



上海佘山VLBI站的钟差补偿精度分析

冯浩通^{1,2} 舒逢春^{1,3} 何 旋¹

1 中国科学院上海天文台,上海,200030

2 中国科学院大学,北京,100049

3 上海市空间导航与定位技术重点实验室,上海,200030

摘要:甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)台站钟差的补偿误差将导致VLBI时延观测量参考历元的偏离,进而对世界时(universal time, UT1)的准确估计产生影响。台站钟差包含格式器钟差和设备时延,设备时延是影响钟差补偿精度的关键因素。上海佘山VLBI站是全球测地参考框架的基准站,有必要评估该站的钟差补偿精度。利用该站2002—2017年国际测地观测数据的相关处理结果,分析了相关处理机对佘山站钟差的补偿精度。结果表明,不同VLBI相关处理机对佘山站模拟终端的设备时延补偿具有较好的一致性和长期稳定性,满足UT1测量精度需求,但是上海相关处理机对佘山站数字化终端的设备时延补偿存在大于1 μs的系统差,有必要进一步改进钟差搜索方法和提高钟差补偿精度。

关键词:甚长基线干涉测量;参考历元;钟差补偿;设备时延

中图分类号:P228

文献标志码:A

甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)是20世纪60年代随着原子钟的出现而发展起来的射电天文观测技术^[1],在大地测量^[2-3]、天体测量^[4-5]和深空导航^[6-7]等领域具有广泛的应用。随着技术的不断进步,VLBI观测的灵敏度和测量精度越来越高。

VLBI技术的主要观测量是观测目标发出的同一信号波前到达地面相距遥远的两个射电望远镜之间的时间延迟,即时延。时延观测量的参考历元是信号到达第1个台站,即参考台站的参考点的时间。参考历元的误差将直接导致世界时(universal time, UT1)的估计偏离真值^[8]。 ΔUT1 ,即UT1和国际原子时(temps atomique international, TAI)的差值,是VLBI最重要的估计参数之一。对于24 h的全球测地VLBI观测实验, ΔUT1 的形式误差约3~5 μs,在部分观测实验中甚至小于1 μs^[2,9-10]。近年来,国际VLBI大地测量与天体测量服务组织(International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS)正在推进新一代VLBI全球观测系统(VLBI global observing system, VGOS)的建设,首批实验结果显

示时延测量精度比传统VLBI大大提高^[11],意味着VLBI将获得更高精度的 ΔUT1 测量结果,这要求参考历元的误差小于0.1 μs^[12]。

参考历元的精度是由VLBI相关处理过程中的钟差补偿精度决定的,这里所指的钟差包含了格式器钟差和设备时延。在IVS观测计划中,地球定向参数(earth orientation parameter, EOP)监测计划包括:每天开展1~2次的UT1加强观测(代码为INT),每次观测1 h;每周开展2次的EOP观测(代码为R1和R4),每次观测24 h;每3年开展1次的EOP连续观测(代码为CONT),每次持续观测15 d。这些观测数据主要由位于美国华盛顿的海军天文台相关处理机(华盛顿处理机WACO)和位于德国波恩的马普射电天文研究所相关处理机(波恩处理机Bonn)完成台站原始数据的相关处理。为了维持 ΔUT1 的长期一致性,华盛顿处理机通常采用美国夏威夷的Kokee站作为时间参考基准,定义1990年代采用VLBA格式器的Kokee站的设备时延补偿值为0。Himwich利用Kokee站的历史数据分析了设备时延补偿值的稳定性,发现在2004年采用新的Mark4格式器

和 2010 年采用 Mark5 格式器时存在跳变^[13], 表明不同格式器的设备时延是不同的。

上海佘山 VLBI 站(8 字符代码 Seshan25, 2 字符代码 Sh)是全球测地参考框架的核心站^[13], 2011 年开始, 佘山站还参加了 IVS 组织的部分 INT 观测, 用于准实时 Δ UT1 测量。2015 年开始, 中国科学院上海天文台 VLBI 相关处理机(上海处理机 SHAO)开始承担 IVS 相关处理任务, 每年处理 20~30 次测地 VLBI 观测数据, 佘山站也参与了部分观测实验。本文将系统性地分析不同相关处理机对佘山站的钟差补偿精度, 为进一步提高 VLBI 测量精度提供参考依据。

1 VLBI 时延观测量的参考历元

测地 VLBI 的基本原理是通过高精度的时延测量, 反演台站坐标、射电源位置和地球定向参数等重要的天体测量与测地参数。VLBI 测量系统示意图如图 1 所示。

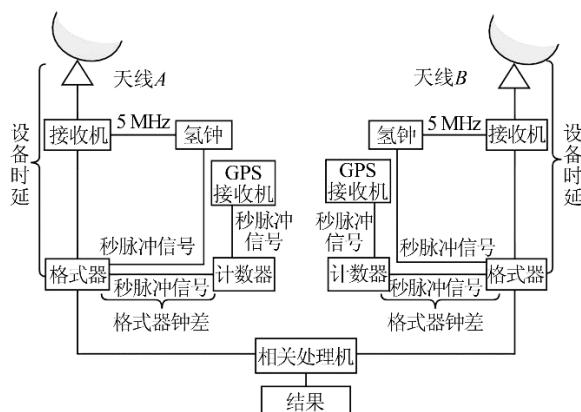


图 1 VLBI 测量系统示意图

Fig.1 Diagram of VLBI Measurement System

VLBI 时延观测量 τ_{21} 的定义如下:

$$\tau_{21} = t_2 - t_1 \quad (1)$$

式中, t_1 为信号到达参考台站 A 的时间; t_2 为信号到达台站 B 的时间; 以 t_1 作为参考历元, 观测量 τ_{21} 为信号到达台站 B 相对于台站 A 的时延。

VLBI 台站原始观测数据的时间标签是由格式器钟标注的, 但在 VLBI 时延模型中, 是以信号达到天线参考点的时间为参考基准, 需要将 VLBI 数据的时间标签从信号到达格式器的时间修正为信号达到天线参考点的时间。相关处理机通过钟差补偿方法来获得精确的参考历元, 钟差包括了格式器相对于全球定位系统(global positioning system, GPS)时间的钟差(以下称格式器钟差)和设备时延。

1.1 格式器钟差

从图 1 中可以看出, 格式器钟是由氢原子钟产生的秒脉冲(脉冲数/秒)信号维持的, 虽然氢原子钟本身具有非常高的稳定性, 但格式器钟差仍然可能达到 100 μ s, 甚至更大。格式器钟差可以由计数器通过比较格式器和 GPS 接收机输出的秒脉冲信号进行测量而获得。

格式器钟差主要由以下原因造成: 台站氢原子钟时间相对于 UTC 的钟差、从氢原子钟到格式器的电缆时延和格式器的内部时延等^[12]。格式器钟差是可测量的, 因而, 可以在相关处理过程中进行补偿, 补偿精度由 GPS 授时精度决定, 通常小于 50 ns。

1.2 设备时延

VLBI 测站的主要设备包括天线、接收机、数据采集终端和格式器等, 信号从天线到达格式器的传输过程中, 经过这些设备会产生设备时延。本文关注的设备时延主要指信号到达格式器的时间相对于信号到达天线参考点的时间延迟, 主要包括无线电信号在天线系统传播产生的时延、接收机内产生的时延、信号在中频电缆传输产生的时延和数据采集终端产生的时延等。这些设备的任何变动都可能引起台站设备时延的改变, 特别是数字化终端会存在较大的设备时延, 设备时延在一次 24 h 测地观测中通常是稳定的。

设备时延通常无法直接测量, 需要通过 VLBI 观测数据的相关处理来获得台站之间的相对设备时延。如前所述, 美国海军天文台作为实现国际原子时的主要单位之一, 将其下属的夏威夷 Kokee 站作为时间参考基准^[14], 定义 1990 年代采用 VLBA 格式器的 Kokee 站的设备时延补偿值为 0, 从而推算出国际上其他 VLBI 台站的设备时延。

1.3 相关处理机中的钟差补偿

考虑到台站的设备时延因为设备的变动会发生改变, IVS 相关处理机, 包括华盛顿相关处理机和波恩相关处理机, 需要不断监测台站因为设备改变而引起的设备时延跳动, 从而维持 VLBI 时延观测量参考历元的长期一致性。

IVS 相关处理报告中的钟差补偿信息包含格式器钟差和相关处理机使用的钟差补偿值。对于某个指定的台站, 假如相关处理机采用的钟差补偿值为 $\tau_{\text{处理机}}$, 格式器钟差为 $\tau_{\text{格式器}}$, 则设备时延补偿值可表示为:

$$\Delta\tau = \tau_{\text{处理机}} - \tau_{\text{格式器}} \quad (2)$$

为了获得准确的钟差补偿值, 在相关处理

前,先需要利用观测期间起始时间段、中间时间段和结束时间段的几个强射电源观测片段(scan)的数据进行钟差搜索,目的是通过人为调整钟差补偿值 $\tau_{\text{处理器}}$,使得残余时延尽可能小;然后进行产品级相关处理,生成符合要求的VLBI时延观测产品。

2 钟差数据与处理方法

2.1 钟差数据来源

用来进行钟差分析的数据文件有台站观测日志和相关处理报告2种文件。VLBI台站在进行观测时,会产生台站观测日志文件,文件中记录了每个scan的格式器钟差。每次IVS观测数据相关处理完成后,操作员会编写相关处理报告文件,里面含有各台站的格式器钟差、相关处理采用的钟差和钟速。这2种文件可在IVS数据中心下载^[15]。

本文使用Python语言,从IVS数据中心爬取了从2002—2017年的所有相关处理报告文件和台站观测日志文件,选取了上海佘山站参加的观测,共252次。从这些文件中提取出观测时间、观测代码、格式器钟差、相关处理机名称、相关处理实际使用的钟差补偿值和终端类型等数据。

上海佘山站自2002年开始的观测实验使用了传统的模拟终端,2015年开始的大部分观测实验使用了上海天文台研制的数字化数据采集系统(Chinese data acquisition system, CDAS)^[16-17]。考虑到CDAS在不同宽带下存在大小不等的设备时延,本文从台站观测日志文件中提取台站使用的数据采集终端类型为CDAS终端或者模拟终端。台站的抽取因子和带宽作为区分终端类型的依据,抽取因子是采样时钟频率与采样率的比值,采样时钟频率固定为64 MHz,采样率是带宽的2倍。CDAS终端的抽取因子与带宽的乘积结果为32,其他的则为模拟终端。2002—2017年,佘山站总共参与观测252次,其中,本文使用的观测数据中,使用CDAS终端参与观测38次,模拟终端190次。CDAS终端和模拟终端使用的抽取因子(无量纲的参数)和带宽如表1所示。

2.2 异常值处理

长期以来,相关处理机生成的报告文件格式并不完全统一,甚至缺少部分关键钟差信息,本文需要剔除4种含有异常数据的观测:(1)含有钟跳的数据,钟跳太大会影响分析结果的正确性;(2)虽然列入了年度观测计划,但佘山站没有实

际参与观测;(3)相关处理报告中,没有列出相关处理机使用的钟差补偿值的观测,因为无法计算其相应的设备时延;(4)相关处理报告中没有佘山站的格式器钟差,也找不到相应的台站观测日志文件。从252次观测中共剔除24次观测:类型1的观测1次;类型2的观测7次;类型3的观测5次;类型4的观测11次。

表1 CDAS终端和模拟终端的抽取因子和带宽

Tab.1 Decimation Factor and Bandwidth of CDAS Terminal and Analog Terminal

抽取因子	CDAS终端带宽/MHz	模拟终端带宽/MHz
8	4	2
4	8	4
2	16	8
1	32	16

2.3 缺失值处理

相关处理报告中给出了钟差补偿值,但格式器钟差没有提供或者为0,本文将此类型的值作为缺失值处理。处理方法是:获取IVS网站上本次台站观测日志文件,采用线性拟合方法从文件中提取格式器钟差,经与IVS相关处理机采用的钟差提取程序比较,计算结果一致。

R1799是2017年7月11日UT 16时开始的24 h观测,以此实验中的佘山站为例,相关处理报告中的佘山站格式器钟差为0 μs,而钟差补偿值为99.17 μs,说明佘山站的格式器钟差需要重新提取。利用此次观测实验中佘山站的台站观测日志文件,对格式器钟差进行了线性拟合,佘山站格式器钟差的实测数据和拟合直线如图2所示。

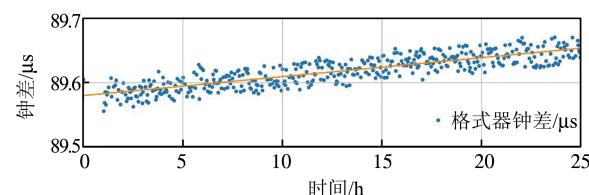


图2 R1799格式器钟差随时间的变化
Fig.2 Change of Formatter Clock Offset with Time in R1799 Observation

图2中,参考历元2017年7月11日UT 16时的格式器钟差估计值为89.58 μs,拟合残差为12 ns,小于本文讨论的设备时延误差,可忽略不计。

经过异常值和缺失值处理,本文得到228条可使用数据,包括观测时间、观测代码、台站名称、处理机名称、格式器钟差、相关处理机钟差补偿值、设备时延和终端类型。从中选取华盛顿处

理机、波恩处理机和上海相关处理机处理的 208 次观测进行钟差补偿精度分析。

3 佘山站钟差补偿精度分析

基于上海佘山站 2002—2017 年共 208 次观测实验的钟差信息,波恩、华盛顿和上海处理机采用的设备时延补偿值如图 3 所示。

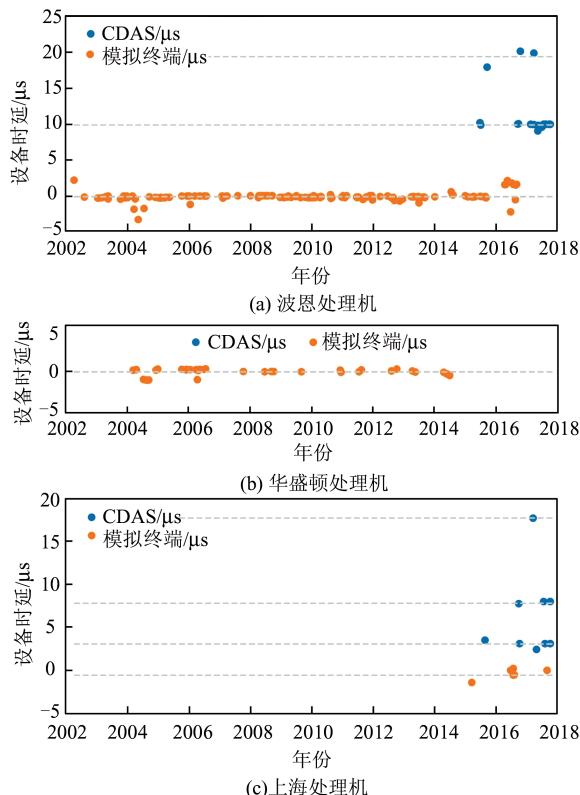


图 3 2002—2017 年 IVS 相关处理的设备时延补偿值
Fig.3 Instrumental Delay Compensation Values Used in IVS Data Correlation from 2002 to 2017

图 3 中,黄色表示观测采用的模拟终端,蓝色表示观测采用的 CDAS 终端。可以看出,图 3(a) 波恩处理机的处理次数最多,因为佘山站参加的 IVS-R1 实验和 INT 观测实验较多,均由波恩处理机处理。佘山站参加的其他 IVS 观测主要由华盛顿处理机进行相关处理,相对次数较少,如图 3(b) 所示。2015 年开始,原由华盛顿处理机处理的数据改由上海相关处理机处理,如图 3(c) 所示。

从图 3 中还可以看出,佘山站使用模拟终端时设备时延较小,数据分布比较均匀,绝大多数数据点分布在 $\pm 1 \mu\text{s}$ 以内,但也有一些较大的值,拟合后大于 3σ 的数据点如表 2 所示。

表 2 中的 4 次观测数据由波恩处理机进行相关处理,可能是操作时选择的参考站数据质量较

差,从而导致佘山站出现了较大的设备时延偏差。在使用 CDAS 终端时,设备时延明显增大,且不同的观测带宽设备时延不同。针对佘山站采用模拟终端参与的观测,表 3 给出了设备时延补偿值的平均值和标准偏差,计算时已剔除了表 2 中数据。

表 2 设备时延补偿值大于 3σ 的数据

Tab.2 Outlier Data Which Instrumental Delay Compensation Values Greater than 3σ

观测年份	观测代码	设备时延补偿值/μs
2002	T2004	2.23
2004	T2029	-3.27
2016	R1740	2.16
2016	R1746	-2.20

表 3 模拟终端的设备时延补偿值统计

Tab.3 Statistics on the Instrumental Delay Compensation Values Using the Analog Terminal

相关处理机	处理次数	平均值/μs	标准偏差/μs
波恩	132	-0.07	0.64
华盛顿	37	-0.23	0.41
上海	6	-0.38	0.59

从表 3 可以看出,3 个处理机采用的佘山站设备时延补偿值存在微小的系统性偏离:上海处理机与波恩处理机相差 $0.31 \mu\text{s}$;上海处理机与华盛顿处理机相差 $0.15 \mu\text{s}$;华盛顿处理机和波恩处理机相差 $0.16 \mu\text{s}$ 。总体上,华盛顿处理机采用的时延补偿值的标准偏差最小,有更高的长期稳定性。针对佘山站采用 CDAS 终端参与的观测,表 4 给出了设备时延补偿值的平均值和标准偏差。

表 4 CDAS 终端的设备时延补偿值统计

Tab.4 Statistics on the Instrumental Delay Compensation Values Using the CDAS Terminal

处理机	带宽/MHz	处理次数	平均值/μs	标准偏差/μs
波恩	4	3	19.36	1.01
	8	17	9.88	0.25
	16	0		
上海	4	1	17.63	
	8	3	7.89	0.11
	16	5	3.04	0.40

表 4 中,波恩处理机处理的次数最多,华盛顿处理机没有处理佘山站 CDAS 数据。在佘山站使用 CDAS 终端 4 MHz 和 8 MHz 带宽情况下,波恩处理机和上海处理机设置的设备时延补偿值

分别相差 $1.7 \mu\text{s}$ 和 $2.0 \mu\text{s}$ 。基于上述结果,有必要改进钟差搜索方法,提高钟差补偿精度,特别是CDAS终端的设备时延补偿精度。

4 结语

VLBI时延观测量的参考历元精度取决于参考站的钟差补偿精度。钟差包括格式器钟差和设备时延,格式器钟差可由GPS接收机精确测量,而设备时延的直接测量非常困难,仅由VLBI相关处理机通过钟差搜索进行时延补偿。为了维持 ΔUT1 的长期一致性,在VLBI相关处理过程中,需要保证VLBI台站钟差补偿值的准确性。

对于佘山站模拟终端,华盛顿处理机、波恩处理机和上海处理机采用的设备时延补偿值符合较好,设备时延补偿值的最大系统性偏离约 $0.3 \mu\text{s}$,并保持了长期的稳定性。对于佘山站CDAS终端,上海处理机和波恩处理机采用的设备时延补偿值存在较大的系统性偏离,特别是在8 MHz带宽观测实验中达到了 $2.0 \mu\text{s}$ 。上述结果为上海相关处理机进一步改进钟差搜索方法,提高钟差补偿精度,特别是CDAS终端的设备时延补偿精度提供了及时而有益的参考依据。

本文仅对佘山站的钟差补偿精度进行了分析,后续将用同样的方法对更多的IVS台站的钟差补偿精度进行分析,筛选出设备时延具有长期稳定性的台站,并以具有长期稳定性的多个台站为参考基准进行钟差补偿,从而提高钟差补偿的准确性。新一代测地VLBI系统VGOS的时延测量精度比现有系统提高1个量级左右,要求时延观测量的参考历元误差小于 $0.1 \mu\text{s}$,这对相关处理机的钟差搜索和钟差补偿方法提出了新的挑战。

参考文献

- [1] Bare C, Clark B G, Kellermann K I, et al. Interferometer Experiment with Independent Local Oscillators [J]. *Science*, 1967, 157: 189-191
- [2] Schuh H, Behrend D. VLBI: A Fascinating Technique for Geodesy and Astrometry [J]. *Journal of Geodynamics*, 2012, 61: 68-80
- [3] Liu Li, Li Jinling. Determination and Analysis of Station Parameters of the Chinese VLBI Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(3): 262-266(刘麟, 李金岭. 中国VLBI网测站参数解析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(3): 262-266)
- [4] Fey A L, Gordon D, Jacobs C S, et al. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry [J]. *The Astronomical Journal*, 2015, 150(2): 58-73
- [5] Shu Fengchun, Leonid P, Wu Jiang, et al. VLBI Ecliptic Plane Survey: VEPS-1[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2017, 230(2): 13-24
- [6] Duev D A, Calvés G M, Pogrebenko S V, et al. Spacecraft VLBI and Doppler Tracking: Algorithms and Implementation[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2012, 541, DOI:10.1051/0004-6361/201218885
- [7] Tong Fengxian, Zheng Weimin, Shu Fengchun. Accurate Relative Positioning of Yutu Lunar Rover Using VLBI Phase-Referencing Mapping Technolog [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(34): 3 362-3 369(童峰贤, 郑为民, 舒逢春. VLBI相位参考成像方法用于玉兔巡视器精确定位[J]. 科学通报, 2014, 59(34): 3 362-3 369)
- [8] Thomas H, Koyama Y, Boehm J, et al. The Effect of Neglecting VLBI Reference Station Clock Offsets on UT1 Estimates [J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(6): 910-916
- [9] Sun Jing, Dai Chunli, Jian Nianchuan, et al. Investigation of Stronger Diurnal ERP Signals in Summer Derived from the VLBI CONT08 Campaign [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55 (22) : 2 177-2 182(孙婧, 戴春丽, 简念川, 等. 利用VLBI-CONT08观测量确定夏季ERP较强周日变化的研究[J]. 科学通报, 2010, 55(22): 2 177-2 182)
- [10] Li Fei, Shao Xianyuan, Qu Chunkai, et al. Solution and Analysis of Earth Orientation Parameters with 2006—2015 VLBI Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(11): 1 581-1 587(李斐, 邵先远, 曲春凯, 等. 利用2006—2015年VLBI数据进行地球定向参数解算与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(11): 1 581-1 587)
- [11] Niell A, Barrett J, Burns A, et al. Demonstration of a Broadband Very Long Baseline Interferometer System: A New Instrument for High - Precision Space Geodesy[J]. *Radio Science*, 2018, 53(10) : 1 269-1 291
- [12] Himwich E, Bertarini A, Corey B, et al. Impact of Station Clocks on UT1-TAI Estimates[C]// The 23th European VLBI Group for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Gothenburg, Sweden, 2017
- [13] Bachmann S, Thaller D, Roggenbuck O, et al. IVS Contribution to ITRF2014 [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(7): 631-654

- [14] Nothnagel A, Nilsson T, Schuh H. Very Long Baseline Interferometry: Dependencies on Frequency Stability [J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214 (3): 66-80
- [15] Behrend D. Data Handling Within the International VLBI Service [J]. *Data Science Journal*, 2013, 12, DOI:10.2481/dsj.WDS-011
- [16] Zhang Xiuzhong, Shu Fengchun, Xiang Yang, et al. VLBI Technology Development at SHAO [C]. IVS 2010 General Meeting, Hobart, Australia, 2010
- [17] Zhu Renjie, Zhang Xiuzhong, Wei Wenren, et al. The Progress of Modern Chinese Data Acquisition System [J]. *Progress in Astronomy*, 2011, 29(2): 207-217(朱人杰, 张秀忠, 韦文仁, 等. 我国新一代 VLBI 数字基带转换器研制进展 [J]. 天文学进展, 2011, 29(2): 207-217)

Accuracy Analysis of Clock Offset Compensation of Shanghai Sheshan VLBI Station

FENG Haotong^{1,2} SHU Fengchun^{1,3} HE Xuan¹

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China

Abstract: **Objectives:** The compensation error of clock offset for a very long baseline interferometry (VLBI) station leads to the shift of delay observables in reference epochs, and further affects the estimation of universal time (UT1). The station clock offset includes the formatter clock offset and the instrumental delay, and the instrumental delay is essential for clock offset compensation. Since the Sheshan VLBI station is the fiducial station of the global geodetic reference frame, it is important to evaluate the compensation accuracy of the clock offset in the Sheshan station. **Methods:** We used the data of Sheshan station from all international geodetic observations from 2002 to 2017. In terms of different international VIBL service (IVS) correlators, data acquisition systems and recorded bandwidth, the compensation values of clock offsets were computed and analyzed by extracting clock parameters from correlator reports and formatter clock offsets from station log files. **Results:** Different VIBL correlators show good agreement and stability in long term for the instrument delay compensation of the analog terminal in the Sheshan station. However, a systematic bias of clock offset compensation of more than 1 μ s is revealed in Sheshan station. **Conclusions:** In most cases, the compensation accuracy of clock offsets for Sheshan VLBI station can meet the requirement of UT1 measurements. However, it is necessary to improve the searching algorithm of the clock offset and the accuracy of clock offset compensation due to the system bias.

Key words: very long baseline interferometry (VLBI); reference epoch; clock offset compensation; instrumental delay

First author: FENG Haotong, master, specializes in radio astronomy measurement data processing. E-mail: 1054708869@qq.com

Corresponding author: SHU Fengchun, PhD, professor. E-mail: sfc@shao.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(11573056, 12073065).

引文格式: FENG Haotong, SHU Fengchun, HE Xuan. Accuracy Analysis of Clock Offset Compensation of Shanghai Sheshan VLBI Station [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(8):1148-1153. DOI:10.13203/j.whugis20190053(冯浩通, 舒逢春, 何璇. 上海佘山 VLBI 站的钟差补偿精度分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(8):1148-1153. DOI:10.13203/j.whugis20190053)