

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.01.08

# 同波束 VLBI 差分相位抖动与 角距离的关系模型

唐明乐, 刘庆会, 贺庆宝, 郑 鑫, 吴亚军

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** 在有 2 个探测器的深空探测中, 利用同波束 VLBI 技术可解算高精度的差分相时延, 进而同时提高 2 个探测器的测定轨精度。但是, 差分相时延的解算条件严格, 差分相位抖动较大时直接影响解算的成功率。针对这一问题, 利用 SELENE 两颗小卫星 Rstar 和 Vstar 的 4 个测站长达 1 年的同波束 VLBI 观测数据, 统计得出了差分相位抖动与其对应的角距离的关系模型。该模型的建立, 既有利于提高同波束 VLBI 差分相时延的解算成功率, 又对行星中性大气和电离层掩星观测研究具有重要的参考意义。

**关 键 词:** 同波束 VLBI; 差分相时延; 差分相位抖动; 模型; 掩星观测

**中图分类号:** P228.6      **文献标识码:** A

## 1 引 言

甚长基线干涉测量技术 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 作为深空探测中主要测角手段, 对视线垂直方向上卫星轨道变化进行探测时具有很高的灵敏度<sup>[1]</sup>。同波束 VLBI 方法用射电望远镜的主波束同时接收 2 个或多个卫星发送的信号, 得到相关相位并做差分, 去除了大气、电离层及装置的大部分影响, 可得到更高精度的差分相时延数据, 继而提高 2 个探测器的测定轨精度<sup>[2-8]</sup>。同波束 VLBI 差分相时延虽然有随机误差极小这有利的一面, 但其解算条件较严格。比如, 利用 SELENE 的 Rstar 和 Vstar 的 2212、2218、2287 MHz 的 3 个点频信号, 如果以 68.3% 的概率无模糊度地解算差分相时延, 差分相位抖动  $rms$  须小于  $4.3^{\circ}$ <sup>[2-8]</sup>。虽然差分相时延去除了中性大气和电离层的大部分影响, 但在两个卫星的角距离较大时仍需仔细研究, 原因有两点: (1) 两条传播路径上中性大气和电离层时延不一致; (2) 热

---

收稿日期: 2014-05-12; 修回日期: 2014-08-07

资助项目: 国家自然科学基金 (11273049); 上海市导航与定位重点实验室; 中国科学院射电天文重点实验室; 行星科学重点实验室

通讯作者: 唐明乐, tml@shao.ac.cn

噪声等引起的差分相位抖动可能会导致解算不成功。

另一方面, 同波束 VLBI 也是研究行星大气电离层的重要方法。比如, 在我国火星探测任务中, 将同时发射火星车和着陆器。火星车发射电波的相位抖动由火星和地球的中性大气及电离层共同引起, 而当轨道器飞至火星的中性大气及电离层以上时, 其发射电波的相位抖动只由地球的中性大气和电离层引起。利用同波束观测并做差分, 可较好地去除地球中性大气和电离层的影响, 从而以更高的精度研究火星的中性大气及电离层的特性。但是, 火星的中性大气及电离层的密度不及地球的 1%<sup>[9]</sup>, 即使是利用同波束观测, 也须仔细研究地球中性大气和电离层引起的差分相位抖动与角距离的关系, 以更好地评估火星中性和大气电离层掩星观测的精度。

综合上述原因, 本文基于 SELENE 两颗小卫星 Rstar 和 Vstar 的 4 个测站长达 1 年的同波束 VLBI 观测数据, 采用统计方法进行计算, 首次得到差分相位抖动与其对应的角距离的关系模型。

## 2 SELENE 的同波束 VLBI 观测及差分相位抖动

SELENE 由绕 100 km 极轨圆轨道飞行的三轴稳定主卫星和绕椭圆轨道飞行的 2 颗自旋稳定小卫星 Rstar 和 Vstar 组成。Rstar 的近月点和远月点为 100 和 2400 km, Vstar 的分别为 100 和 800 km。Rstar 和 Vstar 上的交叉偶极子天线分别发出  $f_1 = 2212$  MHz、 $f_2 = 2218$  MHz、 $f_3 = 2287$  MHz 的 3 个正弦波。如图 1 所示, Rstar 和 Vstar 的 VLBI 观测站有日本国立天文台 VERA 网的 4 个测站, 即水泽 (MZ)、入来 (IR)、小笠原 (OG) 和石垣岛 (IS)。IR-OG、IS-IR、IS-MZ、IS-OG、MZ-IR 和 MZ-OG 6 基线的长度分别为 1251、1019、2270、1827、1267 和 1337 km。VERA 网对 Rstar 和 Vstar 进行了 15.4 个月 (2007 年 11 月至 2009 年 2 月) 近 1500 h 的同波束 VLBI 观测<sup>[2]</sup>。由于 4 个国际测站上海、乌鲁木齐、Hobart、Wettzell 只参加了 SELENE 的部分观测, 我们主要利用了 VERA 的 4 个测站的同波束 VLBI 观测数据开展本研究。

2008 年, 利用 VERA 的 4 个测站对 Rstar 和 Vstar 共进行了 132 d 的观测, 得到了  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  共 3 组相关相位数据。3 组观测频率相近的差分相位抖动类似, 故我们选择  $f_1$  频点共 6 条基线上的相关相位进行处理。针对每一条基线, 利用程序逐一读取每一天 Rstar 和 Vstar 的相关相位数据文件, 提取出所需要的相关相位数据及其对应的时间。每个文件的大小不同, 范围为 100~1800 s, 每秒一个数据。在时间对齐的条件下, 对 Rstar 与 Vstar 的相关相位进行差分, 对得到的差分相位再做高阶多项式拟合。多项式拟合时, 我们采取分情况处理的方法: 针对不同大小文件采取不同阶数的多项式拟合, 数据点 1500~1800 s 的用 10 阶多项式、1200~1500 s 的用 9 阶、900~1200 s 的用 8 阶、600~900 s 的用 7 阶、低于 600 s 的用 6 阶。拟合后得到的残差即差分相位抖动去除了轨道误差的影响, 主要由地球中性大气、电离层和观测装置的热噪声引起。为了降低热噪声的影响, 又做了 15 s 和 60 s 积分的滑动平均处理。最后将 132 d 滑动平均处理后的差分相位抖动按时间顺序连接在一起。

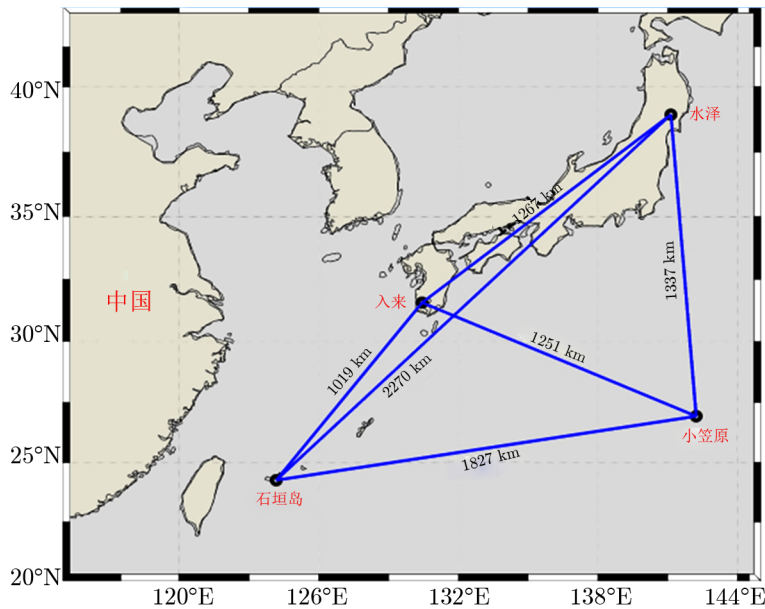


图 1 VERA 网的 4 个测站：水泽、入来、小笠原和石垣岛及基线长度

图 2 给出了 2008 年 IR—OG、IS—IR、IS—MZ、IS—OG、MZ—IR 和 MZ—OG 共 6 条基线的 Rstar 和 Vstar 间的差分相位抖动，积分时间为 60 s。从图中可以看出，差分相位抖动在 2 月和 3 月较小，在 5 月和 6 月较大。图 3 给出在 6 月 16 日 6 条基线上同一时间段、角距离范围为  $0.06^{\circ}\sim 0.07^{\circ}$  的差分相位抖动，可以清楚地看出其幅度变化范围在  $\pm 2^{\circ}$  之内。图 4 给出在 5 月 28 日 6 基线上的同一时间段角距离范围为  $0.38^{\circ}\sim 0.47^{\circ}$  的差分相位抖动，可以清楚地看出其幅度变化范围在  $\pm 8^{\circ}$  之内。由此可知，角距离越大，差分相位抖动的幅度也越大。

### 3 差分相位抖动与角距离的关系模型

由于天线波束宽度的限制，测量两个卫星间的角距离时，SELENE 同波束 VLBI 方法有一定的要求。对于 VERA 的 4 个 20 m 射电望远镜来说，其 S 波段的主波束宽度约  $0.5^{\circ}$ 。差分相位抖动数据为每秒一个点，而角距离数据为每分钟一个点。由于 1 min 内角距离变化幅度很小，故可以利用内插方法得到每 1 s 的角距离数据。最后以时间为参考，得到每个时刻差分相位抖动和对应的角距离的序列数据。

在得到 6 条基线的差分相位抖动与角距离数据后，对每一条基线的数据再做以下处理：在  $0^{\circ}\sim 0.5^{\circ}$  角距离范围内，以 3 倍  $\delta$  标准差为阈值去除差分相位抖动的野值点后，以  $0.01^{\circ}$  的角距离间隔求得在此间隔内的差分相位抖动的所有点的均方根值，最后得到一组 50 个角距离点的差分相位抖动的均方根值。然后利用直线拟合方法，统计得出差分相位抖动  $\phi$  与角

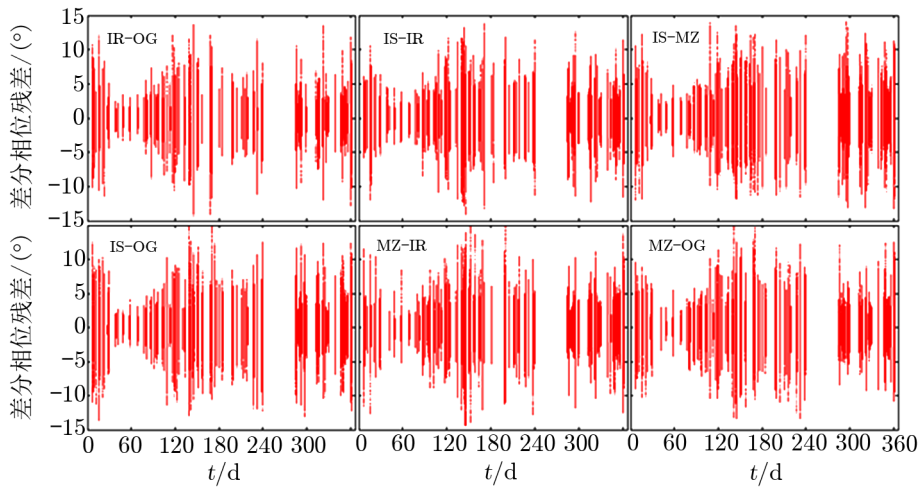
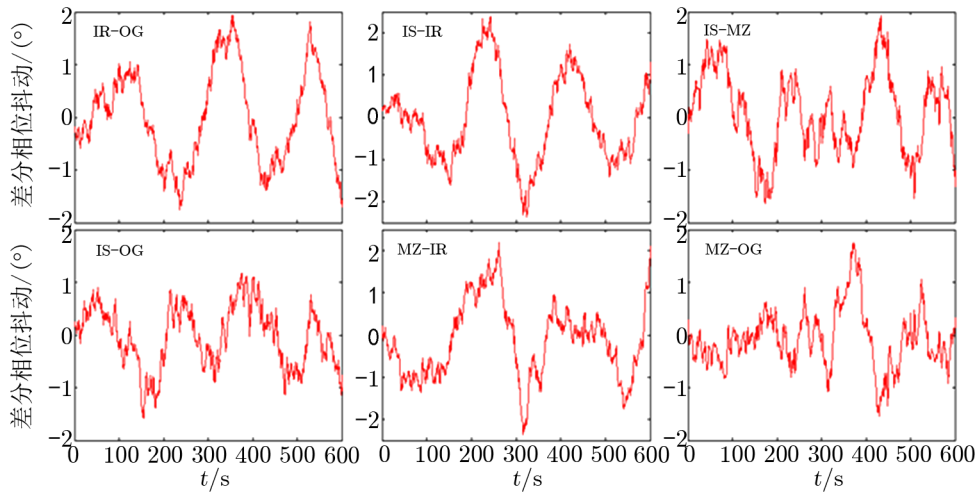


图 2 2008 年 6 条基线的差分相位抖动, 积分时间 60 s

图 3 6 月 16 日 6 条基线同一时间段角距离范围为  $0.06^\circ \sim 0.07^\circ$  的差分相位抖动, 积分时间 60 s

距离  $\theta$  的关系模型,

$$\phi = a\theta + b \quad (1)$$

式中  $a$  为各基线直线拟合的斜率, 反映了差分相位抖动随角距离的线性变化;  $b$  为各基线的截距, 反映了观测装置中热噪声引起的差分相位随机变化。

图 5 给出了 6 条基线的差分相位抖动的均方根随角距离的变化情况, 可以看到, 随着角距离的增大, 差分相位抖动也变大; 还给出了差分相位抖动与对应的角距离的直线拟合结果。表 1 给出了 6 条基线的差分相位抖动与角距离直线拟合的斜率和截距及其平均值, 斜率的平均值为 2.69, 截距的平均值为  $1.09^\circ$ 。

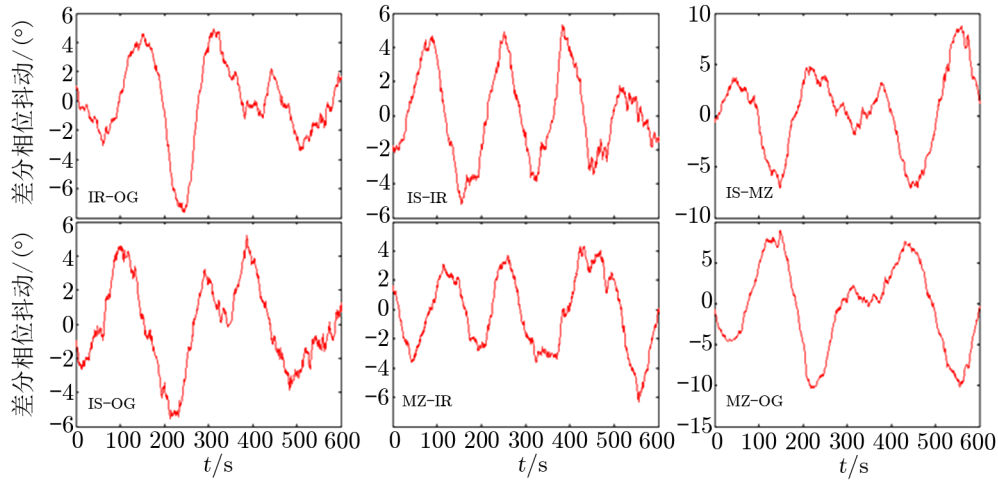


图 4 5 月 28 日 6 条基线同一时间段角距离范围为  $0.38^\circ \sim 0.47^\circ$  的差分相位抖动, 积分时间 60 s

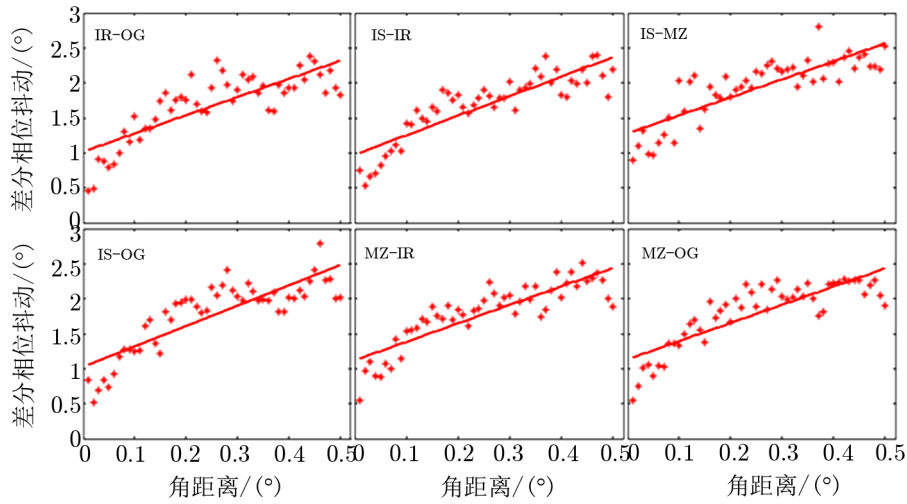


图 5 6 条基线的差分相位抖动与对应角距离的关系及其直线拟合, 积分时间 60 s

表 1 6 条基线的差分相位抖动与角距离直线拟合的斜率和截距及其平均值, 积分时间 60 s

基线	斜率 $a$	截距 $b/(^\circ)$
IR-OG	2.61	1.02
IS-IR	2.79	0.97
IS-MZ	2.57	1.28
IS-OG	2.90	1.03
MZ-IR	2.64	1.12
MZ-OG	2.60	1.13
平均值	2.69	1.09

图 6 给出了 15 s 与 60 s 两个不同积分时间下的差分相位抖动及其直线拟合结果。对比两组结果, 我们发现反映地球中性大气和电离层影响的差分相位抖动斜率基本一致; 而主要反映热噪声的截距约相差两倍, 证明我们得到的差分相位抖动与对应角距离的关系模型是合理的。

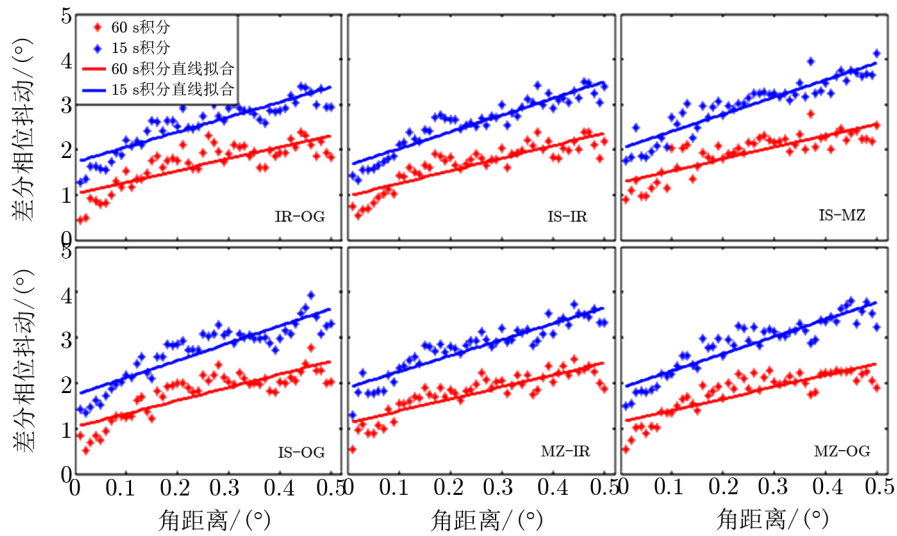


图 6 积分时间 15 s 和 60 s 时, 6 条基线的差分相位抖动与对应角距离的关系及其直线拟合

## 4 结 论

利用 SELENE 两颗小卫星 Rstar 和 Vstar 的 4 个测站长达 1 年的同波束 VLBI 观测数据, 统计得出了差分相位抖动与其对应的角距离的关系模型, 即在积分时间为 60 s 时, 斜率平均值为 2.69, 截距平均值为  $1.09^\circ$  的线性方程。在积分时间为 15 s 时, 反映地球中性大气及电离层影响的斜率与积分时间 60 s 相比几乎不变, 而反映热噪声的截距约扩大了 2 倍, 证明了该模型的合理性。

在火星等行星中性大气和电离层掩星观测研究中, 可以利用本模型评估并提高其观测精度。比如, 热噪声引起的差分相位抖动可通过提高积分时间予以降低, 而地球中性大气和电离层引起的与角距离对应的差分相位抖动可利用 2.69 的模型予以扣除。因此, 本文得到的差分相位抖动与其对应的角距离关系的统计模型, 对行星中性大气和电离层掩星观测研究具有重要的参考意义和实用价值。

## 参考文献:

- [1] 钱志翰, 邬林达. 甚长基线射电干涉测量. 北京: 测绘出版社. 1983: 119
- [2] 刘庆会, 陈明, Sander G, 等. 中国科学 G 辑: 物理学力学天文学, 2010, 40: 809
- [3] Liu Q H, et al. Journal of the Geodetic Society of Japan, 2009, 55: 243
- [4] Liu Q H, et al. IEEE Trans., Antenna and Propa., 2007, 55: 1466
- [5] Liu Q H, et al. Advances in Space Research, 2007, 40: 51
- [6] Masanori N, et al. IEEE Trans, 2007, 55: 2056
- [7] Liu Q H, et al. IEEE Trans., 2005, 53: 1519
- [8] 刘庆会, 陈明, 熊蔚明, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2010, 40: 253
- [9] 张素君, 平劲松, 等. 物理, 2009, 38: 722

## A Model for Relation Between Differential Phase Fluctuations of Same-beam VLBI and Separation Angle of Detectors

TANG Ming-le, LIU Qing-hui, HE Qing-bao, ZHENG Xin, WU Ya-jun

*(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)*

**Abstract:** In deep-space exploration with two detectors, using the same-beam VLBI technique can get high precision differential phase delay, thus the accuracy of orbit determination can be much improved. However, the conditions of differential phase delay solution are much strict. Differential phase fluctuations may jeopardize the success of resolving differential phase delay. To make it clear, conduct a statistic work of one year's same-beam VLBI data which are got from two satellites (Rstar and Vstar) in SELENE project. After a series of computing, a model for the relation between differential phase fluctuations  $\phi$  and corresponding separation angles  $\theta$  of two satellites was drawn. The model is described as a linear equation of  $\phi = 2.69\theta + 1.09$ , where, the slope of 2.69 reflects the influence of earth neutral atmosphere and ionosphere, and the intercept of 1.09 deg reflects the effect of thermal noise. This model not only can help to resolve differential phase delay in the same-beam VLBI observation, but also can serve as a reference for the study of planetary atmosphere and ionosphere in occultation observation.

**Key words:** same-beam VLBI; differential phase fluctuations; model; occultation observation