

# 中国 VLBI 网观测地球定向参数能力分析

张志斌<sup>1,2</sup> 王广利<sup>2</sup> 刘祥<sup>1,3</sup> 唐正宏<sup>2</sup>

(1 中国科学院新疆天文台,乌鲁木齐市科学一街 150 号,830011)

(2 中国科学院上海天文台,上海市南丹路 80 号,200030)

(3 中国科学院射电天文重点实验室,乌鲁木齐市科学一街 150 号,830011)

**摘要:**利用上海佘山站和乌鲁木齐南山站历年所参与的 IVS 联测数据进行了地球定向参数(Earth orientation parameters,EOP)解算,结果表明,其精度与 IERS EOP 序列相当,两站单基线测定 UT1 的当前水平处于国际中等,但随着软硬件技术的发展,两站 EOP 观测精度在逐年提高。此外,2011 年佘山站所参与的 IVS UT1 加强观测的 UT1 解算精度,以及两站参与国际 EOP 联测的解算精度都可以满足火星卫星百米量级定位精度对 UT1 的需求。

**关键词:**中国 VLBI 网;VLBI;地球定向参数;UT1;空间大地测量

**中图分类号:**P228.6

水的 3 种形态在全球分布的变化,液核所经历的某种磁流体运动,地幔热对流及冰期后地壳回弹这些地球内部动力学进程,以及日月及行星对固体地球外部施加引力力矩而引起地球质量的迁移,都会导致地球的空间定向改变<sup>[1]</sup>。地球定向参数(Earth orientation parameters,EOP)是实现天球参考架与地球参考架之间相互转换的参数,包括两个章动改正参数、两个极移参数、一个 UT1 参数。其中,章动改正参数结合岁差反映了地球瞬时自转轴相对天极的指向不规律性,而极移及 UT1 参数反映了地球本身自转的不规律性,它们是空间大地测量中常用到的量。除了在空间飞行器定位和导航等方面具有实际用途外,EOP 可以比较全面地揭示和研究地球系统内各圈层运动的状态与动力学过程及彼此之间的联系,还可以为建立地球的各种动力学模型提供约束条件和检验依据<sup>[2]</sup>。甚长基线干涉测量技术(very long baseline interferometry,VLBI)不受动力学因素影响,是唯一可以监测 UT1 变化的空间大地测量技术。如今国际上多家机构已合作或独立开展了对 EOP 的观测,而中国 VLBI 观测网(Chinese VLBI Network, CVN)的 EOP 观测工作还未独

立开展,本文对 CVN 观测 EOP 的能力进行分析,为 CVN 观测 EOP 工作提供参考。

UT1 是 EOP 中最难准确预报的量,但单条东西向基线就可以进行 UT1 观测。国际测地/天体测量学 VLBI 服务(International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, IVS)及若干国家开展的 UT1 快速服务,如 IVS 的“INT”系列、“Ultra-rapid”,俄罗斯的“quasar”等观测,在提供 UT1 方面都有自己的独到优势。目前,我国 VLBI 网主要包括 4 个台站。上海佘山(SES-HAN25, Sh)、乌鲁木齐南山(URUMQI, Ur)分别于 1987 年和 1994 年将各自 25 m 天线投入运行,并参加 IVS 组织的 VLBI 国际联测,这两站已成为国际地球参考架的核心台站。1993 年总参 VLBI 3 m 流动站投入运行,2006 年北京密云 50 m 和昆明凤凰山 40 m 天线投入运行,并于 2006 年我国嫦娥一号工程期间成功对欧洲空间局(ESA)的 Smart-1 卫星进行了观测。此后, CVN 成功参加了中国探月嫦娥工程的快速测轨任务<sup>[3]</sup>。如今,4 个 CVN 测站均已具备天测/测地 VLBI 观测能力,并在我国陆态网工程中开展定期观测。

收稿日期:2013-05-15。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(11073036)。

## 1 实测资料解算与分析

### 1.1 上海佘山站、乌鲁木齐南山站 EOP 观测分析

本文分别解算了佘山、南山站在 1988~2011 年与 1994~2011 年期间参与的所有 IVS 24 h 观测数据<sup>[4]</sup>。这些观测一般包括 5 个以上国际 VLBI 台站。利用 VieVS 天测与测地解析软件<sup>[5]</sup>，每小时解算一组 EOP 和一个湿天顶延迟，钟跳改正只解算常数与一次项，不解算大气梯度，结果见图 1。图 1 中显示了 EOP 解算结果相对于 IERS 提供的 C0405 序列的差异。其中，dX、dY 是两个章动参数， $x_p$ 、 $y_p$  是两个极移参数，dUT1 为解算后的 UT1 对 IERS 所提供的 C0405 解算结果的改正。佘山站于 1994 年完成了 Mark3 记录终端的升级改造，同年 10 月南山站也使用 Mark3 记录终端进行了试观测<sup>[6]</sup>；2005 年之后佘山、南山站均引进了高精度的氢钟与 Mark5 记录终端，故此后的观测误差有所减小且大体趋于平稳。图 1 中，“△”、“□”与“○”分别表示佘山、南山以及两站共同参加国际观测的 EOP 解算结果相对于 IERS 所提供的 C0405 序列的改正。

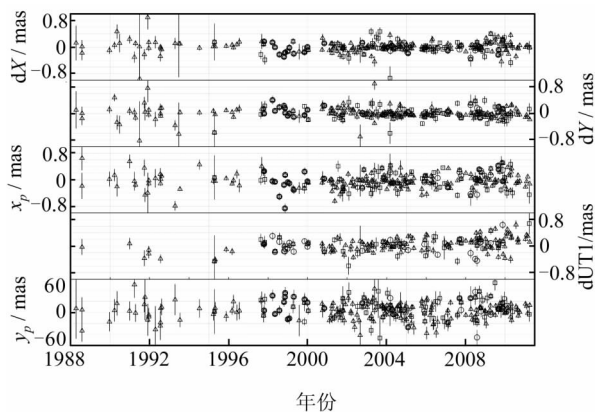


图 1 EOP 解算结果相对 C0405 序列的改正

Fig. 1 EOP Corrections to IERS C0405

从图 1 可知，除少数野点，极移改正误差一般在 1 mas 内，dUT1 误差一般在 20  $\mu$ s 以内，且整体上 EOP 解算精度逐年提高。

### 1.2 佘山南山单基线 UT1 快速服务的精度

因早期两站观测数据点数较少，从 2007 年后的观测数据中选取 1 h 与 2 h 观测数据来验证佘山南山单基线的 dUT1 测量能力。具体处理步骤为：先以 0.5 h 为间隔解算 dUT1 及其对应误差，然后选取 1 d 中解算结果观测精度最高时刻所对应前后 1 h 与 2 h 范围内的所有数据作为快速服务观测资料进行分析。解算中，1 h 内只估计一

组钟差钟速参数、一个湿大气天顶时延改正参数以及一个 dUT1 参数，结果见表 1。因 2008-06-24 佘山南山站单基线在其对应快速服务 2 h 内的观测数比表 1 中其他日期观测要少，且在其观测时段内对应佘山南山两站的射电源天区覆盖比其他日期的观测要差，故解算误差较大。除此之外，误差水平总体保持在 15~40  $\mu$ s 范围内，并与 IERS 提供的 C0405 序列没有明显的偏离。

表 1 佘山南山单基线 1、2 h 数据解算 dUT1 的结果

Tab. 1 dUT1 Solution Determined from Sh-Ur Single Baseline Observations

数据时段	日期	dUT1/ $\mu$ s	误差/ $\mu$ s
1 h	2009-08-25	16.8	40.6
	2009-11-17	37.2	26.9
	2007-09-11	12.6	26.1
	2007-10-10	27.6	27.4
	2008-04-01	16.4	24.1
2 h	2008-06-24	64.7	90.3
	2008-07-29	2.3	37.6
	2008-09-09	69.3	27.7
	2009-04-07	-38.6	26.4
	2009-08-25	36.2	32.6
	2009-09-02	26.3	37.9
	2009-11-17	29.2	15.4

### 1.3 几家机构测定 EOP 能力的比较

#### 1.3.1 佘山、南山站不同组合测定 EOP 能力分析

以各机构的 EOP 解算误差来衡量其观测能力，为在一个直观的范围展示其能力，先对解算误差取对数，再以 IERS Bulletin-B 目前公认的 EOP 精度，即以 dUT1 测定误差为 10  $\mu$ s、其余 EOP 测定误差均为 0.1 mas 作为归一化系数来评价各个机构的能力：

$$C_{i,j} = \frac{\lg \sigma_{i,0}}{\lg \sigma_{i,j}} \quad (i = 1 \sim 5, j = 1 \sim n)$$

其中， $\sigma_{i,0}$  为第  $i$  个 EOP 对应的归一化系数； $\sigma_{i,j}$  为第  $j$  个观测时段(或第  $j$  年观测中误差)的第  $i$  个 EOP 对应的解算误差； $C_{i,j}$  为第  $j$  个观测时段(或第  $j$  年观测中误差)的第  $i$  个 EOP 对应的能力值。

由上可知，观测精度与 IERS Bulletin-B 相当时，能力值为 1，且观测精度越高，能力值越大。表 2 给出了佘山、南山站的不同组合测定 EOP 的能力范围、平均能力及当前能力的结果，其中，用 2009~2011 年 3 a 的数据的平均能力来表示当前能力。佘山南山两站于 2009 年后无共同观测，其当前能力是指其 2009 年数据所反映的能力。表 2 中，1~7 代表不同组合的 EOP 或 dUT1 的解算能力。1、2 分别为佘山站、南山站参与历年国际

联测解算能力;3 为两站共同参与国际联测的解算能力;4 为余山南山单基线测定 dUT1 的能力;5、6 分别为余山南山单基线 1 h 和 2 h 快速测定 dUT1 的能力;7 为余山站 2011 年所参加的 IVS 组织的 UT1 加强观测的解算能力(已扣除 TSUKUB32 站)。

可见,南山站参与国际联测的当前能力及两站共同参与国际联测的能力与 IERS Bulletin-B 的能力是相当的,余山站参与国际联测的当前能力要优于 IERS Bulletin-B(见表 2 中 1、2)。南山站参与国际联测的能力稍弱于余山站,这是因为南山站附近台站较少,不利于与其他台站配合以

对其天区射电源进行均匀覆盖采样而影响了其台站对应中性大气估计的精度,进而连同其氢钟稳定性一同影响了 EOP 参数的估计精度。两站单基线测定 UT1 的当前能力与余山站参与历次国际联测的平均能力相同,其最高能力还达不到 IERS Bulletin-B 的观测能力(见表 2 中 4);两站单基线 2 h 观测的当前能力要高于其 1 h 观测的当前能力(见表 2 中 5、6)。2011 年余山站参与 IVS UT1 加强观测能力要高于余山南山站单基线 1 h、2 h 观测能力以及两站单基线 24 h 观测能力,其能力仅次于两站参与国际观测的能力(见表 2 中 7)。

表 2 余山、南山站不同组合的 EOP 观测能力

Tab. 2 EOP Observation Capability by Different SESHAN25 and URUMQI Combination

不同组合	观测次数	能力范围 平均能力 当前能力				
		dUT1	$x_p$	$y_p$	dX	dY
1 Sh-i	215	0.44~2.43 0.70 1.29	0.56~1.41 0.75 1.10	0.56~1.42 0.74 1.06	0.66~1.45 0.90 1.12	0.65~1.46 0.89 1.11
2 Ur-i	86	0.59~2.43 0.88 0.94	0.71~1.42 0.91 0.94	0.72~1.43 0.93 0.93	0.73~1.44 0.96 0.99	0.72~1.44 0.95 0.97
3 Sh-Ur-i	34	0.85~2.43 0.99 1.11	0.89~1.34 1.00 1.04	0.90~1.36 1.02 1.03	0.94~1.37 1.04 1.08	0.91~1.35 1.03 1.06
4 Sh-Ur	31	0.46~0.97 0.54 0.70	-	-	-	-
5 Sh-Ur-1 h	2	0.62~0.70 0.65 0.65	-	-	-	-
6 Sh-Ur-2 h	10	0.51~0.84 0.62 0.68	-	-	-	-
7 Sh-IN	6	0.73~1.02 0.80 0.80	-	-	-	-

1.3.2 多家机构测定 EOP 能力的比较

本文综合了对国际上几家机构测定 EOP 的能力(见图 2),以此反映 CVN 测定能力在国际上的地位。

IVS 从 1985 年起一直进行着快速 UT1 观测服务,表 3 中给出了几组快速 UT1 实验的结果:① Kashima-Westford 实验<sup>[7]</sup>。② INT1/INT2 观测<sup>[8-10]</sup>。③ 超快 UT1 观测(Ultra-rapid)<sup>[11]</sup>。④ 俄罗斯“quasar”观测计划<sup>[12]</sup>,始于 2006 年,共包括两个计划:Ru-E 与 Ru-U。Ru-E 是利用 3 条基线通过观测确定全部 EOP;Ru-U 则是通过 8 h 观测而获得 UT1 结果。⑤ CVN 相似网(NI-Br-Ov-Fd)。利用 EOP 覆盖对基线变化影响的规律<sup>[13]</sup>,遵循与 CVN 基线投影覆盖相似、纬度相近、网形相似且各台站有共同的观测这 4 个条件,从约 1 000 个候选网形中选出了 4 个台站:NL-VLBA、BR-VLBA、OV-VLBA、FD-VLBA。这 4 个台站均隶属于 VLBA,其中与 Sh-Ur 相似基线为 OV-VLBA 与 NL-VLBA 所组成的 Ov-Nl,表 3 给出了其 EOP 解算能力。表 3 中,1 为 IERS Bulletin-B 目前公认的 EOP 测定能力;2、3、4 为上文提到的不同 IVS 观测网的 UT1 观测实验;5、6 为俄罗斯“quasar”测定 EOP/dUT1 的能力;7 为 CVN 相似网测定 EOP 的能力;8 为 CVN 相

似网中与 Sh-Ur 相似基线 Ov-Nl 于 90 年代测定 dUT1 的能力;为统一比较相同时期国际不同机构的 EOP 测定能力,给出了余山南山单基线于不同年份测定 dUT1 的能力(9~12)。

表 3 几家机构测定 dUT1/EOP 的能力值

Tab. 3 Capability of dUT1/EOP Observation by Different Agencies

机构(年份)	次数	dUT1	$x_p$	$y_p$	dX	dY
1 Bulletin-B-IERS	-	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2 INT1(2000~2010)	-	0.80	-	-	-	-
INT2(2002~2010)	-	0.83	-	-	-	-
3 Kashima-Westford(2005)	-	0.72	-	-	-	-
4 Ultra-rapid(2007)	16	0.69	-	-	-	-
5 Ru-E-Quasar(2006~2008)	27	0.61	0.69	0.67	0.70	0.70
6 Ru-U-Quasar(2006~2008)	30	0.47	-	-	-	-
7 NlBrOvFd-VLBA(1994~1997)	11	0.72	0.80	0.75	0.89	0.88
8 Ov-Nl-VLBA(1992~1997)	27	0.70	-	-	-	-
9 Sh-Ur-i(1997~2011)	34	1.00	1.00	1.02	1.04	1.03
10 Sh-Ur-CVN(1997~2011)	31	0.53	-	-	-	-
11 Sh-Ur-CVN(2006~2008)	12	0.59	-	-	-	-
12 Sh-Ur-CVN(2009)	5	0.70	-	-	-	-
13 Sh-IN(2011)*	6	0.80	-	-	-	-

注:\*已扣除 TSUKUB32。

表3中的6与11表示新时期“quasar”与CVN的dUT1解算精度的比较,可看出CVN观测能力要强于“quasar”。从7、8与9~12的对比可以看出,VLBA系统整体的稳定性是较高的,其中,Ov-Nl基线90年代观测UT1的精度就已达到了佘山南山单基线2009年的观测精度。

UT1测定精度的量级主要由基线的东西覆盖长度决定,Malkin提出EOP的测定精度与VLBI网体积存在幂律比的关系<sup>[14]</sup>,不过,若基线东西跨度太长的话,两站共同观测的源的数目会减少,共视源的天区均匀覆盖将受到限制,这些都是需要考虑的。

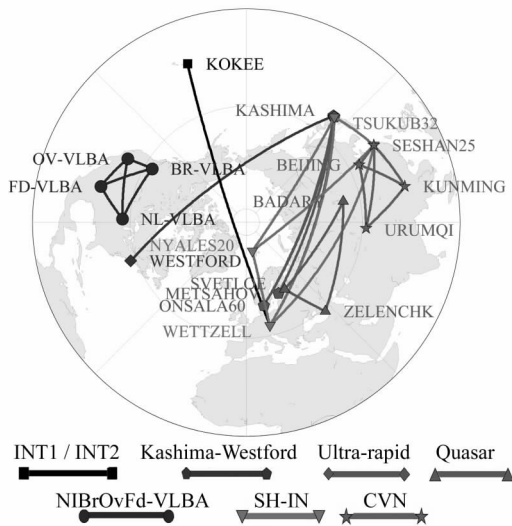


图2 不同机构的基线或台网的分布图

Fig. 2 Some Baselines or Networks of Different Agencies

## 2 讨论

从两站建站至今,佘山、南山站UT1的观测能力正逐步提高,其中,VLBI终端系统的升级与高精度、高稳定性氢钟的引进等硬件方面的技术提高,直接关系到EOP解算精度的提升,这主要体现在它们提供了更密集的观测采样、更稳定的氢钟,以及更高的观测信噪比。

CVN各台站统一采用了Mark5数据采集终端,避免了不同采集终端间需转化数据的问题,节省了时间,这是CVN的已有优势。在数据传输方面,除了必要的e-VLBI的支持,现有的数据传输协议也应该有一定的改进,以摆脱基线太长而对数据传输产生的不利影响。

李金岭等对我国天测与测地VLBI网络的未来建设作了需求分析和测站配置技术指标分析<sup>[15]</sup>,届时我国国土覆盖优势将被充分利用,东西与南北方向的基线距离将进一步拉长,这对

EOP测定精度的提高是有利的。

在空间探测方面,以地基VLBI观测火星卫星为例,在约每两年的火地会合时刻附近,若要求对其卫星定位精度为百米量级,则其定位精度应高于18 nrad,这要求UT1测定精度高于25  $\mu$ s(能力值大于0.72),尽管佘山南山单基线当前暂达不到这个能力(能力值为0.70),但其参与国际VLBI联测则可以满足这个要求。CVN与欧洲台站合作联测,极移解算精度在60~70个 $\mu$ as,UT1解算精度可达数个 $\mu$ s。CVN还在发展之中,精化模型及发展硬件是不小的任务,同样,新的有效观测手段或计划的提出对精度提高也有着重要促进作用。

## 3 结语

本文通过分析佘山、南山站各自或共同参与国际EOP联测解算精度、佘山南山单基线及其1、2 h数据测定UT1能力指出,两站参与国际观测的EOP解算精度与IERS Bulletin-B的结果相当;2011年佘山站参与的IVS组织的6次UT1加强观测的UT1测定能力明显高于佘山南山两站单基线及其1、2 h数据测定UT1的能力;通过与国际多家EOP测定机构的能力对比可知,CVN进行UT1独立测量能力目前处于国际中等水平;从各表格解算数据中可知,随着软硬件技术的发展,佘山、南山站的UT1测定能力在逐年提高;在火地交会处,佘山、南山站参与国际EOP联测的能力目前可以满足对火星卫星提供百米定位量级要求。应尽快组织观测检验CVN的EOP观测能力、佘山南山单基线解算UT1的当前观测能力、UT1快速解算能力,以及落实VLBI网络未来建设计划,这对今后中国深空探测具有重要意义。

## 参考文献

- [1] Herring T. Treatise on Geophysics [M]. New York: Elsevier, 2009
- [2] 李金岭,郑大伟,傅容珊.地球自转十年尺度波动与核幔耦合的可能机制[J].地球科学进展,1997,12: 514-518
- [3] Li Jingling. The Contribution of CVN to the CE-1 Mission [M] // Finkelstein A, Behrend D. Measuring the Future. Saint Petersburg: Nauka, 2008
- [4] Schlüter W, Behrend D. The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS): Current Capabilities and Future Prospects [J]. Journal

- of Geodesy, 2007, 81(6-8):379-387
- [5] Boehm J, Spicakova H, Plank L, et al. Plans for the Vienna VLBI Software VieVS[C]. The 19th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Bordeaux, France, 2009
- [6] 韦文仁, 朱从信. 余山站 MK3 磁带记录加密改进[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 1996, 17:253-258
- [7] Yasuhiro K, Tersuro K, Hiro O. Rapid Turn Around EOP Measurements by VLBI over the Internet[J]. Earth and Environmental Science, 2005, 128:119-124
- [8] Boehm J, Nilsson T, Schuh H. Universal Time from VLBI Single Baseline Observations During CONT08 [R]. The 6th IVS General Meeting, Hobart, Australia, 2010
- [9] Hobiger T, Yasuhiro K, Johannes B, et al. The Effect of Neglecting VLBI Reference Station Clock Offsets on UT1 Estimates[J]. Advances in Space Research, 2009, 43:910-916
- [10] 王广利, 徐明辉. 利用 IVS 加强观测确定 UT1 的分析研究[J]. 天文学报, 2012, 53(3):222-228
- [11] Mamoru S, Hiroshi T, Yasuhiro K, et al. Ultra-rapid UT1 Measurement by e-VLBI [J]. Earth Planets Space, 2008, 60:865-870
- [12] Finkelstein A, Iapov A, Smolentsev S. Russian VLBI Network "Quasar": from 2006 to 2011 [C]. The 5th IVS General Meeting, St. Petersburg, Russia, 2008
- [13] 钱志瀚, 邬林达. 甚长基线射电干涉测量[M]. 北京:测绘出版社, 1983
- [14] Malkin Z. On Comparison of the Earth Orientation Parameters Obtained from Different VLBI Networks and Observing Programs[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(6): 547-556
- [15] 李金岭, 魏二虎, 孙中苗, 等. 关于我国天测与测地 VLBI 网络未来建设的讨论[J]. 武汉大学学报·信息科学, 2010, 35(6):670-671
- [16] 魏二虎, 刘经南, 潘培鲸. 近三年 VLBI 观测数据处理及分析[J]. 武汉大学学报·信息科学, 2008, 33(12):1 275-1 278

第一作者简介: 张志斌, 博士生, 现从事测地 VLBI 方面研究。  
E-mail: zhangzhibin@xao.ac.cn

## Analysis of EOP Determination via Chinese VLBI Network

ZHANG Zhibin<sup>1,2</sup> WANG Guangli<sup>2</sup> LIU Xiang<sup>1,3</sup> TANG Zhenghong<sup>2</sup>

(1 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 150 Kexueyi Street, Urumqi 830011, China)

(2 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China)

(3 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, 150 Kexueyi Street, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** The EOPs are determined from the IVS observations which Sheshan Station in Shanghai and Nanshan Station in Urumqi were involved. The results show that the precision is comparable to the IERS EOP series, and the current precision of UT1 determined from single baseline observations of the two stations is in the middle level of the international. However, with the development of the technologies of software and hardware, the EOP precision for observations of the two stations is improving year by year. Besides, the determination precisions of UT1 either from the IVS intensive observations in 2011 with Sheshan jointed in or from international EOP observations with the two stations jointed in, can meet the requirements of the 100-m positioning precision of satellite of Mars to UT1.

**Key words:** CVN; VLBI; EOP; UT1; space geodesy

**About the first author:** ZHANG Zhibin, Ph. D candidate, majors in geodetic VLBI.

E-mail: zhangzhibin@xao.ac.cn