

文章编号: 1000-8349(2010)04-424-09



# 乌鲁木齐天文站在月球探测同波束干涉测量中的作用

王 震<sup>1</sup>, 叶 楠<sup>2</sup>, 尚 堃<sup>3</sup>, 刘庆会<sup>3</sup>, 王 娜<sup>1</sup>,  
刘 祥<sup>1</sup>, 艾力·玉<sup>1</sup>, 花田英夫<sup>4</sup>, 河野宣之<sup>4</sup>

(1. 中国科学院 国家天文台 / 乌鲁木齐天文站, 乌鲁木齐 830011; 2. 宇航动力学国家重点实验室, 西安 710043; 3. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 4. 日本国立天文台, 日本国岩手奥州水泽)

**摘要:** 首先简要介绍同波束干涉测量技术, 随后叙述中国科学院国家天文台乌鲁木齐天文站在 2008 年成功完成了约 200 h 日本月球卫星 SELENE 同波束较差甚长基线干涉测量, 并阐述乌站在此次 VLBI 中的作用。给出利用 SELENE 的观测数据, 分析、解算出乌站 25 m 天线与日本 VERA 网相关台站基线 Rstar、Vstar 的 S1、S2、S3、X 频段的较差相关相位、较差相关相位残差, 以及对各频段的较差相关相位、较差相关相位残差比对, 最后获得较差相位时延。结果显示, 同波束甚长基线干涉测量比传统 VLBI 观测得到的群时延精度提高了 1~2 个量级。

**关键词:** 同波束干涉测量; SELENE 卫星; 较差相位时延

**中图分类号:** P228.6 **文献标识码:** A

## 1 引 言

甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 是 20 世纪 60 年代兴起的  
天体测量新技术<sup>[1]</sup>。此测量技术利用电磁波干涉原理精确测定极其细微的角大小及其变化,  
具有精度高等优点, 在天体测量学、天体物理学、地球动力学等诸多领域有广泛应用。

国家天文台乌鲁木齐天文站 (Urumqi Astronomical Observatory, 简称乌站) 是 EVN (Eu-

---

**收稿日期:** 2009-11-16; **修回日期:** 2010-03-02

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (10973031); 863 计划 (2008AA12A210); 萤火探测工程 VLBI 测轨系统

ropean VLBI Network)、IVS (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) 和 APT (Asia Pacific Telescope) 的成员。在 2008 年参与日本探月工程 SELENE (SElenological and Engineering Explorer) 观测时, 采用了同波束干涉测量 (Same Beam Interferometry, 简称 SBI) 方法。在此次国际联合观测中, 如果定轨只用 Doppler/Range 数据, Rstar 和 Vstar 定轨精度为几十米, 加上日本 VERA 网 4 个站的 VLBI 数据, 事后数据分析解算得到高精度的相位时延, 定轨精度为十几米, 再加上 4 个国际站的 VLBI 数据, 定轨精度提高到几米<sup>[2]</sup>。

## 2 同波束干涉测量技术

### 2.1 同波束干涉测量原理

在传统 VLBI 观测中, 通常卫星和射电源的角距较大约为几度, 天线主瓣不能够同时观测卫星和射电源, 在交替观测的几分钟内, 空间电离层和空间大气对流层引起传输电波的短周期相位变化, 最大时约有几十度。观测站接收设备热噪声产生的随机误差和温度引起的相位漂移也很大, 因此采用原子钟提供相位校正信号 (Phase Calibration signal, PCAL), 如图 1 所示。

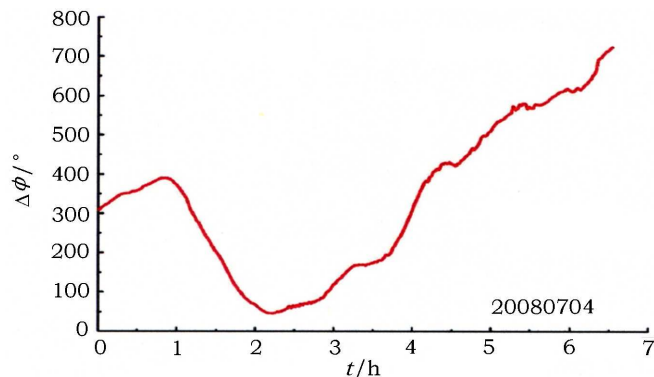


图 1 乌鲁木齐天文站相位校正

图中是 2008 年 7 月 4 日乌站在日本月球卫星观测实验中某一个频率通道 PCAL 约 7 h 的相位变化, 接收的卫星电波信号与 PCAL 比较, 可以把接收设备中通道不一致的附加相移去掉。

SBI 测量技术<sup>[3,4]</sup>是指两个卫星视线方向夹角很小, 地面射电望远镜在同一波束内对卫星载波同时观测, 卫星发射电波信号经历的电离层、大气对流层和观测站接收设备路径几乎一致, 通过数字化采样和相关处理得到某一频点的两个卫星相位序列  $\Delta\phi_i^{\text{source1}}$  和  $\Delta\phi_i^{\text{source2}}$ , 在  $\Delta\Delta\phi_i = \Delta\phi_i^{\text{source1}} - \Delta\phi_i^{\text{source2}}$  测量中, 可以去掉电离层、大气对流层及观测设备引起的绝大部分误差, 从而有效提高两颗卫星几何时延测量值的精度。

相关处理后的卫星相位残差 (Residual Fringe Phase, RFP)<sup>[5]</sup>:

$$\begin{aligned} \Delta\Delta\phi_i &= 2\pi f_i (\Delta\Delta\tau_g + \Delta\Delta\tau_{\text{inst}} + \Delta\Delta\tau_{\text{trop}} - \Delta\Delta\tau_{\text{ion}}) - 2\pi\Delta N_i + \sigma_i \\ &= 2\pi f_i \Delta\Delta\tau_{\text{res}} - 2\pi\Delta N_i + \sigma_i, \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\Delta\Delta\phi_i$  为  $\Delta\phi_i^{\text{source1}}$  和  $\Delta\phi_i^{\text{source2}}$  先在两个地面天线间, 然后在两个卫星间较差的相关相位,  $\Delta\Delta\tau_g$  是两个观测站间及两个卫星间几何时延预测值的残差。  $\Delta\Delta\tau_{\text{ion}}$ 、 $\Delta\Delta\tau_{\text{trop}}$ 、和  $\Delta\Delta\tau_{\text{inst}}$  分别为两个观测站间及两个卫星间的 4 条传播路径上电离层、大气对流层、观测设备引起延迟的长周期相较差量,  $N_i$  为  $2\pi$  模糊度的个数;  $\sigma_i$  为相关相位的短周期项测量误差, 由电离层、大气对流层、接收设备及热噪声的高频干扰引起;  $\Delta\Delta\tau_{\text{res}}$  为较差残余时延。卫星发出电波在电离层中传播波前的相位会超前, 在大气对流层和观测站接收设备中传播波前的相位会滞后, 因此式中电离层引起的延迟与其他情况引起延迟的符号相反<sup>[6]</sup>。

干涉信号群时延分辨率取决于信号带宽, 带宽越宽, 分辨率越高; 要提高测量精度, 需要增加测量信号带宽。信号带宽越宽意味着数据速率越高, 这给数据记录和处理带来了困难。为了解决这个矛盾, 美国麻省理工学院 Haystack 射电天文台 VLBI 研究小组 Rogers 等人在 1970 年提出了带宽综合的理论 (bandwidth synthesis)<sup>[7]</sup>: 将记录信号在频域上划分成许多间隔较大的频段, 每一个频段当作一个频率通道, 根据每个通道记录信号估算单通道延迟和延迟率, 然后通过最小二乘法拟合多通道延迟, 以得到高精度延迟值。在深空探测中, 由于可用频段和发射能量限制, 卫星可以发射多频点信号, 形成频点间差值为几十兆赫兹带宽; 利用带宽综合技术, 从高精度相关相位中, 解算出窄带到宽带的群时延, 然后再从群时延进一步推出相位时延。

## 2.2 群时延与相位时延

VLBI 数据处理核心是从大量观测数据中求出同一波前信号到达基线两端观测站的时延和时延率。时延和时延率分别对应观测目标对于基线两端观测站的距离差和速度差。群延迟可通过相关相位除以电波带宽得出, 相当于卫星信号相关相位对于观测频率带宽的斜率, 即:

$$\Delta\Delta\tau_{\text{group}} = \Delta\Delta\phi_i / 2\pi(f_2 - f_1), \quad (2)$$

式中  $f_2$ 、 $f_1$  为卫星发射电波信号频率,  $(f_2 - f_1)$  为约几十兆赫兹观测频率带宽。群时延随机误差、系统误差约为几纳秒, 即使在带宽不受限制的射电源 VLBI 观测中群时延测量精度也只能达到几十皮秒。

在 SBI 观测中, source1 和 source2 间的较差相位时延:

$$\Delta\Delta\tau_{\text{phase}} = \Delta\Delta\phi_i / 2\pi f_i \quad (i = S1, S2, S3, X), \quad (3)$$

较差相位时延把从带宽数十兆赫兹得到的群延迟延伸到观测频点的数千兆赫兹, 由较差相位绝对值除以载波信号频率 (如 X 频段 8 456 MHz) 得出。当两个卫星角距大于  $0.2^\circ$  时, 随机误差、系统误差约为  $10^{-11}$  s; 当两个卫星角距小于  $0.2^\circ$ , 随机误差、系统误差约为几皮秒。因此相位时延测量精度高于群时延测量精度 1~2 个量级。

## 3 乌鲁木齐天文站在日本探月工程 SELENE 中的贡献

### 3.1 乌鲁木齐天文站系统设备

乌站 25 m 射电望远镜于 1993 年建成, 距乌鲁木齐市南 70 km, 东经  $87^\circ 11'$ , 北纬  $43^\circ 11'$ , 海拔 2 080 m, 天线为 25 m 口径修正型卡塞格伦天线, 目前使用的接收机波段有 5 个: L、

$C$  和  $K$  波段用于天体物理观测,  $S/X$  的双频波段通常用于大地测量观测,  $X$  有时也用于天体物理观测, 现在  $S/X$  双频波段主要用于月球卫星观测以及参加 IVS 观测。记录设备有 MK5、MK2、K5、SRTP。

### 3.2 日本探月工程 SELENE

2007 年 9 月 14 日发射的日本月球卫星 SELENE 由 3 个卫星组成, 即绕 100 km 极轨圆轨道飞行的三轴稳定主卫星, 绕椭圆轨道飞行的两个自旋稳定小卫星 Rstar 和 Vstar<sup>[8]</sup>。Rstar 和 Vstar 分别送出 4 个有效全向辐射功率 (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) 强度为 20 mW 的载波信号,  $S$  频段 3 个 (2 212 MHz, 2 218 MHz, 2 287 MHz),  $X$  频段 1 个 (8 456 MHz)。SELENE 卫星 VLBI 观测网分布概念图, 如图 2 所示, 由 8 个天线构成: 日本 VERA 网即 Mizusawa (水泽)(N 39°8' E141°8')、Ogasawara (小笠原)(N 27°5' E142°3')、Ishigaki (石垣)(N 24°4' E124°0')、Iriki (入来)(N 31°4' E130°6'); 4 个国际台站, Shanghai (中国)(N 31°5' E121°11')、Urumqi (中国)(N 43°20' E87°11')、Hobart(澳大利亚)(S 42°48' E147°24')、Wettzell (德国)(N 49°8' E12°52')。日本 VERA 网 4 个 20 m 天线间的基线长度都在 2 000 km 以内, 形成的综合孔径望远镜的分辨率不是很高; 然而在 VERA 网基础上再加盟 4 个国际台站, 使得此天线阵中两个望远镜之间基线长度最长达到 12 247 km, 有效提高了综合望远镜的分辨率, 同时也提高了定轨精度。

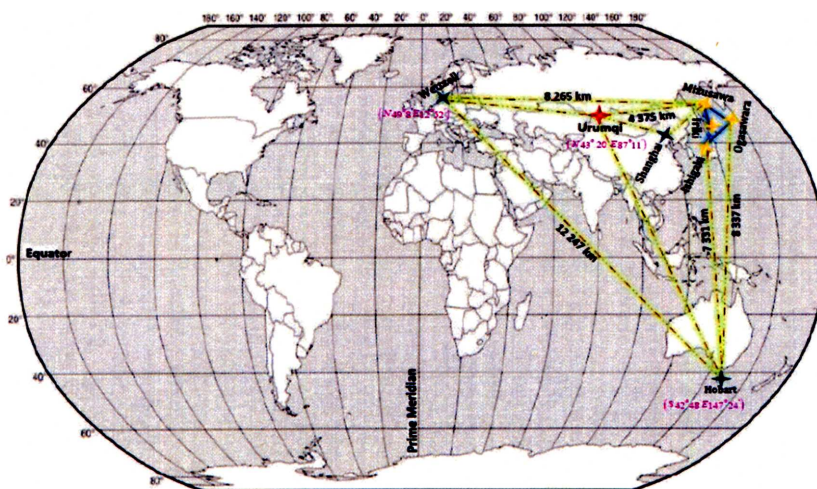


图 2 SELENE 卫星 VLBI 网中的天线分布概念图<sup>1)</sup>

### 3.3 乌鲁木齐天文站在 SELENE 观测中的贡献

日本 VERA 网天线与德国 Wettzell 台站距离非常远, 乌站 25 m 射电望远镜延伸了 VLBI 网东西方向基线长度。如果没有乌站加入, VERA 网望远镜的观测数据在某些时间段不能与德国 Wettzell 台站的观测数据相关, 给卫星定轨精度带来较大影响。图 3 显示了 VERA 网天

1) 本文所有彩图见网站 <http://202.127.29.4/twxjz/index.com>

线与 Urumqi 和 Wettzell 天线共视情况, 图中天线俯仰角曲线不连续是卫星转到了月球背面, 地面天线观测不到。例如在 2008 年 5 月 30 日 VLBI 联测中, VERA 网天线仰角低于  $5^\circ$  时与 Wettzell 台站天线没有了共视时间, 而这时乌站天线起到了重要作用, 仍然保持与 Wettzell 天线共视时间, 有利于观测台站数据的相关。

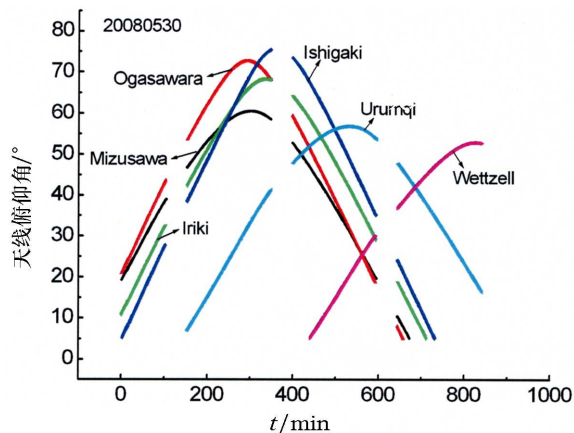


图 3 天线共视时间

## 4 乌鲁木齐天文站部分测量数据及解算结果

### 4.1 观测时间分布

乌站于 2008 年 1 月、5 月、6 月、7 月, 2009 年 2 月对日本月球卫星进行同波束较差 VLBI 观测时间, 如表 1 所示。其中, SBI 角距: 2008 年 1 月  $0^\circ \sim 0.3^\circ$ , 5—7 月  $0^\circ \sim 0.56^\circ$ , 2009 年 2 月  $0^\circ \sim 0.7^\circ$ 。

表 1 乌鲁木齐天文站观测日本月球卫星时间表

观测方式	2008 年				2009 年
	$t(1 \text{ 月})/\text{min}$	$t(5 \text{ 月})/\text{min}$	$t(6 \text{ 月})/\text{min}$	$t(7 \text{ 月})/\text{min}$	$t(2 \text{ 月})/\text{min}$
swithing	3 175	908	1 214	956	
samebeam	281	1 506	1 932	842	780
main - star	493	86	44		
Rstar	56	164	308		
Vstar	554	32	466		

### 4.2 乌鲁木齐天文站相关相位及残差结果

我们对乌站 25 m 天线 2008 年 7 月份观测的日本月球卫星数据分析、处理、解算如下: 图 4 给出 2008 年 7 月 4 日 Mizusawa (日本水泽) 20 m 望远镜与乌站 25 m 望远镜基线,  $0.5 \text{ h}$  角距小于  $0.1^\circ$  时 Rstar、Vstar 和 R-Vstar (Rstar 与 Vstar 相关相位的差) 在  $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$  和  $X$  频段的相关相位 (correlation phase), 每  $0.25 \text{ h}$  对其数据相关处理, 时延预测值在每个相关时段内由轨道预测值通过 8 次多项拟合解算得出。从图中可以看出  $X$  频段相关相位变化幅度约为  $S$  频段 4 倍, 在  $0.5 \text{ h}$  内最大变化约有  $40\ 000^\circ$ 。

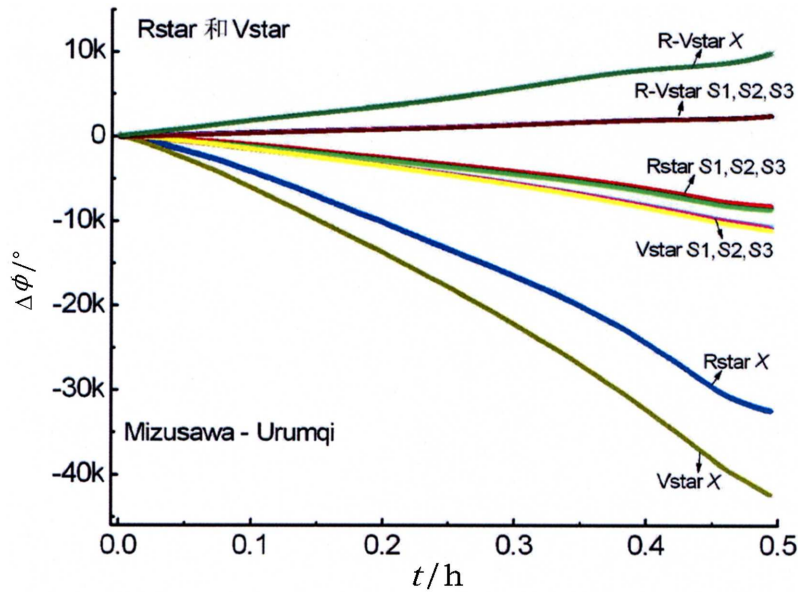


图 4 Rstar、Vstar 和 R-Vstar 的相关相位

图 5(a)–(d) 分别给出 Rstar 和 Vstars 4 个频点 S1、S2、S3、X 通过 7 次多项式拟合、60 s 滑动平均相关相位残差 (phase fluctuation)。由于存在电离层、大气对流层误差和观

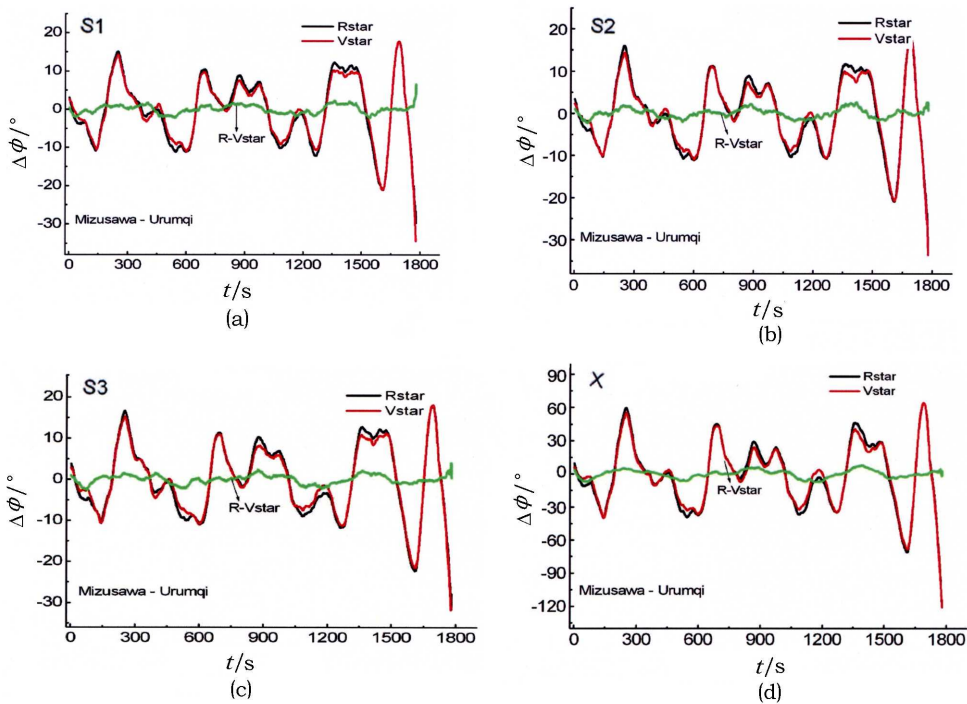


图 5 (a)、(b)、(c)、(d) Rstar、Vstar 的 S1, S2, S3, X 频段较差相关相位残差



测接收设备性能不稳定,两个观测站之间  $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$  三个频段相关相位残差在约  $\pm 15^\circ$  之间变化,  $X$  频段相关相位在约  $\pm 50^\circ$  之间变化;两颗卫星对应频段相位残差再次较差后,  $S$  三个频段相关相位残差在约  $\pm 2^\circ$  之间变化,  $X$  频段相关相位残差在约  $\pm 8^\circ$  之间变化。Rstar 和 Vstar 的  $S1$ 、 $S2$  和  $S3$  频段 6 条相关相位残差变化趋势相似,  $X$  频段的 2 条相关相位残差变化趋势相似。将各频段残差作比较,得到图 6。对比图 5 和图 6,可以看出两卫星各频点相关相位残差及其一阶差分均较小,为进一步解算相位时延提供了条件。

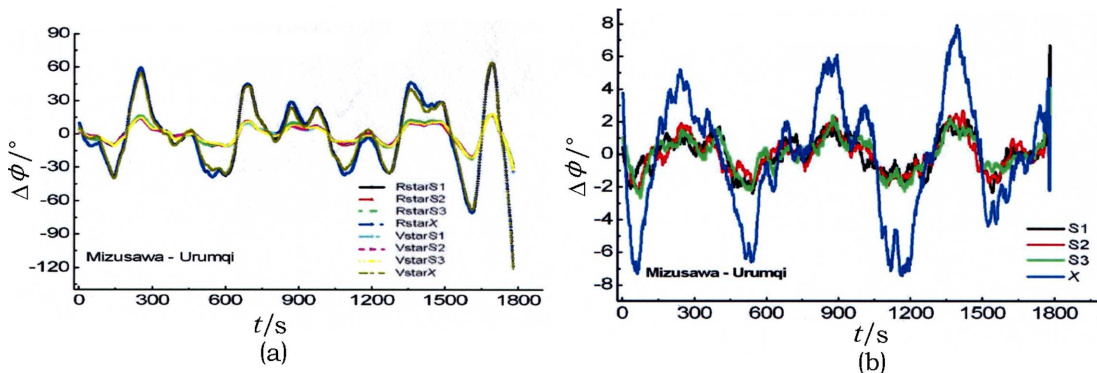


图 6 (a)、(b) Rstar、Vstar 的  $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ 、 $X$  频段较差相关相位残差

#### 4.3 相位时延解算结果

图 7(a) 给出了 Urumqi-Ogasawara 基线, Rstar 和 Vstar 两颗卫星  $S$  频段较差相位时延 (Differential Phase Delay, DPD), 变化范围约为 5 km。图 7(b) 给出经过 9 次多项式拟合后  $S1$  频点的较差相位时延残差 (Fluctuation of DPD), 其均方差约为 0.57 mm。在 SBI 观测中, 当两个卫星角距较大和电离层干扰较大时, 较差相位时延残差也随之变大。乌站参与的观测, 两卫星角距大于  $0.56^\circ$  时, 相位时延残差最大均方差约 3 mm, 此误差比现有传统 VLBI 群时延残差精度提高了 1~2 个量级。

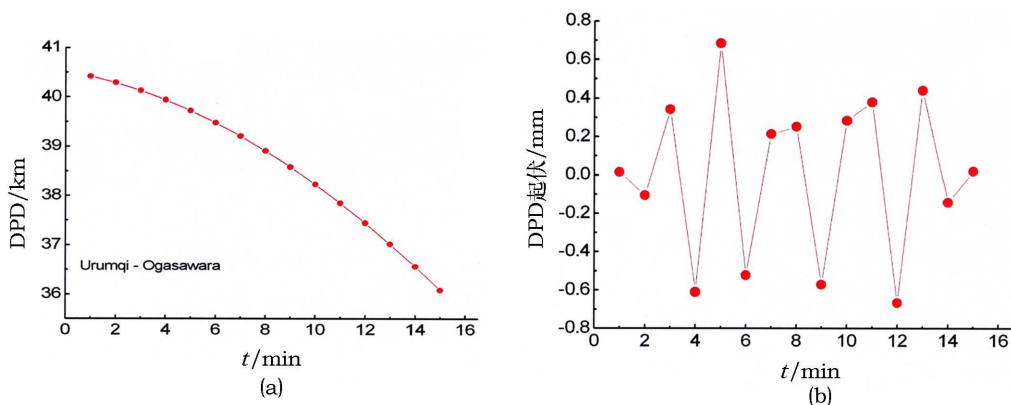


图 7 (a) Urumqi-Ogasawara 基线较差相位时延; (b) 较差相位时延残差

## 5 结 论

中国科学院乌鲁木齐天文站 25 m 射电望远镜在对日本月球卫星 SELENE 两个子卫星 Rstar 和 Vstar 同波束较差 VLBI 观测中, 当两卫星角距较小时, 成功取得超高精度 VLBI 较差相位时延。乌站具备了利用同波束较差 VLBI 观测方法获得超高精度相位时延的能力, 将在未来我国第一个火星探测器“萤火一号”(YH-1)、俄罗斯“福布斯”(Phobos Grunt) 探测器的精密定轨以及我国嫦娥工程精密定轨中, 发挥应有的作用。

## 致 谢

本研究得到了中国科学院“天文地球动力学方向”百人计划、中国科学院“宇宙探测方向”百人计划、中俄合作“萤火-1”火星探测工程 VLBI 测控系统的支持, 特此致谢。

## 参考文献:

- [1] Ulvestad J, Goss M. *Sky & Telescope*, 1999, 98 : 36
- [2] Goossens S, Matsumoto K, Ishihara Y, et al. *J Geod Soc Jpn*, 2009, 55: 255
- [3] Liu Q, Matsumoto K, Kikuchi F, et al. *IEICE-JB*, 2006, J89B-B: 602
- [4] Liu Q, Kikuchi F, Tsuruta S, et al. *IEEE Trans Antenna Propag*, 2007, 55: 1466
- [5] 刘庆会, 史 弦, 菊池冬彦等. *中国科学 G 辑*, 2009, 39: 1410
- [6] Ping J, Kono Y, Matsumoto K, et al. *Earth Planets Space*, 2002, 54: e13
- [7] Rogers A. E. E. *Radio Sci*, 1970, 5: 1239
- [8] Kikuchi F, Liu Q, Hanada H, et al. *Radio Sci*, 2009, 44: 1

## The Contribution of Urumqi Astronomical Observatory in Lunar Exploration with Same Beam Interferometry

WANG Zhen<sup>1</sup>, YE Nan<sup>2</sup>, SHANG Kun<sup>3</sup>, LIU Qing-hui<sup>3</sup>, WANG Na<sup>1</sup>, LIU Xiang<sup>1</sup>, AILI Yu<sup>1</sup>,  
HANADA Hideo<sup>4</sup>, KAWANO Nobuyuki<sup>4</sup>

(1. *Urumqi Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*; 2. *State Key Laboratory of Space Dynamics, Xian 710043, China*; 3. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 4. *National Astronomical Observatory of Japan, Oshu, Iwate 023-0861, Japan*)

**Abstract:** During 2008 and 2009, UAO successfully accomplished more than 200 hours observation time in SELENE and Engineering Explore (SELENE), a Japanese Lunar orbiter. The VLBI observation in SELENE is adopted a method called Same Beam Interferometry (SBI), wh-



ich has advantages in calibration the influence of atmosphere, ionosphere and noise from antenna and receiver, so as to determine a high accuracy in correlation phase and the Differential Phase Delay (DPD).

In this article, a large number of observation data received by UAO from SELENE are processed, correlation phase and DPD are calculated in *S*-band and *X*-band signal. The residuals show a better RMS (root mean square) than traditional VLBI results, and nearly two-order improvement is achieved. In the future, Same Beam Interferometry will be used widely in China's forthcoming deep space missions, such as Chang'e-3 lunar mission and Yinghuo-1 Martian mission. Urumqi Astronomical Observatory will make a significant effort in orbit determination and other scientific applications.

**Key words:** Same Beam Interferometry; SELENE; differential phase delay

\* \* \* \* \*

## 《天文学进展》征稿启事

1. 本刊刊登反映国内外天文学研究的最新进展和作者见解的述评、研究论文、前沿介绍、专题讲座、研究快报(应少于 5000 字)、学术活动报导和短评(均应少于 1500 字)。反映新思路、新手段、新成果的短评优先发表。
2. 来稿须包括: 题名、作者署名、作者单位及所在地与邮政编码、摘要、关键词、正文、参考文献、英文摘要、英文关键词等。
3. 来稿应论点明确、叙述精练、条理清晰、深入浅出,以利非本分支学科的读者阅读。
4. 摘要应该简明扼要地概括正文中的主要信息。采用第三人称的写法,不用“本文”、“作者”等作主语。稿件如果以中文发表,英文摘要应有近一页的篇幅。
5. 关键词请尽可能参照 ApJ、MNRAS 和 A&A 共同采用的关键词表选用,可适当扩充。
6. 稿件中引用论点、公式、图、表均需注明参考文献(按文中出现顺序编码,在右上角用小方括号标出)。正文后则按编码次序依本刊要求的编排格式列出相应的参考文献。
7. 图、表务求精、简、规范,以配合文字阐明观点。公式务求精约,杜绝公式推导过程。
8. 请勿一稿两投。本刊采用 latex 排版,排版模板请从本刊主页上下载:  
<http://202.127.29.4/twxjz/index.htm>。来稿请通过 E-mail 发送至 [twxjz@shao.ac.cn](mailto:twxjz@shao.ac.cn); 联系电话: (021)64386191×345 或 346; 传真: (021)54592244。

《天文学进展》编辑部

2010 年 12 月