归算。我们也具体比较了 Pinnacle 与 GAMIT 的解算结果,后者更为可取。

利用 GAMIT 对 GPS 资料进行处理的常规解算模式为:对参考站的先验坐标做强约束,如水平方向 5 mm,高程方向 5 cm 等,并采用自动修复周跳和多次迭代算法。以本期测量的一个测量时段为例,2008.237X 包含图 1 中的 1, 4 和 SHAO 三个测点的观测数据,经 GAMIT 常规模式解算,结果如表 1 所示。

表 1 GAMIT 常规解算模式下对 2008.237X 的处理结果

基线	X / m	Y / m	Z / m	L / m
1_4	$59.924\ 0 \pm 0.008\ 7$	$49.211\ 9 \pm 0.008\ 5$	$-18.024\ 5 \pm 0.003\ 9$	$79.608\ 9 \pm 0.004\ 0$
1. SHAO	$-34.743\ 9 \pm 0.672\ 1$	$-10.635\ 0 \pm 0.912\ 8$	$1.492\ 5 \pm 0.543\ 4$	$36.365\ 8 \pm 0.639\ 3$
4. SHAO	$-94.667\ 9 \pm 0.672\ 2$	$-59.846\ 9 \pm 0.912\ 7$	$19.517\ 0 \pm 0.543\ 4$	$113.686\ 3 \pm 0.650\ 8$
双差观测数: 525 个		拟前 $nrms$: 89.99	拟后 $nrms$: 0.19	

由表 1 可见,该期观测资料的双差观测个数仅数百,远远低于三站 6 h 测量时段中应有的双差个数(数千),表明大量观测数据已被删除。另外,基线向量的形式误差也很大(达 1 m 量级),说明常规解算模式是极其不成功的。其余测量时段在 GAMIT 常规处理模式下所得解算结果存在类似情况,有时虽然基线向量的形式误差较小,但对应的拟后标准化均方根($nrms$)很大,同样说明解算不成功。其中, $nrms$ 通常作为验证单天解质量好坏的标准,其理论值为 1,经验值在 0.25 左右。

经核查表明,此处 GPS 测量资料的周跳太多,采用 GAMIT 自动修复周跳的效果不佳,往往整颗卫星的数据被全部删除。在观测资料相对不足的情况下,很难解算出高精度的结果。针对这一问题,本文对 GAMIT 常规解算模式进行了必要的调整。

(1) 考虑到各基线每个测量时段仅约 6 h,不足以平滑固体潮、海洋负荷潮等天以内高频变化。若将参考站 SHAO 在 ITRF 中的先验坐标约束太强,则这些高频项将直接影响待测站点的坐标解算精度。此控制网为百米量级的超短基线,潮汐效应所致基线两端测站的坐标变化可视为同时和同向的,为此,将所有站点的先验坐标误差均设置为 10 m 的松弛约束,采用基线解算模式。

(2) GAMIT 解算中,对台站坐标文件及轨道数据文件(分别为 L 文件与 T 文件)进行更新,并采用快速迭代的方式,对模糊度等参数不做求解,以免过多观测数据被删除。在初略地解算后对中间文件利用人机交互编辑软件 Cview 对周跳进行手动修复,直至各跟踪数据序列趋于平滑。

(3) 修改批处理文件,令 GAMIT 调用手动修改周跳后的数据文件(c 文件),并进行周跳自动修复和随后的迭代解算(solve)。反复对基线形式误差较大的观测数据用 Cview 手动修

复周跳和 GAMIT 自动修复与迭代解算, 直至观测序列趋于平滑、以及拟后残差序列趋于正态分布。

最后解算得到的基线向量如表 2 所示。与表 1 比较可见, 调整 GAMIT 常规解算模式之后, 双差观测个数比调整之前明显增多, 达到了较为合理的水平。经上述解算模式调整, 对所有观测数据处理后的 *nrm*s 均小于 0.5, 基线向量的形式误差均达到了毫米级, 可见对 GAMIT 上述调整的效果是非常明显的。

表 2 调整模式下对 2008.237X 的 GAMIT 处理结果

基线	<i>X</i> /m	<i>Y</i> /m	<i>Z</i> /m	<i>L</i> /m
1. 4	59.919 3 ± 0.001 6	49.217 5 ± 0.002 5	-18.021 3 ± 0.001 8	79.608 1 ± 0.001 7
1. SHAO	-34.910 8 ± 0.002 3	-11.124 5 ± 0.004 0	1.390 8 ± 0.002 8	36.666 8 ± 0.001 9
4. SHAO	-94.830 0 ± 0.002 3	-60.341 9 ± 0.004 0	19.412 1 ± 0.002 8	114.064 5 ± 0.002 0
双差观测数: 3 916 个		拟前 <i>nrm</i> s: 44.34	拟后 <i>nrm</i> s: 0.22	

2.2 测控网 ITRF2005 坐标解算

本次 GPS 测量的持续时间仅前后 5 d, 板块运动对测控点坐标的累积影响在毫米级上可以忽略, 取观测时期的中间历元作为本期测量的参考历元, 具体为约简儒略日 54 702.5。推算 ITRF2005 下 SHAO 在该历元的位置及速度作为参考固定值, 并由此以及 GAMIT 解算得到的基线向量推算对应待测点在 ITRF2005 下的坐标, 作为初值。利用 GPS.net 软件^[12]进行空间网平差, 所得结果如表 3 所示, 可见各待测点在 ITRF2005 下的坐标内符精度均好于 2.0 mm。

表 3 测控点在 ITRF2005 下的坐标

测站	<i>X</i> /m	<i>Y</i> /m	<i>Z</i> /m	δX /m	δY /m	δZ /m
1	-2 831 698.702 3	4 675 677.028 9	3 275 367.991 5	0.001 8	0.001 8	0.001 8
2	-2 831 741.634 7	4 675 686.782 8	3 275 317.093 1	0.001 8	0.001 8	0.001 8
3	-2 831 649.241 8	4 675 743.130 5	3 275 316.839 0	0.001 8	0.001 8	0.001 8
4	-2 831 638.784 7	4 675 726.248 9	3 275 349.970 0	0.001 8	0.001 8	0.001 8
5	-2 831 729.438 5	4 675 675.873 5	3 275 359.048 3	0.001 9	0.001 9	0.001 9

2.3 GPS 与常规大地测量结果之间的转换

局域网中各测点轮流架设仪器, 向所有可通视点进行边角网测量。其中, 角度测量包括水平和天顶距方向的盘左、盘右观测, 距离测量在每次仪器对准靶标时获得, 由此得到各测控点之间的边长和方位角, 从而解算出彼此的相对坐标。将图 1 中 1 号点位作为局域网的原点, 2 号点位作为参考方向 ($y = 0$), x - y - z 为右手系。经空间网平差得到测控网中各点的坐标如表 4 所示^[13]。

为了确定各测控点的常规大地测量所得的坐标与 GPS 资料归算所得的 ITRF2005 坐标之间的转换关系, 并检核 GPS 资料归算的合理性, 对表 4 至表 3 数据进行了七参数拟合。参照图 1, 表 4 数据近似为 1 号点位处的站心坐标 (南东上, 右手系), 而表 3 则为地心右手系, 因而两套坐标之间存在地球半径量级的较大平移, 而且存在较大的定向差, 这些很可能成为两

表 4 常规大地测量得到的测控点坐标

测站	X/m	Y/m	Z/m	$\delta X/m$	$\delta Y/m$	$\delta Z/m$
1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	/	/	/
2	67.308 8	0.000 0	-0.112 5	0.000 13	/	0.000 04
3	16.716 6	-95.673 1	0.026 6	0.000 10	0.000 15	0.000 05
4	-17.459 6	-77.670 9	0.158 5	0.000 08	0.000 13	0.000 04
5	26.207 6	16.498 1	8.167 7	0.000 08	0.000 04	0.000 03

套坐标之间转换参数精确求解的障碍。为此在调节参数的量纲使其形式误差基本相当的基础上^[14]，采取了如下 6 种方式的七参数求解，参数初值的动态范围取为 0.01 至 1 000。

- (1) 对大旋转和大平移不作任何预先处理，直接求解；
- (2) 事先将表 4 数据的坐标系定向近似旋转至地心系；
- (3) 在 (2) 的事先处理基础上将表 4 坐标原点由站心平移至地心；
- (4) 将表 3 数据的坐标系定向近似旋转至站心系；
- (5) 在 (4) 的事先处理基础上将表 3 的原点平移至站心；
- (6) 将表 3 数据的原点平移至站心或将表 4 数据的原点平移至地心。

以上 6 种求解方式迭代计算的终止条件均为每个参数的改正数小于其形式误差。迭代计算的次数和拟合残差的加权均方根误差如表 5 所示，其中 N 为迭代次数， σ 为拟合残差，平移、旋转参数初值的单位分别为 m 和 rad。

表 5 七参数转换关系系数种确定方式的比较

初值	求解模式									
	(1)		(2)		(3)		(4)、(5)		(6)	
	N	σ/m	N	σ/m	N	σ/m	N	σ/m	N	σ/m
0.01	18	3.130 1	4	0.004 5	4	0.045 8	3	0.004 5		
0.1	26	0.004 5	4	0.004 5	4	0.045 8	3	0.004 5		不
0	16	3.130 1	4	0.004 5	4	0.045 8	3	0.004 5		
1.0	41	3.130 1	4	0.004 5	4	0.045 8	3	0.004 5		收
10	23	0.004 5	4	0.004 5	4	0.045 0	3	0.004 5		
100	14	0.004 5	4	0.004 5	4	0.037 8	3	0.004 5		敛
1000	9	4.365 1	4	0.004 5	4	0.041 6	3	0.004 6		

采取第 (2) 种解算方式时，不同初值情况下均收敛至如下结果：

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -2\,831\,698.701 \pm 0.001\,1 \\ 4\,675\,677.029 \pm 0.001\,2 \\ 3\,275\,367.989 \pm 0.001\,1 \end{bmatrix} \text{ m}, \mathbf{D} = (-6.70 \pm 1.50) \times 10^{-5}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 55\,291.1 \pm 6.1 \\ -67\,161.1 \pm 4.7 \\ -62\,009.9 \pm 3.5 \end{bmatrix} \text{ as.}$$

第 (4)、(5) 种解算方式得到的结果，除平移参数存在固定差值之外，其他均一致。第 (4)

种解算方式的参数解为:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0.00235 \pm 0.00099 \\ -0.00166 \pm 0.00099 \\ -0.00179 \pm 0.00133 \end{bmatrix} \text{ m}, \mathbf{D} = (-6.70 \pm 1.50) \times 10^{-5}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 18.6 \pm 3.5 \\ 668.1 \pm 6.9 \\ -101057.8 \pm 3.1 \end{bmatrix} \text{ as}.$$

由表 5 可见:

A. 在对表 3、表 4 所对应的两套坐标系下的 5 个公共点坐标进行七参数转换时, 若采用第 (1) 种方式直接求解, 得到的解不稳定, 初值动态范围有限, 加权均方差 (WRMS) 有时达到米级, 是不成功的。

B. 比较第 (2)、(3) 种求解方式, 事先扣除大的旋转是有效的, 但是同时改正了平移之后, 拟合残差明显增加 (达到厘米级)。

C. 比较第 (4)、(5) 种求解方式, 同样表明事先扣除大的旋转是非常必要的, 在此基础上改正平移对拟合结果无影响。

D. 若采用第 (6) 种解算方式, 即仅仅预先扣除大的平移, 参数解算不成功。

综合以上情况可见, 预先扣除大的旋转量对于高精度参数求解是非常必要的, 但是对于大的平移量的预先处理, 情况则相对复杂, 有时进行了预先处理反倒影响参数的求解精度。比如, 在第 (3) 种方式时, 表 4 数据预先旋转, 并平移至地心之后, 相当于确定两套地心坐标之间的转换参数。但是, 此处的局域网仅百米量级, 相对地心的张角不足 $5''$ 。确定这样的两套地心坐标系之间的转换参数, 类似于确定两根 6378 km 长的“杆子”的相对定向, 旋转参数非常不稳定, 因而对应的拟合残差较大。

具体检验表明, 在综合了预先扣除量之后, 第 (2)、(4)、(5) 三种处理方式所得表 4 至表 3 数据的七参数转换关系是一致的, 拟合残差小于 5 mm。这也在一定程度上表明, 对局域网的常规大地测量和 GPS 测量以及对观测资料的归算处理, 尤其是本文在 GPS 资料处理中采取的一些特殊措施, 都是比较合理的。

3 结束语

本文利用 GAMIT、GPS_net 等数据处理软件, 对 2008 年余山 25 m 天线归心测量中的 GPS 资料进行了分析处理。由于测量数据周跳情况严重, 采用 GAMIT 常规解算设置时, 所得结果不理想, 为此特别调整了 GAMIT 解算模式的设置, 获得了 ITRF 下测控点的精确坐标。在确定局域网常规大地测量结果与 GPS 测量结果之间的七参数转换关系时, 考虑到大的旋转和大的平移可能对参数确定的不利影响, 本文比较了 6 种求解模式, 结果表明, 事先扣除大的旋转是非常必要的, 但对于大平移的处理则需要慎重。本文工作是后续的余山 VLBI、SLR 站点归心测量及本地连接测量的必要铺垫。

参考文献:

- [1] 朱文耀, 韩继龙, 马文章. 天文学报, 2000, 41(3): 312
- [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: 7
- [3] 熊永清, 朱文耀. 中国科学院上海天文台年刊, 1996, 17: 67
- [4] 王解先, 季善标, 施一民. 解放军测绘学院学报, 1997, 14(1): 7

- [5] Altamimi Z. IERS Message No.7, IERS ITRS Product Center, Institut Geographique National, 2001
- [6] 沈云中, 陈延武. 同济大学学报, 2006, 34(2): 217
- [7] Garayt B, Kaloustian S, Long J *et al.* Sheshan Co-location Survey, Report and Results. Service de Geodesie et de Nivellement, German : Direction de la Production, 2005
- [8] 臧德彦. 测绘通报, 2006, 10: 46
- [9] 崔书珍, 彭军还, 谢劭峰. 桂林工学院学报, 2006, 26(2): 218
- [10] 匡团结, 王兵海. 铁道勘察, 2008, 2: 31
- [11] 孙华, 程新文, 徐景田等. 测绘工程, 2009, 18(4): 70
- [12] 熊福文, 朱文耀, 章红平等. 天文学进展, 2007, 25(2): 177
- [13] 李金岭, 乔书波, 刘鹏. 测绘科学, 2010, 35(2): 69
- [14] 李金岭, 刘鹏, 乔书波等. 测绘科学, 2010, 35(4): 76

Analysis of the GPS Observations in the Site Survey at Sheshan 25 m Radio Telescope in 2008

LIU Li^{1,2}, CHENG Zong-yi¹, LI Jin-ling¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The reduction of GPS observations in the site survey at Sheshan 25 m radio telescope in August 2008 is reported. Because each session is only 6 hours and the subdaily high frequency variations in the station coordinates could not be smoothed, and because there are serious cycle slips in the observations, large volume of data would be rejected during the software automatic adjustment of slips, the ordinary solution settings of GAMIT is accordingly adjusted, as loosening the constraints in the a priori coordinates to 10 m, adopting the "quick" mode in solution iteration to avoid large volume of data be deleted, and combining Cview manual operation with GAMIT automatic fixing of the slips. The resulted coordinates of stations in ITRF2005 are then compared with the conventional geodetic observations of the control polygon. Due to the large rotations and translations in the two coordinate sets (geocentric versus near-topocentric), the seven transformation parameters failed to be solved for directly. With various trial solutions it is shown that with the partly pre-removal of the large parameters, the high precision transformation parameters could be reached with postfit residuals at the millimeter level. This analysis is a necessary preparation for the follow-on site survey and local tie survey of VLBI and SLR at Sheshan.

Key words: GPS; VLBI; Site Survey; ITRF