

中国 VLBI 网测站参数解析

刘 鹏¹ 李金岭¹

1 中国科学院上海天文台,上海,200030

摘要:介绍了利用 OCCAM 软件处理中国 VLBI 网(CVN)4 台站常规天体测量与大地测量观测资料的解算方案,包括参数设置、模型选取和数据编辑等。通过单次实验解算和联合平差,获得了 ITRF2000 下参考历元 J2010.0 时昆明和北京站 cm 级的站坐标及 mm 级每年的站速度。解算值相对于嫦娥一号工程期间采用值的推算值,坐标改正最大至 51.9 cm,速度改正最大至 $11.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

关键词:VLBI; 测站坐标; OCCAM 软件; ITRF; 嫦娥工程; 联合平差; 深空探测

中图法分类号:P228.6

文献标志码:A

甚长基线干涉测量(VLBI)的基本原理是,两台站同时接收来自同一目标天体(卫星或河外射电源)的信号,通过相关处理获得该信号到达两台站间的时间延迟,进而用于高精度确定测站坐标、源坐标、地球定向参数(EOP)等重要的天测与测地参数^[1-3]。

VLBI 横向测量精度高,与测距、测速等技术视向测量精度高的特点形成互补,在月球和深空探测方面发挥了重要作用^[4-9]。嫦娥任务中,主要依赖中国 VLBI 网(CVN)的观测数据和统一 S 波段(USB)测距测速资料等进行联合测定轨^[4,10]。相比于天测与测地学研究,VLBI 技术应用于探月或深空探测的前提是测站坐标准确已知。由于解算参数相关性,不能由跟踪资料对测站坐标进行实测改正,因而高精度的测站坐标是确保跟踪目标位置或轨道等参数解算精度与可靠性的重要前提。

提高新建 VLBI 测站坐标和速度参数精度的主要途径为:参加国际、国内天测与测地 VLBI 联测,逐步积累观测资料,增加资料覆盖时段,相对于测量网中已经精确测定了站坐标和速度的台站,提高新建测站的参数精度。CVN 包括上海佘山、北京密云、昆明凤凰山和乌鲁木齐南山共 4 个台站,它们是我国嫦娥一、二号工程期间主要的 VLBI 观测站。上海和乌鲁木齐 VLBI 站分别于 1987、1994 年开始参加国际联测,已经具有较高

精度的测站参数(站坐标和站速度)。昆明和北京站较少参与国际联测,为支持我国的探月和深空探测工程,急需提高测站参数精度。

本文采用 OCCAM 软件^[11-13]对观测资料进行分析,重新解算了昆明和北京 VLBI 测站的坐标和速度,并对解算结果进行讨论。

1 解算参数设置与观测资料预处理

CVN 于 2006 年到 2011 年底共进行了 16 次 S/X 双频联测,利用 OCCAM 软件进行分析时的模型选取和参数设置主要为:

1) 观测误差附加了 5 mm 的常数以调节归一化 χ^2 ;降权因子为 5,即拟合残差超过 5 倍加权拟合均方误差(wrms)时的观测资料将被自动降权。

2) 采用 IAU2000 岁差章动模型^[14-15]及对应的地球定向参数 IERS EOP C04_IAU2000A。

3) 采用国际地球参考架 ITRF2000^[16]、国际天球参考架 ICRF2^[17]和月球/行星历表 DE421^[18]。

4) 解算时以佘山(S)或乌鲁木齐站(U)为参考,即速度固定、坐标由参考历元坐标推算。昆明(K)和北京站(B)的坐标与速度初值取为嫦娥一号(CE1)工程期间的采用值,具体为参考历元 J1997.0,坐标(X,Y,Z)与速度(v_X, v_Y, v_Z)如表 1

收稿日期:2013-01-15

项目来源:国家自然科学基金资助项目(11373060, 11178024);探月工程(嫦娥三号)资助项目;上海市科学技术委员会资助项目(06DZ22101);国家 863 计划资助项目(2012AA121603);航天飞行动力学技术重点实验室开放基金资助项目(2012afd1017)。

第一作者:刘鹏,实习研究员。主要从事射电天体测量与空间大地测量研究工作。E-mail: liuli@shao.ac.cn

通讯作者:李金岭,博士,研究员。E-mail: jll@shao.ac.cn

所示。

5) 观测资料截止高度角为 5° , 大气映射函数采用 NEILL 模型^[19]。采用连续分段线性拟合解算湿大气天顶延迟及每隔 20 min 的变化率。

6) 采用连续分段二次拟合解算钟差及二次项, 每隔 1 h 解算钟速差。

7) 考虑 UT1 的短周期变化和海潮与极潮等的影响^[20]。

表 1 昆明与北京站坐标与速度采用值

Tab. 1 Coordinates and Velocities of Kunming and Beijing VLBI Stations

测站	X/m	Y/m	Z/m	$v_x/m \cdot a^{-1}$	$v_y/m \cdot a^{-1}$	$v_z/m \cdot a^{-1}$
K	-1 281 152.498	5 640 863.969	2 682 653.349	-0.031 8	-0.002 4	-0.020 3
B	-2 201 304.588	4 324 789.216	4 125 367.913	-0.044 4	0.014 1	-0.001 3

首先对单次实验 (session) 观测数据进行编辑, 尽量剔除误差过大的观测资料, 以排除其对解算参数的不良影响。主要判据包括观测拟合残差的加权均方差、测站坐标形式误差、测站观测资料个数等。

编辑前后的解算结果对比如表 2 所示。从中可见, 某些测站的站坐标误差达到了 10 cm, 因而予以剔除。实验 11-APR-28 编辑之前拟合不收敛, 去除 S 后方收敛, 原因是 S 站记录终端设备异常所致。删除部分测站或数据后, 加权均方差和测站坐标分量最大形式误差明显减小, 表明观测资料的编辑具有合理性。数据质量问题的主要原因是各测站接收机等设备的运行状况欠佳, 如某站某通道信号异常或缺失, 增加了模糊度处理的难度, 影响了带宽的综合精度。经过编辑, 保留的昆明站实验次数为 11、北京站为 7。

表 2 编辑前后观测资料解算情况的比较

Tab. 2 Comparison Between Solutions Before and After the Observation Edition

实验	编辑前		编辑后		删除测站	
	测站	wrms /mm	测站	wrms /mm	最大误差 /mm	资料数
06-JUN-01	SBUK	12.97	SBU	11.58	(Y)106	151
07-JUN-20	SBUK	15.35	SBU	11.17	(Y)157	60
08-SEP-19	SKUB	25.50	KU	19.11	(Y)126	24 (S) 104(B)
10-JUL-27	SKU	17.7	KU	16.59	(Y)149	34
10-AUG-10	SKU	22.7	KU	21.38	(Y)152	21
11-APR-28	SBKU	不收敛	BKU	17.40	-	4

2 单次观测实验资料解算

各次实验单次解算的情况如表 3 所示, 时延拟合残差加权均方差最大约 4 cm (120 ps), 平均

表 3 各观测实验单次解算情况

Tab. 3 Analysis Results of Each Observation Experiment

实验	测站(删除)	wrms/mm	归一化 χ^2	资料总数/采用数	参数个数	最大三维坐标误差/mm
06-JUN-01	SBU	11.58	1.33	275/228	216	35
07-APR-04	SBUK	18.89	1.08	1 561/1 305	196	38
07-JUN-20	SBU(-K)	11.17	1.09	479/402	138	12
08-SEP-19	KU(-SB)	19.11	1.41	282/152	83	25
10-JUN-22	SK(-U)	23.91	2.00	545/302	216	42
10-JUL-27	SKU	16.59	1.46	368/329	135	16
10-AUG-10	KU(-S)	21.38	1.31	356/318	135	21
10-SEP-02	SBKU	13.67	1.75	1 509/1 145	297	32
11-JAN-17	SBKU	10.47	1.38	2 534/2 133	297	6
11-MAR-25	SBKU	16.31	1.72	1 598/1 261	297	13
11-APR-25	BKU(-S)	17.40	1.62	902/416	133	15
11-MAY-24	SKU	13.38	1.77	1 136/842	216	9
11-OCT-11	SKU	37.50	1.48	641/365	216	26
11-NOV-14	SKU	29.05	1.50	1 302/1 047	216	19

值小于 1.9 cm (约 62 ps), 归一化 χ^2 在 1.5 左右, 测站坐标三维误差最大约 4 cm。

3 综合解算

单次解得到的是各次观测实验中间时刻的测

站坐标。因资料空间分布不均和数量较少等原因, 解算所得参数的精度有限, 须将所得的测站坐标和基线等时间序列进行综合平差, 以提高参考时刻下测站的坐标精度以及确定测站运动速度。综合平差即对单次解算的坐标进行线性最小二乘拟合, 具体为:

$$\vec{X}_i = \vec{X}_{2010.0} + \vec{V}_{2010.0}(t_i - t_{2010.0}) \quad (1)$$

其中, \vec{X}_i 为 t_i 时刻的测站坐标矢量; $\vec{X}_{2010.0}$ 和 $\vec{V}_{2010.0}$ 为参考历元 J2010.0 时(即式(1)中的 $t_{2010.0}$)该站的坐标和速度,为待估参数。设置观测值的权重为先验误差平方的倒数,得到参考历元 J2010.0 时的测站坐标及误差如表 4、5 所示,基线长度 (B_l) 和变化率 (V_{B_l}) 及对应误差 (σ_{B_l} , $\sigma_{V_{B_l}}$) 如表 6 所示。其中,表 4 和表 5 中的 (D_E , D_N , D_U) 及 (D_{V_E} , D_{V_N} , D_{V_U}) 为解算值在 J2010.0 历元相对于由嫦娥一号工程期间的采用值(表 1)推算结果的改正量,分别对应于东(E)、北(N)、上(U)方向。由表 4、5 可见,昆明和北京站坐标的解算精度在 6 mm 以内,站速度精度在 5 mm · a⁻¹ 以内。昆明站解算精度相比于北京站稍差,具

体原因有待进一步分析确认,但主要在于观测资料的质量相对较低。由 E、N、U 方向的改正量可知,昆明和北京站解算值与采用值的推算值坐标相差在 10 cm 量级,U 方向最大,速度大致相差 1 cm/a,表明嫦娥一号工程期间采用值的偏差较为显著。余山和乌鲁木齐站的对应差值相对较小,分别为 cm 和 mm/a 量级,表明其解算值和推算值较为符合,也间接表明了本次解算结果是可靠的。

由表 6 可知,基线误差在 7 mm 以内。基线变化率误差在 6 mm · a⁻¹ 以内,与昆明无关的基线误差在 2 mm 以内,变化率误差在 1 mm · a⁻¹ 以内,而与昆明相关基线的误差相对较大,进一步说明昆明数据质量较差或数据量较少。

表 4 各测站坐标(J2010.0)

Tab. 4 Coordinates of the Four CVN Stations (J2010.0)

测站	X/m±σ _X /mm	Y/m±σ _Y /mm	Z/m±σ _Z /mm	D _E /mm	D _N /mm	D _U /mm
K	-1 281 152.733 2±1.9	5 640 864.380 5±6.4	2 682 653.472 2±3.6	-271.8	184.8	519.1
B	-2 201 304.663 1±1.4	4 324 789.071 6±2.4	4 125 367.767 6±2.3	-298.8	240.3	-478.4
S	-2 831 687.304 8±0.7	4 675 733.517 4±1.1	3 275 327.512 5±1.1	-4.6	0.5	-7.1
U	228 310.309 0±0.8	4 631 922.737 7±1.7	4 367 064.002 2±1.5	13.9	3.8	22.3

表 5 各测站速度(J2010.0)

Tab. 5 Velocity of the Four CVN Stations (J2010.0)

测站	V _X ±σ _{V_X} /mm·a ⁻¹	V _Y ±σ _{V_Y} /mm·a ⁻¹	V _Z ±σ _{V_Z} /mm·a ⁻¹	D _{V_E}	D _{V_N}	D _{V_U}
K	-40.8±1.6	-14.5±5.2	-19.1±2.9	11.5	5.3	-8.4
B	-23.3±1.0	-8.6±1.6	-14.2±1.4	-8.5	9.5	-31.1
S	-28.7±0.4	-12.1±0.5	-14.5±0.5	-1.3	0.0	-2.1
U	-33.4±0.6	-2.9±1.2	-2.1±1.0	2.9	-3.0	0.6

表 6 基线长度与变化率

Tab. 6 Baseline Lengths and Variation Rate

基线	B _l /m±σ _{B_l} /mm	V _{B_l} ±σ _{V_{B_l}} /mm·a ⁻¹
SU	3 249 214.274 4±0.0	6.5±0.0
SK	1 920 129.548 3±5.2	-2.6±4.1
SB	1 114 949.637 4±2.2	2.1±0.6
BU	2 460 848.838 3±1.4	-8.0±0.4
BK	2 158 739.979 2±7.2	1.4±6.2
KU	2 476 626.886 2±4.0	10.2±3.3

图 1 表示各站坐标拟合残差。若上海或乌鲁木齐站为参考测站,其历元坐标及误差由初值及误差推算(由竖线所在历元标识),并与其他观测时间的解算坐标统一平差。可见,坐标拟合残差在上下约 10 cm 的范围内波动,表明观测资料质量一般。此现象与两站参加国际联测所得资料的分析情况类似。各基线拟合残差见图 2,最大波动小于 6 cm。

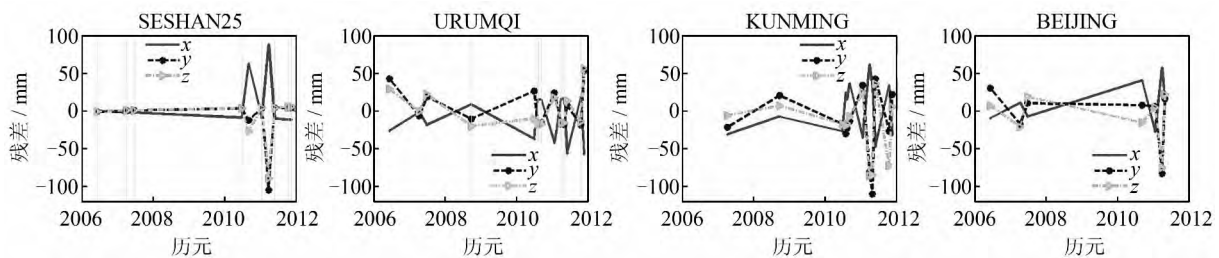


图 1 各站坐标残差图

Fig. 1 Residual Plot of Coordinates of the Four Stations

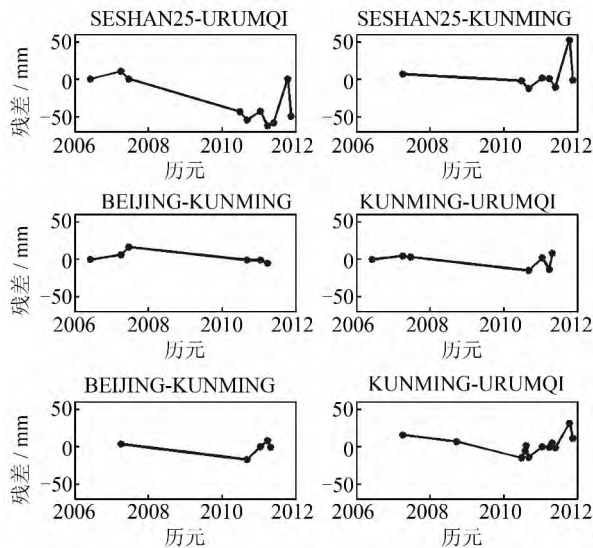


图 2 各基线残差图

Fig. 2 Residual Plot of the Six Baselines

4 结 语

通过对 2006 年以来 CVN 共 4 站天测与测地实验观测资料的单次解算和各次解算结果的联合平差,分析确定了昆明和北京站在 J2010 历元的坐标与速度,三维坐标误差分别为昆明 0.2、0.4、0.6 cm,北京 0.1、0.2、0.2 cm;速度误差分别为昆明 0.2、0.5、0.3 cm/a,北京 0.1、0.2、0.1 cm/a。分析确定的站坐标相对于 CE-1 期间采用值的推算值,昆明站在东、北、上方向相差 -27.2、-18.5、51.9 cm,北京站相差 -29.9、-24.0、-47.8 cm,是非常显著的。速度相差达 1 cm/a 量级。站坐标综合解拟合残差的波动范围达上下 10 cm,表明观测资料的质量一般,因而有必要进一步积累观测资料以提高测站参数精度。

致谢:感谢中国 VLBI 网测站人员辛苦获得观测数据,感谢上海天文台 VLBI 相关处理中心提供本文分析所需数据。

参 考 文 献

[1] Sovers J, Fanselow L, Jacobs S. Astrometry and Geodesy with Radio Interferometry: Experiments, Models, Results[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1998, 70(4):1 393-1 454

[2] Zhu Wenyao, Xiong Fuwen, Song Shuli. Notes and Commentary on the ITRF2005[J]. *Progress in Astronomy*, 2008, 26(3):1-14 (朱文耀,熊福文,宋淑丽. ITRF2005 简介和评析[J]. *天文学进展*, 2008, 26(3):1-14)

[3] Schluter W, Behrend D. The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS): Current Capabilities and Future Prospects[J]. *J Geod*, 2007(81): 379-387

[4] Cao Jianfeng, Huang Yong, Hu Xiaogong, et al. Determination of Impact Site of CE-1 Using USB and VLBI Data[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(7): 1 724-1 729 (曹建峰,黄勇,胡小工,等. USB 与 VLBI 联合确定“嫦娥一号”卫星撞月点的位置[J]. *宇航学报*, 2010, 31(7): 1 724-1 729)

[5] Li Jinling, Guo Li, Qian Zhihan, et al. Determination of the Controlled Landing Trajectory of Chang' E-1 Satellite and the Coordinate Analysis of the Landing Point on the Moon[J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55(13): 1 240-1 245

[6] Huang Yong, Hu Xiaogong, Zhang Xiuzhong, et al. Improvement of Orbit Determination for Geostationary Satellites with VLBI Tracking[J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56(26):2 765-2 772

[7] Hao Wanhong, Dong Guangliang, Li Haitao. An Introduction to Application of Radio Interferometry in Deep Space Navigation[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2009, 28(4):1-7 (郝万宏,董光亮,李海涛. 无线电干涉测量在深空航天器导航中的应用[J]. *飞行器测控学报*, 2009, 28(4): 1-7)

[8] Wang Wei, Hu Xiaogong, Yan Jianguo, et al. Simulation Analysis of the Short-arc Orbital Determination Accuracy for a Lunar Orbiter[J]. *Spacecraft Engineering*, 2007, 16(3): 21-26 (王威,胡小工,鄢建国,等. 环月探测器短弧定轨精度的仿真结果分析[J]. *航天器工程*, 2007, 16(3): 21-26)

[9] Shu Fengchun. Research on Real-time Radio Interferometry of Satellite[D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, 2008 (舒逢春. 人造卫星实时射电干涉测量方法研究[D]. 上海:上海天文台, 2008)

[10] Wang Hong, Dong Guangliang, Li Haitao. Joint Orbit Determination for SMART-1 with USB-VLBI [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(1): 40-42 (王宏,董光亮,李海涛. USB-VLBI 综合确定 SMART-1 环月探测器轨道[J]. *测绘科学*, 2008, 33(1): 40-42)

[11] Titov O, Tesmer V, Boehm J. OCCAM V. 6. 0 Software for VLBI Data Analysis[C]. IVS 2004 General Meeting, 2005

[12] Zhang Hanwei, Hu Xiaoming, Wang Aisheng. A Brief Introduction to VLBI Data Analysis Software Package OCCAM V6. 0[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2005, 28(3): 47-49 (张捍卫,胡晓明,王爱生. VLBI 资料处理软件系统

- OCCAM V6.0 简介[J]. 测绘与空间地理信息系统, 2005, 28(3): 47-49
- [13] Wei Erhu, Li Xuechuan, Li Zhenghang. An Introduction to the VLBI Data Analysis Software OCCAM6.3[J]. *Theory and Practice of Contemporary Education*, 2011, 3(11): 178-180 (魏二虎, 李雪川, 李征航. VLBI 数据处理软件 OCCAM6.3 使用简介[J]. 当代教育理论与实践, 2011, 3(11): 178-180)
- [14] Capitaine N, Wallace P. High Precision Methods for Locating the Celestial Intermediate Pole and Origin[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2006, 450: 855-872
- [15] Tao Jinhe, Fu Yanning. Two-epoch Series of Precession Quantities in IAU 2000 and Post IAU 2000 Precession-nutation Models[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2005, 46(1): 27-36 (陶金河, 傅燕宁. IAU2000 和后 IAU2000 岁差章动模型中岁差量的二历元表达方式[J]. 天文学报, 2005, 46(1): 27-36)
- [16] Chen Junyong. On the Definition and Adopted Parameters of International Terrestrial Reference Frame 2000[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(9): 753-756 (陈俊勇. 国际地球参考框架 2000(ITRF2000)的定义及参数[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(9): 753-756)
- [17] Fey L, Gordon D, Jacobs C, et al. IERS Technical Note No. 35 [EB/OL]. http://www.iers.org/nn_11216/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn35.html, 2010
- [18] Folkner W, Williams J, Boggs D. The Planetary and Lunar Ephemeris DE421[R]. IPN Progress Report, 2009
- [19] Niell A. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths[J]. *Journal of Geophysics*, 1996, 101(B2): 3 227-3 246
- [20] Ray D, Steinberg D, Chao B, et al. Diurnal and Semi-diurnal Variations in the Earth's Rotation Rate Induced by Oceanic Tides[J]. *Science*, 1994, 264(5 160): 830-832

Determination and Analysis of Station Parameters of the Chinese VLBI Network

LIU Li¹ LI Jinling¹

¹ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract: The Chinese VLBI network (CVN) consists of four stations at Shanghai, Beijing, Kunming and Urumqi, and are the VLBI tracking stations in the China's Chang'e project. A solution scheme with the software OCCAM including the settings of parameters, the selection of models and the edition of observations is introduced to analyze the astrometric and geodetic VLBI with experiments on the four stations. Via a single session analysis and combined adjustment of single solutions, the coordinates and velocities for the Kunming and Beijing stations at the centimeter and millimeter per year precision are determined for the reference epoch J2000.0. Comparisons with the statistics from the adopted coordinates and velocities deduced in the Chang'e-1 project show differences in coordinates of up to 51.9 cm, while the velocity varies up to 11.5 mm/a, and are very significant.

Key words: VLBI; station coordinates; OCCAM software; ITRF; Chang'e project; combined adjustment; deep space exploration

First author: LIU Li, assistant researcher, specializes in radio astrometry and space geodesy. E-mail: liuli@shao.ac.cn

Corresponding author: LI Jinling, PhD, professor. E-mail: jll@shao.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 11373060, 11178024; the Lunar Exploration Project of China (Chang'e-3); the National 863 Program of China, No. 2012AA121603; the STC of Shanghai Municipality, No. 06DZ22101; the Space Flight Dynamics Technology Key Laboratory, No. 2012afd1017.