

陆态网络 VLBI 和 SLR 站的空间归心测量^①

马海建^{②*} 李 强^{*} 游新兆^{*} 沈云中^{**} 王解先^{**} 吴 斌^{***}

(^{*} 地壳运动监测工程研究中心 北京 100036)

(^{**} 同济大学测量与国土信息工程系 上海 200092)

(^{***} 中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要 为了实现多种地壳运动测量技术的综合应用,研究了对全球卫星导航定位系统 (GNSS)、甚长基线干涉测量 (VLBI) 和卫星激光测距 (SLR) 基准站观测数据进行联合解算的关键技术——高精度的空间归心测量。首次全面地进行了对实时监测地球岩石圈、水圈和大气圈变化的中国大陆构造环境监测网络 (CMONOC) 中 VLBI 站和 SLR 站的归心测量,并给出了观测结果,这对于 CMONOC 的运行与维护具有非常重要的意义。

关键词 陆态网络, 甚长基线干涉测量 (VLBI), 卫星激光测距 (SLR), 归心测量

0 引 言

中国大陆构造环境监测网络 (crustal movement observation network of China, CMONOC, 简称陆态网络) 是国家发展和改革委员会批复建设的“十一五”国家重大科技基础设施建设项目。陆态网络是以全球卫星导航定位系统 (global navigation satellite system, GNSS) 为主, 辅以甚长基线干涉测量 (very-long-baseline interferometry, VLBI)、卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 和干涉合成孔径雷达 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 等空间技术, 结合精密重力和精密水准观测技术, 对地球岩石圈、水圈和大气圈变化进行实时监测的国家地球科学综合观测网络。陆态网络多个基准站采用了 GNSS、SLR 和 VLBI 等多种测量技术。其中, 上海佘山站和云南昆明站具有 GNSS、SLR 和 VLBI 三种观测手段, 新疆乌鲁木齐站具有 GNSS 和 VLBI 两种观测手段, 北京房山站、武汉九峰站、陕西西安站和吉林长春站都具有 GNSS 和 SLR 两种观测手段。

当综合应用 GNSS、VLBI、SLR 等多种空间大地测量技术时, 需要将各种测量技术的观测数据进行联合解算^[1-6]。为了实现联合解算, 必须进行归心测量, 即确定 VLBI 和 SLR 观测设备的几何旋转中心

的精确空间位置。根据陆态网络的运行维护要求, 地壳运动监测工程研究中心对所有 GNSS、SLR 或 VLBI 站进行了空间归心测量, 获得了高精度的归心参数, 为多种空间大地测量技术的综合使用奠定了基础。

1 归心测量方案

VLBI 和 SLR 归心测量通过精确测定观测设备的几何旋转中心的空间位置, 明确 GNSS、VLBI 和 SLR 各种观测结果的空间位置关系^[1]。VLBI 和 SLR 几何旋转中心无法直接测量, 因此, 归心测量方案通常分为两个步骤^[1-5]: 一是选择起算点 (通常为 IGS 站 (国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service) 的卫星跟踪站) 或陆态网络的基准站), 在 VLBI 和 SLR 站周围布设观测墩, 利用 GPS 接收机和全站仪实施交会控制联测, 精确测定交会控制点位置; 二是通过在交会控制点架设全站仪测量 VLBI 和 SLR 上安置的旋转标志点, 计算几何旋转中心。

1.1 控制网布设

控制网是空间归心测量的首级控制网, 具有高精度、传递基准的作用。交会控制点是整个测量中使用最频繁的控制网点。各交会定点控制网的相邻控制点间隔一般几十米至 100 多米。交会控制点的

① 国家重大科技基础设施项目“中国大陆构造环境监测网络”。

② 男, 1984 年生, 博士, 副研究员; 研究方向: 陆态网络项目管理, 以及遥感与 GIS 的地震灾害应用研究等; 联系人, E-mail: hjma@neis.cn (收稿日期: 2014-04-09)

布设应满足至少有两台全站仪能同时观测各交会标志,增加交会条件,提高交会定点的精度。

控制网的布设应根据各 VLBI 和 SLR 站的实际需求。SLR 站附近需要安置两个观测墩,其中安置全站仪的观测墩离 SLR 站尽可能小于 50m,另一个用作后视方向的观测墩可以适当远一些,但不应超过 300m。陆态网络所有 SLR 站中,除武汉九峰山因观测条件所限,需要直接将 GNSS 接收机安置在 SLR 望远镜顶部直接观测外,其余 SLR 站均需要设置两个观测墩。

VLBI 站应根据实际情况在其四周选定 4 个或 4 个以上的空间交会控制点,以便于对 VLBI 进行空间交会测量。由于受场地限制,很难保证每个点都能满足 GNSS 观测要求,还需要用全站仪进行加密。如乌鲁木齐 VLBI 站的控制点分布(图 1)。图 1 中 A、B、C、D 为四个强制对中观测墩,分布在 VLBI 四周,其中 B、A 和 C 之间不能通视。



图 1 乌鲁木齐 VLBI 站控制点分布图

1.2 天线几何旋转中心确定

由于 VLBI、SLR 的天线都比较大,因此它们的几何旋转中心很难按照常规方法确定。下面将给出 VLBI、SLR 天线几何旋转中心的观测方案。

(1) VLBI 几何旋转中心的观测方案

如图 2(a)所示的标志,在 VLBI 天线的一侧从上到下可以安装 2 个标志,每个标志的外侧一端带有一个直径为 6mm 的小球(见图 2(b))以便于方向观测,配上 360 度棱镜后在任何位置都可以进行精密测距。让 VLBI 绕竖直轴旋转,每旋转 15°,位于 VLBI 站周边交会控制网内 2 个控制点上的 2 台全站仪对每一个标志观测水平方向、垂直角(天顶距)和距离观测,得到一组数据。理论上,当天线绕竖直轴旋转一周时,对每个标志点可以测定 24 组数据。

这样就测定了天线上每一标志点在天线绕竖直轴旋转时由离散点构成的、位于水平面内的轨迹。用圆方程拟合轨迹上的离散点,可以得到以天线的竖直旋转轴为中心的一个圆,圆心点所在的位置就确定了天线的竖直轴。

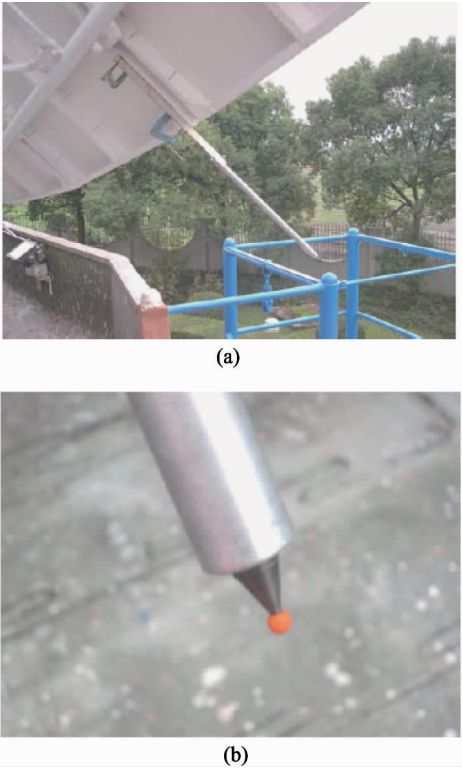


图 2 VLBI 天线上标志安装位置及样式

按照同样的方法,让 VLBI 绕水平轴旋转,每旋转 10°,利用全站仪对每一个标志点观测水平方向、垂直角(天顶距)和精密距离,得到一组数据。理论上,当天线绕水平轴旋转到竖直方向时,对每个标志点可以测定 9 组数据。这样就测定了天线上每一标志点在天线绕水平轴旋转时由离散点构成的、位于垂直面内的轨迹。用圆方程拟合轨迹上的离散点,可以得到以天线的水平旋转轴为中心的一个圆,圆心点所在的位置就确定了天线的水平轴。

实际观测中,通过增加水平轴和竖直轴的观测圈数,取观测结果的平均值作为最终结果。然后,计算水平轴和竖直轴的交点,确定了 VLBI 天线的几何旋转中心。

(2) SLR 几何旋转中心的观测方案

SLR 竖直旋转轴的测定方法基本和 VLBI 竖直旋转轴的测量的方法相同,观测标志安装如图 3 所示。

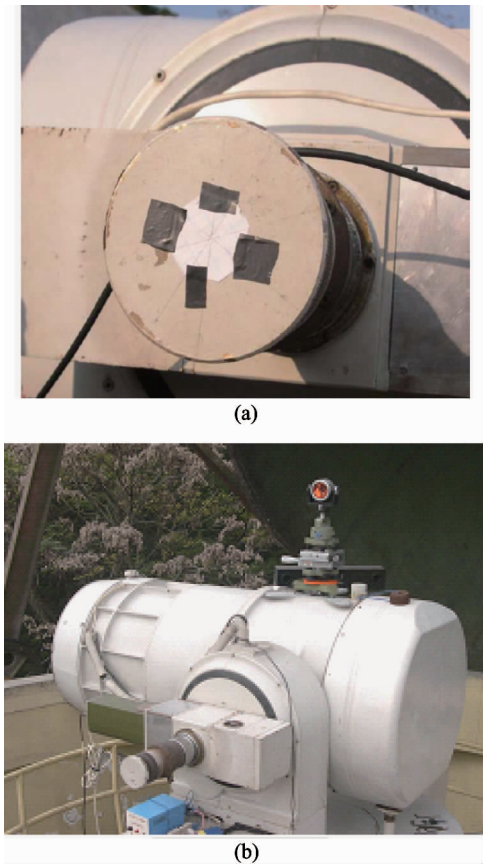


图 3 SLR 观测标志

当 SLR 绕竖直轴旋转时,直接观测贴在 SLR 望远镜镜头上的反射片见图 3(a)。当 SLR 绕水平轴旋转时,直接观测固定在 SLR 水平轴上棱镜见图 3(b)。如果水平轴裸露在外,可直接测量其轴心坐标。

通过拟合旋转轨迹,计算水平轴和竖直轴,确定了 SLR 的几何旋转中心。不同站的实际观测条件有些差别,观测墩位置和视线条件会影响有效观测的数量,需用提前考虑。

2 归心测量结果及精度

根据测量方案,在 VLBI 和 SLR 站周围布设观测墩,利用 GPS 和全站仪实施观测,获得控制网的 GPS 观测与全站仪观测数据,以及归心观测等外业数据。内业工作分为控制点坐标解算,几何旋转中心拟合,计算出起算点与 SLR、VLBI 旋转中心的空间坐标差,并分析其精度。

2.1 数据处理

(1)控制点坐标解算

控制网平差是非常重要的一个环节,通过 GNSS

基准站(IGS 站或陆态网络基准站)引入观测基准,是获得高精度测量结果的基础性工作。

以附近的 IGS 站或陆态网络的基准站作为起算点,联合 GPS 观测数据、全站仪观测数据联合平差解算。首先,采用 GAMIT 软件或 Bernese 软件解算 GPS 观测基线,并进行 GPS 观测平差解算。然后,以 GPS 平差结果为起算方位和起算点,采用同济大学编制的 ThreeD 软件的全站仪观测数据的三维网平差。平差前需要将全站仪测量的距离归算到标志中心,垂直角高差值应顾及大气折光改正。联合平差后,交会定点的精度应该达到 2mm。

(2)拟合几何旋转中心

VLBI 天线绕垂直轴或水平轴按一定角度旋转,得到一组水平方向、竖直角与距离的空间交会观测数据,经过三维平差解算后,得到旋转标志点的坐标及精度。

拟合求出水平圆标志点的圆心位置可确定 VLBI 旋转中心的平面坐标。同样拟合求出垂直圆标志点的圆心位置,可确定 VLBI 高程。由于观测误差以及天线本身旋转晃动误差,导致每个标志点的观测结果并没有严格分布在一个平面和同一圆周上。因此,为了求得由这些离散点确定的圆轨迹,采用最小二乘曲线拟合的方法^[6]。

首先,将测量的标志点投影到平面上,空间平面方程可表示为

$$AX_g + BY_g + CH_g + D = 0 \tag{1}$$

然后,在该投影平面内拟合圆心坐标和半径。理论上,在投影平面内,天线绕水平、竖直轴旋转时的运动轨迹应当满足以下圆曲线方程:

$$(u - u_o)^2 + (v - v_o)^2 = r^2 \tag{2}$$

将每个投影点坐标代入式(2),得到相应的误差方程,在改正数平方和最小的条件下,求出方程三个系数 u_o 、 v_o 和 r 的最小二乘解。然后,根据圆曲线方程,计算出圆心位置和半径。再将圆心坐标反算到测量坐标系。

乌鲁木齐 VLBI 天线安装了两个旋转标志,分水平和垂直进行了正、反方向的两圈观测。图 4 和图 5 分别投影平面内为水平和竖直方向的拟合结果。表 1 为每圈观测的拟合结果及最终平均结果。

通过上述方法,计算得到 VLBI 和 SLR 几何旋转中心的位置,通过旋转变换矩阵可以得到空间坐标系,进而在一定坐标框架下,确定 VLBI 与 SLR 旋转中心与起算站之间的精确相对关系。

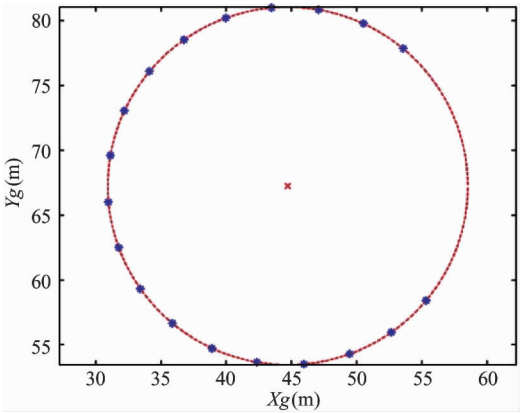


图4 乌鲁木齐 VLBI 竖直旋转中心拟合

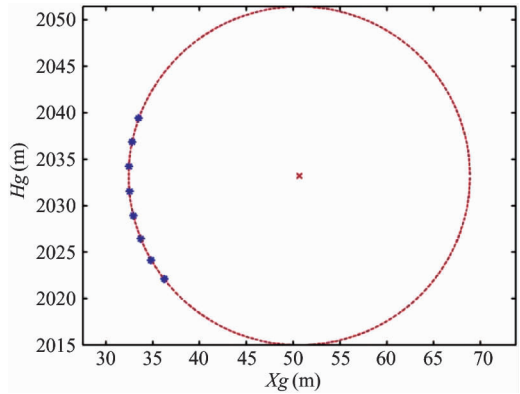


图5 乌鲁木齐 VLBI 水平旋转中心拟合

表 1 乌鲁木齐 VLBI 旋转中心高斯投影平面坐标和高程

选项	X_g (m)	Y_g (m)	M_{X_g} (mm)	M_{Y_g} (mm)	选项	H_g (m)	M_{H_g} (mm)
HM1S	44.7102	67.2652	-2.3	0.9	VM1Y	2033.2155	0.6
HM2S	44.7099	67.2651	-2.6	0.8	VM2Y	2033.2161	1.2
HM1N	44.7147	67.2634	2.2	-0.9	VM1F	2033.2141	-0.8
HM2N	44.7152	67.2635	2.7	-0.8	VM2F	2033.2138	-1.1
VLBI 中心坐标	$X_g = 44.7122\text{m}$		$Y_g = 67.2639\text{m}$		$H_g = 2033.2149\text{m}$		
坐标中误差	$M_{X_g} = 1.42\text{mm}$		$M_{Y_g} = 0.49\text{mm}$		$M_{H_g} = 0.55\text{mm}$		
点位误差	$M_p = 1.6\text{mm}$						

注：H 代表水平旋转,V 代表垂直旋转,M1 代表 1 号旋转标志,M2 代表 2 号旋转标志,N 表示水平逆时针，S 表示水平顺时针,Y 表示垂直上仰,F 表示垂直下降

2.2 结果及精度

归心测量结果的精度主要由测量误差和拟合误差两部分组成。测量过程包括控制点测量和旋转标志测量两个部分。拟合误差则包括单圈几何中心拟合误差及平均多圈拟合结果的误差。具体结果计算和精度分析由同济大学完成,相关模型见参考文献[1-4]。这里仅列出陆态网络的各 SLR 和 VLBI 站的归心观测的计算结果及精度。

各 SLR 站归心结果和精度分别见表 2。其中,西安站和武汉站距 IGS 站距离较远,超过了 10km,选择了陆态网络 GNSS 基准站作为起算点。除武汉站垂直误差精度超过 1mm 外,其余各 SLR 站的三维归心坐标精度基本达到了亚毫米级。

各 VLBI 站均以 IGS 站为起算点进行了归心测量,测量结果和精度分别见表 3。各站的三维归心坐标精度均小于 2mm。

表 2 陆态网络 SLR 站空间归心坐标精度

点名	起算站	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	$M_{\Delta X}$ (mm)	$M_{\Delta Y}$ (mm)	$M_{\Delta Z}$ (mm)
上海	SHAO	989.0580	914.3549	-296.5724	0.37	0.48	0.37
长春	CHAN	40.2996	46.0158	-13.3399	0.31	0.30	0.31
昆明	KUNM	-20.216	-18.856	45.7754	0.21	0.47	0.22
北京	BJFS	-16.5166	118.3174	-146.2835	0.21	0.22	0.29
西安	XIAA	-14.8656	14.6918	-28.0790	0.21	0.26	0.20
武汉	WHAN	136.3406	70.5864	16.1321	0.75	0.75	1.78

注:XIAA、WHAN 为陆态网络基准站,其余为 IGS 站。

表 3 陆态网络 VLBI 站空间归心坐标精度

点名	起算站	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	$M_{\Delta X}$ (mm)	$M_{\Delta Y}$ (mm)	$M_{\Delta Z}$ (mm)
上海	SHAO	46.3460	67.6428	-41.8153	0.99	0.74	0.40
乌鲁木齐	GUAO	-68.5363	-24.1483	35.5471	1.64	1.20	0.62
昆明	KUNM	103.1364	118.3366	-226.3731	1.25	0.10	0.32

3 结 论

陆态网络在全国范围内共升级改造了 6 个 SLR 基准站和 3 个 VLBI 基准站,极大地提升了我国的观测能力。为了实现综合利用 GNSS、VLBI 和 SLR 基准站观测数据进行联合解算,地壳运动监测工程研究中心组织了全面的 SLR 和 VLBI 基准站的空间归心测量,获得了高精度的站心坐标,为观测数据的综合应用奠定了基础。同时,这也是陆态网络自建成以来第一次全面地开展 VLBI 和 SLR 站归心观测工作,对于陆态网络的运行与维护具有非常重要的意义,为日后常规复测提供了示范样本。

致谢:感谢中国科学院上海天文台、中国科学院云南天文台、中国科学院乌鲁木齐天文台、中国科学院长春人造卫星观测站、中国测绘科学研究院房山人造卫星观测站、中科院测量与地球物理研究所,西

安测绘研究所和湖北省地震局的相关人员在测量过程中提供的支持与帮助。

参考文献

[1] 沈云中,陈廷武. 上海天文台并址站的空间归心测量. 同济大学学报(自然科学版),2006, 34(2): 217-220

[2] 李金岭,乔书波,刘鹏等. 2008 年佘山 25m 射电天线归心测量. 武汉大学学报·信息科学版,2010, 35(12): 1387-1391

[3] 熊福文,朱文耀,章红平等. 上海天文台新站精密定位和归心测量. 天文学进展,2007, 25(2):177-183

[4] 王解先,季善标,施一民. 上海天文台的 VLBI、SLR、GPS 站的空间归心测量. 解放军测绘学院学报,1997, 14(1):7-10

[5] 刘光明,贾小林,巨志斌等. 昆明固置流动 VLBI 站点归心. 测绘工程, 2002, 11(3):48-52

[6] 刘光明,马金辉,唐颖哲. VLBI 归心测量中的空间拟合. 测绘通报, 2011, (10):11-13

Site survey of VLBI and SLR stations in CMONOC

Ma Haijian *, Li Qiang *, You Xinzhaoh *, Shen Yunzhong **, Wang Jiexian **, Wu Bin ***

(* National Earthquake Infrastructure Service, Beijing 100036)

(** School of Surveying and Geo-Information, Shanghai 200092)

(*** Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

To realize the comprehensive utilization of different techniques for measuring crustal movement, a study on high precision site survey, the key to integrating the observation data from the stations of global navigation satellite systems (GNSS), very-long-baseline interferometry (VLBI) and satellite laser ranging (SLR), was conducted. The site survey of the VLBI station and the SLR station of the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) for real-time monitoring the globe’s lithosphere, water stratum and atmospheric lager was carried out for the first time, and the observation results were given, which are very important for the operation and maintenance of CMONOC.

Key words: CMONOC, very-long-baseline interferometry (VLBI), satellite laser ranging (SLR), site survey