



利用2006—2015年VLBI数据进行地球定向参数解算与分析

李斐^{1,2} 邵先远¹ 曲春凯² 鄢建国¹ 郝卫峰² 叶茂¹
杨轩¹ 金炜桐¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

摘要:目前正处在下一代甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)系统的建设时期。利用维也纳VLBI与卫星软件(Vienna VLBI and satellite software, VieVS)解算了2006—2015年的VLBI数据,得到了10 a的地球定向参数(Earth orientation parameters, EOP)时间序列,并与国际地球自转服务机构的结果进行了对比。利用解算结果得到了10 a的日长变化时间序列,通过傅里叶分析得出了日长变化的短周期、半月周期、月周期、半年周期和周年周期,同时还分析得到了极移序列中的周年项和张德勒周期项以及章动改正序列中的自由核章动项。此次解算工作可为武汉大学卫星台站日后的VLBI数据解析积累一定的经验。

关键词:VLBI; VieVS; 地球定向参数; 傅里叶分析

中图分类号:P228; P223

文献标志码:A

甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)是至今唯一能够同时提供天球参考框架(celestial reference frame, CRF)、地球参考框架(terrestrial reference frame, TRF)以及地球定向参数(Earth orientation parameters, EOP)的空间测地技术,在天体测量、大地测量、地球物理等相关领域应用较为广泛^[1]。自20世纪80年代至今,由于VLBI的高稳定性与高精度等特点,其一直是测定EOP的主要支撑技术^[2]。武汉大学诗琳通地球空间信息科学国际研究中心卫星台站(简称武汉大学卫星台站)已经立项,将观测能力拓展至测地VLBI观测。现已建成并投入使用的13 m射电望远镜的转速高于10°/s,目前已完成制冷接收机改造,并配备氢原子钟和水汽辐射计,基本符合VLBI2010全球观测系统(the VLBI2010 global observing system, VGOS)台站的规格要求。武汉大学卫星台站有望参与中国区域VGOS组网,本文将为该站的VLBI数

据解析积累经验。

维也纳VLBI与卫星软件(Vienna VLBI and satellite software, VieVS)作为专业的VLBI数据解析软件,采用国际地球自转服务机构(International Earth Rotation Service, IERS)的最新会议标准,包含会议推荐的最新计算模型,具有良好的人机交互界面,使用方便^[3-4]。本文主要利用VieVS软件解算了2006—2015年的VLBI数据,得到了10 a的EOP时间序列,并与IERS的官方结果进行了精度对比,利用频谱分析方法对3次样条插值后的等间隔EOP时间序列进行了周期分析。

1 EOP参数解算

1.1 解算的基准与模型

本文采用国际地球参考框架ITRF 2008和国际天球参考框架ICRF2作为解算基准,选用的物理解算模型与IERS标准(2010)相一致。具体

收稿日期:2018-04-25

项目资助:国家自然科学基金(41374024, 41604004, 41174019);湖北省自然科学基金重点项目创新群体类项目(2015CFA011);宇航动力学国家重点实验室开放基金(2016ADL-DW0103);空间目标测量重点实验室开放基金;中国博士后科学基金(2016M602360)。

第一作者:李斐,博士,教授,研究方向为重力场理论及应用。fli@whu.edu.cn

通讯作者:曲春凯,硕士生。quchunkai999@163.com

模型参数如下:采用喷气推进实验室 DE421 星历计算太阳系天体位置;从 NGS 文件中读取计算对流层时延所用的压力和温度参数,缺失值采用 GPT2 模型计算,对流层映射函数选取 VMF1;电离层时延信息从 NGS 文件中读取;台站坐标改正考虑固体潮、极潮、海洋极潮、海洋潮负荷、大气潮负荷、大气非潮汐负荷、天线热变形等因素的影响;EOP 的先验时间序列采用 IERS 08C04,岁差章动模型选用 IAU2006/2000A,插值方法选择拉格朗日插值。

1.2 精度比对

本文使用 2006—2015 年的观测数据进行解算,数据来源于国际大地测量与天体测量 VLBI 服务组织(International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS)的网站(<ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov>),数据格式为 NGS 格式。此数据源于监测地球自转的两个 24 h 的定期观测计划,分别是每周一和周四观测的 IVS-R1 和 IVS-R4 计划^[5]。2006—2015 年,10 a 一共进行了 1 029 次

R1/R4 观测,其中,2006-12-07 的观测(其观测文件为 06DEC07XE_N005)只有两个台站的数据,解算结果变差,因此本文解算时未包含此次观测。

参与台站的数量随时间的变化如图 1 所示,可以看出,2010 年平均参与台站数最少,可能会影响解算的精度。

解算涉及全球范围内的 33 个台站,表 1 统计了所有台站参与观测的次数。

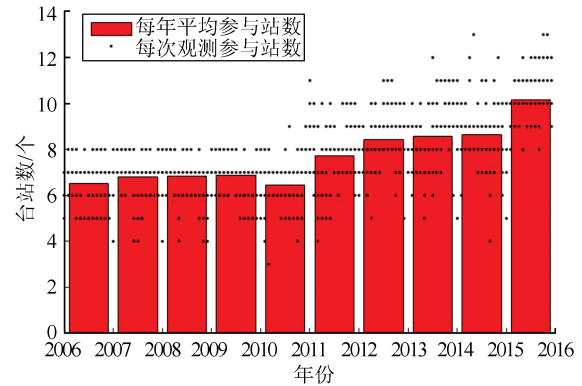


图1 2006—2015年参与观测台站数目

Fig.1 Number of Observing Stations from 2006 to 2015

表1 不同台站的观测次数

Tab.1 Observation Times of Different Stations

站名	观测次数	站名	观测次数	站名	观测次数
AIRA	20	KATH12M	253	TIANMA65	1
ALGOPARK	27	KOKEE	774	TIGOCONC	749
BADARY	262	MATERA	408	TSUKUB32	381
FORTLEZA	599	MEDICINA	142	URUMQI	16
HART15M	167	NYALES20	719	WARK12M	86
HARTRAO	180	ONSALA60	170	WESTFORD	364
HOBART12	279	PARKES	4	WETTZ13N	28
HOBART26	253	RAEGYEB	36	WETTZELL	950
ISHIOKA	7	SEJONG	41	YARRA12M	249
KASHIM11	9	SESHAN25	103	YEBES40M	143
KASHIM34	6	SVETLOE	302	ZELENCHK	340

由于 IERS 08C04 是在 ITRF 2008 框架下解算的,当解算台站坐标时,站坐标与 ITRF 2008 中的定义会存在差异,这将导致解算得到的 EOP 序列与 IERS 08C04 序列的差异变大^[6]。考虑到本文研究的主要目的是解算高精度的 EOP,因此采用单次解^[7],即解算时固定台站坐标和射电源坐标^[8],再对地球定向参数、大气参数和测站钟差等进行解算。

解算过程中采取的主要策略有:首先,通过解算的时延残差分布发现台站的钟跳问题,选取某稳定台站(例如 WETTZELL 站)的时钟作为参考时钟,在 OPT 文件中设置问题台站的时钟间

断后重新解算;然后,剔除残差异异常的台站和基线后重新解算,例如 TIGOCONC 台站在 2010 年 2 月发生地震,则需剔除该站;最后,通过 OUT 文件剔除观测数据中的坏点后重新解算。

解算共得到了 2 879 d 的 EOP 时间序列,如图 2 所示。图 2 中,dX 与 dY 为两个章动参数, X_{pol} 和 Y_{pol} 为两个极移参数,UT1 为世界时 1(universal time 1),UTC 为协调世界时(coordinated universal time),UT1-UTC 表示 UT1 和 UTC 之差。下面从两个方面对解算结果进行分析讨论。

1) 内符合精度。将 VieVS 解算结果的形式

误差取绝对值后再取平均,作为数据解析的内符合精度,5 个 EOP 参数的内符合精度见表 2。由表 2 可以看出,不同年份解算结果的内符合精度之间存在轻微差异,但都在同一个数量级。轻微的差异可能与当年观测资料质量有关,另外 OPT 文件中的解算策略也会对结果造成影响。对各个 EOP 参数 2006—2015 年的内符合精度分别取

平均值,得到 X_{pol} 和 Y_{pol} 的平均精度分别为 0.065 mas 和 0.063 mas,UT1—UTC 的平均精度为 0.003 ms,dX 和 dY 的平均精度均为 0.044 mas。由表 2 可知,2010 年的解算精度最差,这与当年平均参与台站数最少的情况相吻合;相反,2015 年的解算精度最好,这与当年平均参与台站数最多的情况相一致。

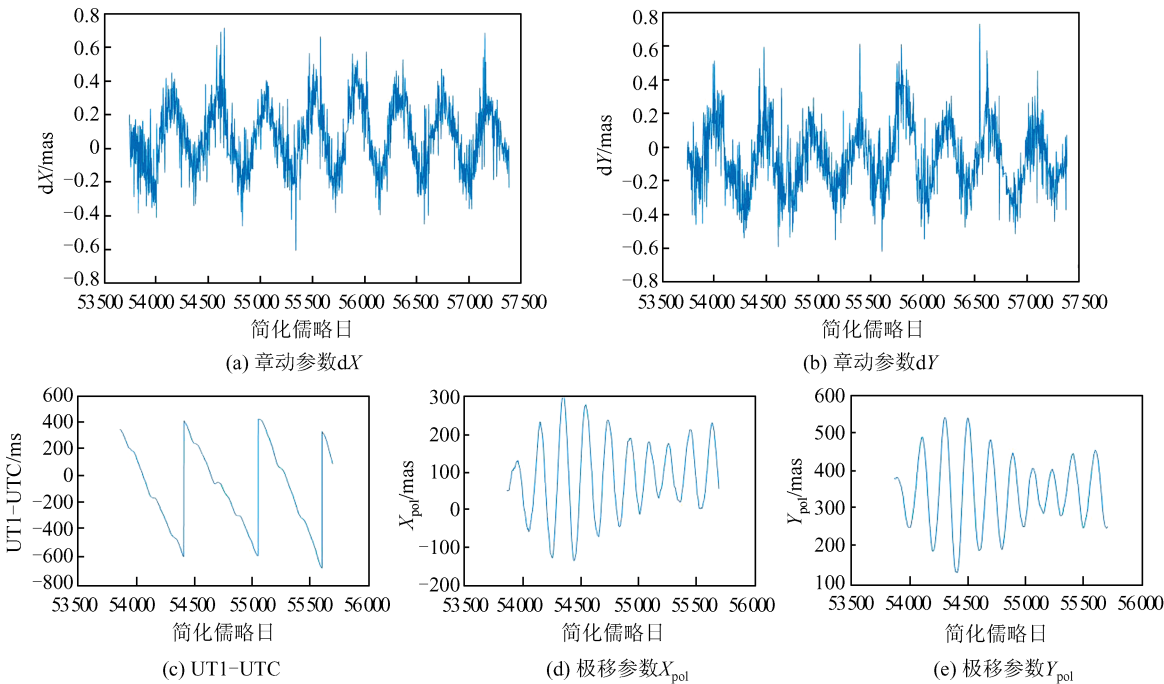


图 2 EOP 时间序列
Fig.2 Time Series of EOP

表 2 2006—2015 年 EOP 参数的内符合精度					
Tab.2 Internal Accord Accuracy of EOP					
During 2006—2015					
年份	$X_{\text{pol}}/\text{mas}$	$Y_{\text{pol}}/\text{mas}$	UT1—UTC/ms	dX/mas	dY/mas
2006	0.065	0.065	0.003	0.048	0.049
2007	0.051	0.057	0.002	0.040	0.042
2008	0.069	0.071	0.003	0.051	0.051
2009	0.064	0.070	0.003	0.052	0.050
2010	0.083	0.073	0.003	0.050	0.050
2011	0.074	0.068	0.003	0.046	0.046
2012	0.066	0.060	0.003	0.040	0.040
2013	0.073	0.068	0.003	0.046	0.045
2014	0.060	0.054	0.003	0.041	0.040
2015	0.045	0.048	0.003	0.028	0.028

2)外符合精度。将解算的 EOP 时间序列与 IERS 网站公布的 EOP 08C04(IAU2000)时间序列作差,差值的均方根作为外符合精度,各参数的外符合精度见表 3。由表 3 可见,本文解算的

EOP 结果与 IERS 官方结果接近。通过计算可得: X_{pol} 和 Y_{pol} 的平均精度分别为 0.169、0.178 mas,UT1—UTC 的平均精度为 0.010 ms,dX 和 dY 的平均精度分别为 0.107、0.131 mas。

表 3 2006—2015 年 EOP 参数的外符合精度					
Tab.3 External Accord Accuracy of EOP					
During 2006—2015					
年份	$X_{\text{pol}}/\text{mas}$	$Y_{\text{pol}}/\text{mas}$	UT1—UTC/ms	dX/mas	dY/mas
2006	0.115	0.146	0.007	0.149	0.216
2007	0.129	0.147	0.007	0.102	0.125
2008	0.159	0.137	0.008	0.104	0.149
2009	0.195	0.143	0.008	0.094	0.093
2010	0.189	0.163	0.009	0.103	0.095
2011	0.161	0.192	0.010	0.098	0.148
2012	0.165	0.181	0.009	0.120	0.113
2013	0.207	0.252	0.011	0.112	0.106
2014	0.202	0.209	0.014	0.089	0.128
2015	0.140	0.175	0.011	0.082	0.088

EOP 08C04时间序列是由 IERS 综合全球导航卫星系统、甚长基线干涉测量、卫星激光测距、星基多普勒轨道确定和无线电定位组合系统这4种技术的结果得到的。文献[9-10]的EOP时间序列仅来自 VLBI 数据,并与本文结果存在3 a (2006—2008年)的时间重合,因此将2006—2008年的结果与文献[9-10]作对比,验证本文解算的可靠性。考虑到本文采用了IAU2000A章动模型,而文献[9-10]采用的是IAU1980章动模型,这两个章动模型之间存在较大差异,不具有可比性,因此仅对比地球自转参数(Earth rotation parameters, ERP)的解算结果,即 X_{pol} 、 Y_{pol} 、 $\text{UT1}-\text{UTC}$ 。为方便对比,3 a解算结果的外符合精度采用文献[9-10]中的定义方式,即解算结果与官方结果相减后取绝对值再取平均,解算的3 a ERP 参数的外符合精度如表4所示。

表4 2006—2008年ERP参数的外符合精度

Tab.4 External Accord Accuracy of ERP
During 2006—2008

方法	年份	$X_{\text{pol}}/\text{mas}$	$Y_{\text{pol}}/\text{mas}$	$\text{UT1}-\text{UTC}/\text{ms}$
文献[9-10]	2006	0.338	0.320	0.176
	2007	0.338	0.320	0.176
	2008	0.450	0.290	1.608
本文方法	2006	0.092	0.112	0.005
	2007	0.097	0.100	0.005
	2008	0.117	0.109	0.006

表4表明,本文解算的ERP参数明显优于参考文献[9-10]的结果。文献[11]使用了VieVS软件解算了佘山站和南山站在2011年之前参与的所有IVS 24 h观测数据,其解算的极移改正误差一般在1 mas内, $\text{UT1}-\text{UTC}$ 误差一般在20 μs 以内,本文解算精度与其相当。图3为本文ERP解算结果相对于 IERS 08C04序列的改正。

2 EOP 结果分析

2.1 日长变化分析

地球自转频率的变化通常以日长(length of day, LOD)的观测量相对于标准日长(86 400 s)的变化 Δ_{LOD} 来表示。根据本文VLBI解算得到的 $\text{UT1}-\text{UTC}$,通过式(1)计算得到 Δ_{LOD} ,其中UTC与国际原子时(international atomic time, TAI)仅存在跳秒的差异。当 $\Delta_{\text{LOD}}>0$ 时,日长变短,地球自转速度加快;反之,日长变长,地球自转速度减慢^[12]。

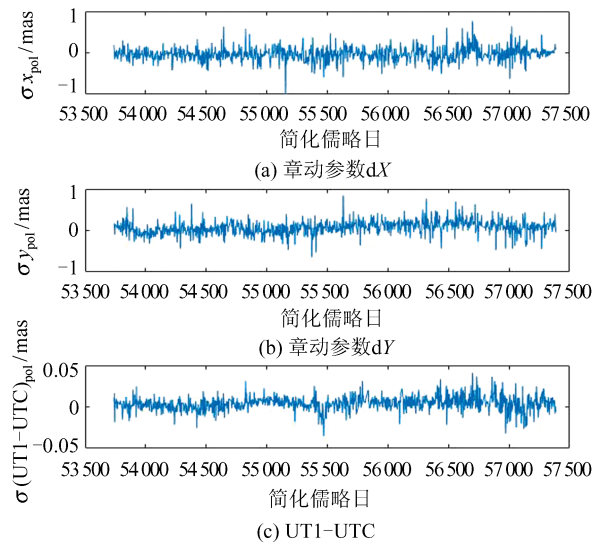


图3 ERP解算结果相对于 IERS 08C04序列的改正
Fig.3 ERP Corrections to IERS 08C04

$$\Delta_{\text{LOD}} = \frac{(T_{\text{UT1}} - T_{\text{TAI}})_t - (T_{\text{UT1}} - T_{\text{TAI}})_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (1)$$

式中, Δ_{LOD} 表示日长的观测量相对于标准日长的变化; T_{UT1} 表示世界时; T_{TAI} 表示国际原子时; t 表示某一时刻; Δt 表示时间间隔。

由于傅里叶变换只能处理等间隔采样的数据,而且数据的趋势项会影响周期项在幅频谱中的振幅,因此需要将得到的非等间隔 Δ_{LOD} 数据进行3次样条插值,插值后的时间间隔为1 d,去除序列的平均值,以便通过频谱分析提取 Δ_{LOD} 的周期特征^[12]。去趋势项后的 Δ_{LOD} 序列如图4所示,对该序列进行傅里叶变换得到幅频谱如图5所示。图5中, X 表示与横坐标频率对应的周期, Y 表示纵坐标振幅。

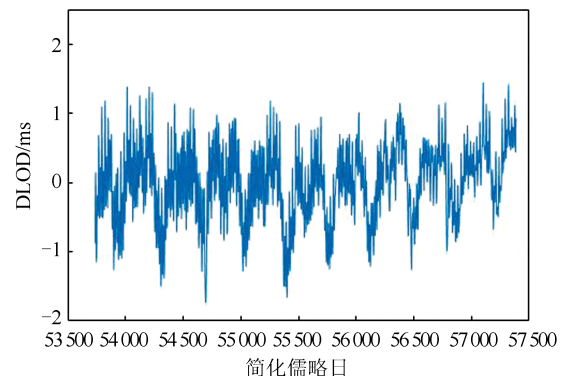


图4 去趋势项后的日长变化
Fig.4 Δ_{LOD} Without the Trend Term

根据频率与周期的倒数关系,图5的幅频谱中,从左至右6个振幅峰值对应的周期分别为3 650.00 d、365.00 d、182.50 d、27.65 d、13.67 d、9.13 d。将本文所得周期结果与文献[12]的结果

作比较,发现周年周期、半年周期、月周期和半月周期的符合度很高,两者结果最大差值仅在 0.05 d 以内;9.13 d 的最小周期与文献[13]通过最大熵谱分析法得到的周期相一致;本文所得最大周期为 3 650.00 d,约 10 a,此周期与所选时间序列的长度有关,并非日长变化的真实周期。

2.2 极移参数分析

采用与日长变化相同的方式,对 X_{pol} 和 Y_{pol} 插值并去除趋势项后进行频谱分析,其幅频谱分别如图 6(a)和图 6(b)所示。

从图 6 中可以发现,极移参数 X_{pol} 、 Y_{pol} 存在 3 个明显的频率峰值,对应的周期分别为 456.25 d、405.56 d、365.00 d,前两个周期与 427 d 的张德勒

周期项有关,第 3 个周期为周年项,其中周年项的能量最为显著。

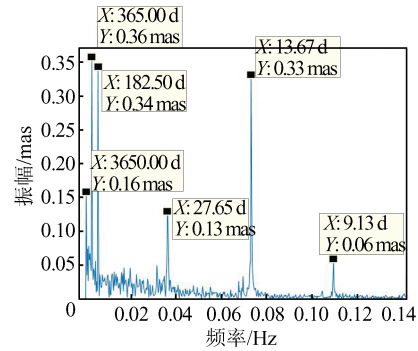


图 5 日长变化幅频谱

Fig.5 Magnitude Spectrum of Δ_{LOD}

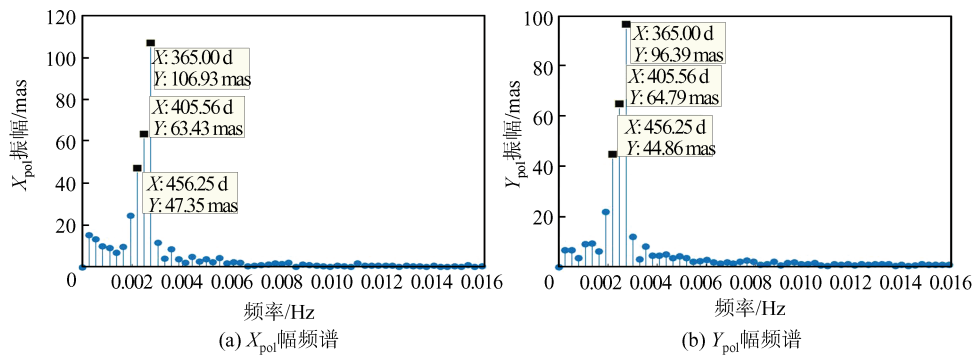


图 6 极移参数幅频谱

Fig.6 Magnitude Spectrum of Polar Motion Parameters

2.3 章动参数分析

采用与日长变化相同的方式,对 dX 和 dY 插值并去除趋势项后进行频谱分析,其幅频谱分别如图 7(a)和图 7(b)所示。从图 7 中可以看到,章

动参数 dX 和 dY 存在两个明显的频率峰值,对应的周期分别为 456.25 d 和 405.56 d,与 429 d 的自由核章动本征周期相吻合^[14],此周期项的存在是因为 IAU2000A 章动模型未包含自由核章动。

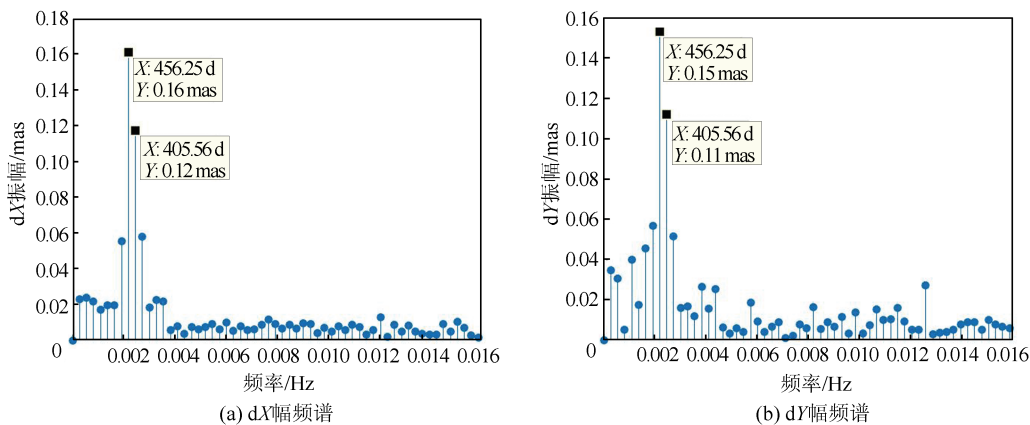


图 7 章动参数幅频谱

Fig.7 Magnitude Spectrum of Nutation Parameters

3 结 语

本文解算了 2006—2015 年的 VLBI 数据,得到了 10 a 跨度的 EOP 时间序列,并与 IERS

08C04 的结果进行了比较。结果表明,内符合精度和外符合精度均在误差范围之内。同时,利用解算的 UT1—UTC 结果得到了 10 a 的 Δ_{LOD} 时间序列,并通过频谱分析得出了 Δ_{LOD} 时间序列中的

多个周期,包括9.13 d的短周期、13.67 d的半月周期、27.65 d的月周期、182.50 d的半年周期以及365.00 d的周年周期。此外,还分析出了极移序列中的周年项和张德勒周期项以及章动改正序列中的自由核章动项。本文VLBI解算工作将为武汉大学卫星台站加入VGOS网后的VLBI数据解析积累一定经验。

未来希望通过解析中国区域VLBI数据,获取中国独立自主的EOP时间序列,从而摆脱对外观测数据的依赖。

致谢:感谢上海天文台孙婧老师和徐明辉老师对此文的帮助。

参 考 文 献

- [1] Wang Guangli, Qian Zhihan. Solution and Discussion of Global Astrometric and Geodetic VLBI Data (1979—1999) Reduction[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2000, 41(3): 320-326(王广利, 钱志瀚. 1979—1999全球天测与测地VLBI观测资料处理结果与讨论[J]. *天文学报*, 2000, 41(3): 320-326)
- [2] Li Jinling, Wang Guangli. An Analysis of the Polar Motion Series from VLBI Observations[J]. *Chinese Sci Bull*, 2000, 45(12): 1 260-1 262(李金岭, 王广利. VLBI观测得到的极移序列分析[J]. *科学通报*, 2000, 45(12): 1 260-1 262)
- [3] Böhm J, Böhm S, Nilsson T, et al. The New Vienna VLBI Software VieVS[C]. IAG 2009 Scientific Assembly, Buenos Aires, Argentina, 2009
- [4] Wei Erhu, Tang Shenquan. On Module Framework of VieVS and Data Processing for Teaching and Research[J]. *Coordinates*, 2015, 11(2): 50-54
- [5] Ma Gaofeng. Research on the Theory and Method of Data Analysis Combined with VLBI2010 and GNSS [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011(马高峰. VLBI2010与GNSS联合数据分析理论及方法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2011)
- [6] Belda S, Heinkelmann R, Ferrandiz J M, et al. On the Consistency of the Current Conventional EOP Series and the Celestial and Terrestrial Reference Frames [J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(2): 135-149
- [7] Zhang Bo. A Study of the High Frequency Variation of Earth Rotation Parameters Based on VLBI Observation [D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2004(张波. 基于VLBI资料的地球定向参数高频变化研究[D]. 上海:中国科学院上海天文台, 2004)
- [8] Wei Erhu, Liu Jingnan, Shi Chuang. Estimation of Geodetic Parameters with VLBI Data of Last 5 Years [J]. *Geo-spatial Information Science*, 2007, 10(1): 12-16
- [9] Wei Erhu, Liu Jingnan, Pan Peijing. On Data Processing with Last Three Years of VLBI Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(12): 1 275-1 278(魏二虎, 刘经南, 潘培鲸. 近三年VLBI观测的数据处理及分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2008, 33(12): 1 275-1 278)
- [10] Wei Erhu, Li Xuechuan, Yi Hui, et al. On EOP Partameter Based on 2008 VLBI Observation Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(8): 988-990(魏二虎, 李雪川, 易慧, 等. 利用2008年VLBI观测数据进行EOP参数的解算与分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(8): 988-990)
- [11] Zhang Zhibin, Wang Guangli, Liu Xiang, et al. Analysis of EOP Determination via Chinese VLBI Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 911-915(张志斌, 王广利, 刘祥, 等. 中国VLBI网观测地球定向参数能力分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2013, 38(8): 911-915)
- [12] Wei Erhu, Zhang Qi. On Length of Day with 1985—2010 VLBI Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(9): 1 020-1 023(魏二虎, 张奇. 利用1985—2010年VLBI数据进行日长变化分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(9): 1 020-1 023)
- [13] Han Yonggang, Li Zhian. Analysis of Main Middle and Short Periods in the Variation of the Earth's Rotation [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(2): 349-352(韩永刚, 李志安. 地球自转速率变化主要中短周期的分析[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(2): 349-352)
- [14] Xu Jianqiao, Sun Heping, Luo Shaocong. Study of the Earth's Free Core Nutation by Tidal Gravity Data Recorded with International Superconducting Gravimeters [J]. *Science in China (Ser D)*, 2001, 31(9): 719-726(徐建桥, 孙和平, 罗少聪. 利用国际超导重力仪观测资料研究地球自由核章动[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(9): 719-726)

Solution and Analysis of Earth Orientation Parameters with 2006—2015 VLBI Observation

LI Fei^{1,2} SHAO Xianyuan¹ QU Chunkai² YAN Jianguo¹ HAO Weifeng² YE Mao¹
YANG Xuan¹ JIN Weitong¹

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University,
Wuhan 430079, China

2 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: It is currently in the period of construction of the next generation of very long baseline interferometry (VLBI) systems. This is a good opportunity for Wuhan University satellite station. We count observation times of different stations and number of stations from 2006 to 2015. We process VLBI data from 2006 to 2015 to estimate Earth orientation parameters (EOP) using Vienna VLBI and satellite software (VieVS). Internal and external accord accuracy of EOP during 2006—2015 are credible. Ten years of changes of the length of day (Δ_{LOD}) are estimated and compared with the results of International Earth Rotation Service (IERS). The short (9.13 d), half-month (13.67 d), month (27.65 d), half-year (182.50 d) and year (365.00 d) periods of Δ_{LOD} are extracted with fourier analysis. The year, Chandler periods of polar motion and the free core nutation period of nutations correction are also extracted. This solution can accumulate some experience of VLBI data analysis for Wuhan University satellite station.

Key words: VLBI; VieVS; Earth orientation parameters; Fourier analysis

First author: LI Fei, PhD, professor, specializes in the theory and application of gravity field. E-mail: fli@whu.edu.cn

Corresponding author: QU Chunkai, postgraduate. E-mail: quchunkai999@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41374024, 41604004, 41174019; Hubei Province Natural Science Foundation Innovation Group Project, No. 2015CFA011; the Open Research Fund of State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, No. 2016ADL-DW0103; the Open Research Fund of State Key Laboratory of Space Target Measurement; China Postdoctoral Science Foundation, No. 2016M602360.