

# 高精度 VLBI 技术在深空探测中的应用

刘庆会, 吴亚军

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:**介绍了适合单探测器测定轨的高精度 VLBI 技术和适合多探测器测定位的同波束 VLBI 技术的研究进展。利用“嫦娥 3 号”着陆器的  $\Delta$ DOR 型 VLBI 观测,得到了误差 0.67 ns 的 VLBI 群时延数据。利用“嫦娥 3 号”着陆器和月球车的同波束 VLBI 观测,得到了随机误差 0.3 ps 的差分相时延数据,以数厘米的灵敏度监测出月球车的移动、转弯等动作,并把月球车的相对定位精度提高至 1 m。针对深空探测,提出了使 VLBI 时延测量精度进一步提高所需要开展的部分研究内容。

**关键词:** 高精度 VLBI; 同波束 VLBI; 深空探测; 嫦娥 3 号

**中图分类号:** P164

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2015)03-0208-05

**DOI:**10.15982/j.issn.2095-7777.2015.03.003

## 0 高精度 VLBI 技术及“嫦娥 3 号”着陆器的 $\Delta$ DOR 型 VLBI 观测

深空探测器的测定位和测定轨,主要有测距、测速和测角三种手段。甚长基线干涉(VLBI)技术为深空探测中主要的测角手段。迄今为止,VLBI 的观测量一般是群时延,它是通过相关相位除以电磁波的带宽得出的。在深空探测中常用的 DOR 信号,其频点间的最大带宽约 40 MHz,可得到随机误差为 0.1 ns 的 VLBI 群时延数据。

VLBI 时延除了随机误差外,系统误差更要去除。为了消除大气(数米)、电离层(数米)和观测装置(十几米至几十米)的影响,需以数分钟的时间间隔交替观测探测器和邻近射电源,即  $\Delta$ DOR 技术。在美国、欧洲等的深空探测任务中, $\Delta$ DOR 技术已和测速测距技术一样成为测定轨的必备手段。在“嫦娥 2 号”卫星中,我国首次进行了  $\Delta$ DOR 型 VLBI 技术试验。在“嫦娥 3 号”中,上海天文台成功把  $\Delta$ DOR 型 VLBI 技术应用于着陆器在奔月和环月段的实时精密测定轨以及着陆器落月位置的精密测量。

“嫦娥 3 号”着陆器在 2013 年 12 月的奔月段、环月段和落月初期,发射两组 DOR 信号用于 VLBI 测定轨。我们对“嫦娥 3 号”和邻近射电源进行 5 min 左右的交替观测,并对相关相位进行差分从

而除去了大气、电离层及装置内部时延的大部分影响。两组 DOR 信号以 X 频段的载波频率  $f_c$  为中心,分别调制  $\pm 65$  kHz 的遥测信号、 $\pm 500$  kHz 的测距信号、 $\pm 3.8$  MHz 和  $\pm 19.2$  MHz 的 DOR 信号。在“嫦娥 3 号”奔月段、环月段和落月初期的 VLBI 观测中,利用带宽 2 MHz 的 4 个通道分别记录  $f_c$ 、 $(f_c - 19.2)$  MHz、 $(f_c + 3.8)$  MHz、 $(f_c + 19.2)$  MHz 的信号,并利用带宽综合方法求出 VLBI 群时延。图 1 为北京 50 m、昆明 40 m、乌鲁木齐 25 m、上海天马 65 m 测站在 2013 年 12 月 9 日接收记录的“嫦娥 3 号”DOR 信号主载波  $f_c$ 、遥测信号和测距信号。利用主载波和噪声的强度,计算得到的北京、昆明、乌鲁木齐、天马测站的主载波信号的信噪比分别为 18.6、19.7、10.8 及 27.0 dB,可明显看出天马站接收信号的信噪比远远大于其他测站,说明了天马测站强大的接收能力。

在“嫦娥 2 号”中也开展了  $\Delta$ DOR 型 VLBI 试验观测。“嫦娥 3 号”和“嫦娥 2 号”的 DOR 信号本身的强度、带宽以及 VLBI 数据处理方法都类似。但在“嫦娥 2 号”中,上海站利用了上海 25 m 射电望远镜且是 1 bit 采样;而在“嫦娥 3 号”中,则利用了 65 m 天马望远镜且是 2 bit 采样。图 2 给出了“嫦娥 2 号”和“嫦娥 3 号”定轨后的 VLBI 时延残差,它是利用 6 条基线的残差的均方根计算得出的。“嫦娥 2 号”有 18 d 的数据,由图 2(a)可知,除了第 1 次

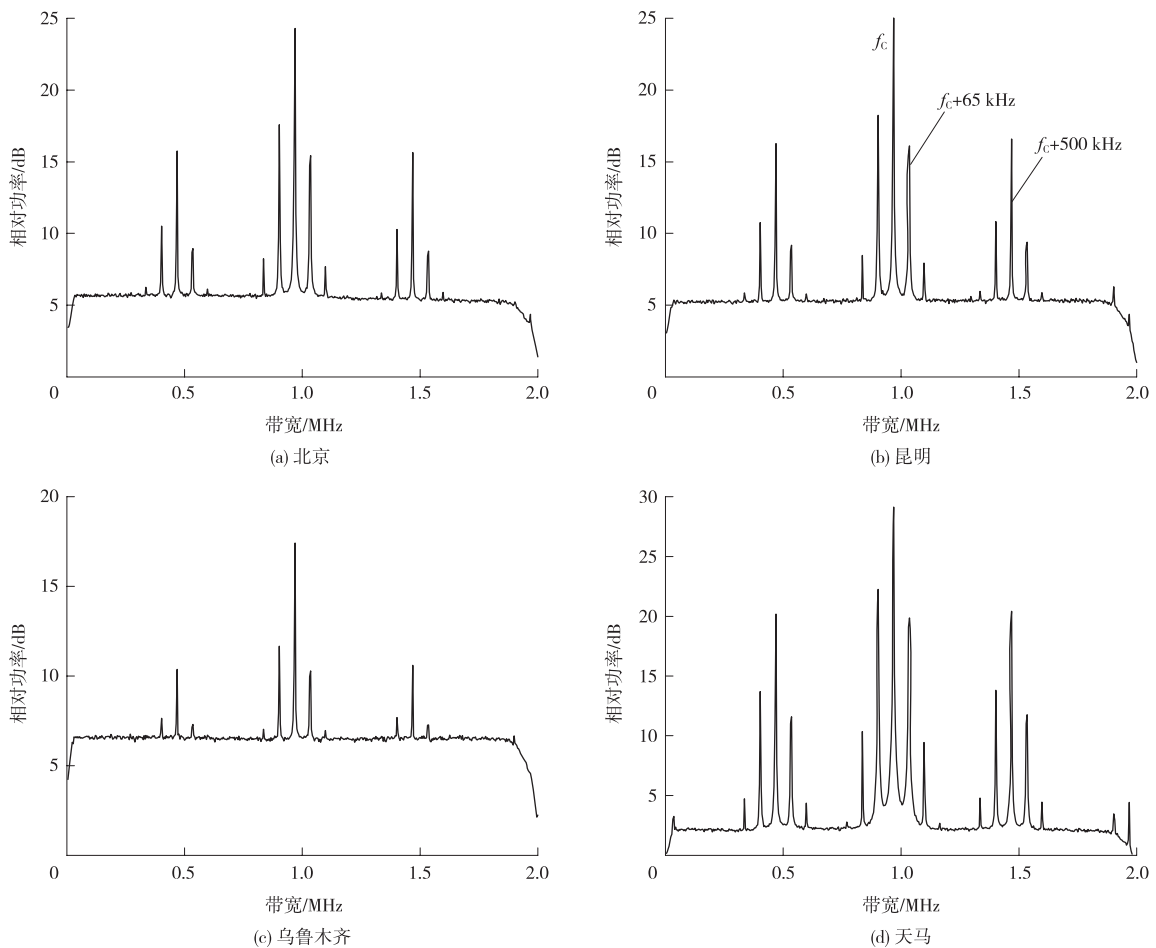


图 1 北京、昆明、乌鲁木齐、天马测站接收的“嫦娥 3 号”DOR 信号主载波、遥测信号和测距信号

Fig. 1 Spectra of CE-3 main carrier, telemetry and ranging signals received by using Beijing, Kunming, Urumqi, Shanghai Tianma stations

和第 2 次奔月段的 VLBI 时延残差较小外,其他 16 次的时延残差在 1~3 ns 之间,18 次观测的 VLBI 时延残差的平均值为 1.77 ns。“嫦娥 3 号”共有 12 d 的数据,奔月段 4 d、环月段 8 d。由图 2(b)可知,12 d 的 VLBI 时延残差在 0.4~1.0 ns 之间,其平均值为 0.67 ns,为“嫦娥 2 号”VLBI 时延残差的 37%。利用 VLBI 和测速测距数据,“嫦娥 3 号”地月转移段定轨误差为数百米,环月段的定轨误差为 20~30 m。同时,利用 VLBI 数据和统计定位方法确定了着陆器在月面的位置,定位精度约 50 m<sup>[1]</sup>。

## 1 同波束 VLBI 技术及“嫦娥 3 号”月球车相对定位和动作监测

同波束 VLBI 技术即利用射电望远镜的主波束对角距离很近的两个或多个探测器同时进行观测,通过在两个探测器间对 VLBI 时延进行差分,较彻

底地除去大气、电离层及观测装置的影响,从而得到准确反映两个探测器相对位置的差分时延观测量。在阿波罗工程中,利用同波束 VLBI 技术对月球车和着陆器进行了相对定位,其定位精度达到 25 m<sup>[2]</sup>。在日本探月计划 SELENE 中,利用两个小卫星 Rstar 和 Vstar 的多频点同波束 VLBI 数据和测速测距数据,把 Rstar 和 Vstar 的定轨精度提高至 10 m 左右<sup>[3]</sup>。

针对“嫦娥 3 号”月球车的带宽 4 kHz 的遥测信号或带宽 4 MHz/8 MHz 的数传信号,以及着陆器带宽 5 MHz 的数传信号,提出了利用同波束 VLBI 技术解算差分相时延并进行月球车相对定位的方法<sup>[4]</sup>。在“嫦娥 3 号”中,利用着陆器和月球车的同波束 VLBI 数据,把月球车的相对定位精度提高至 1 m,并以数厘米的灵敏度监测出月球车的移动、转弯等动作<sup>[5]</sup>。

图 3 给出了着陆器拍摄的月球车转弯时的照片

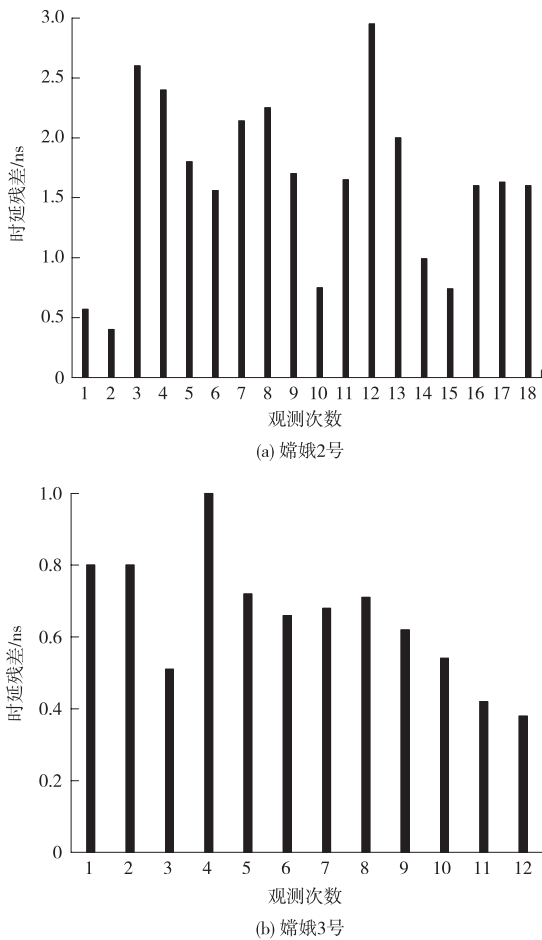


图2 “嫦娥2号”和“嫦娥3号”定轨后的 $\Delta$ DOR型VLBI时延残差

Fig. 2 VLBI residual delays after orbit determination of CE-2 and CE-3

及转弯时引起的6条基线上的差分相时延的变化。差分相时延反映的是月球车的数传天线或遥测天线的相位中心与着陆器的数传天线相位中心的位置差。如图3所示,2013年12月23日17.3UT至17.5UT的时间段内,月球车移动了两次(a-b段和c-d段),每次移动了数米距离。数米的移动在每条基线上引起的差分相时延的变化为数十皮秒。在e-f段,月球车进行了转弯,可以清晰地看出差分相时延的变化也是相应的弯曲,即利用差分相时延可清晰地监测月球车的移动、转弯等动作。进一步的分析表明,差分相时延的随机误差约为0.3 ps (0.1 mm),以中国VLBI网的较短的南北方向的2160 km的北京-昆明基线、观测仰角为 $30^\circ$ 为例,利用差分相时延对月球车动作的监测灵敏度的估算结果为 $380\ 000/2\ 160/\sin(30^\circ) \times 0.1\ \text{mm} = 3.5\ \text{cm}$ ,即能够以数厘米的灵敏度监测月球车的动作。实际上,在2013年12月14日,月球车从着陆

器分离时共移动了4次,分别为140、10、5及5 cm。在月球车移动10 cm时,清晰地监测出差分相时延的变化,而移动5 cm时则未能清晰地监测出,表明在“嫦娥3号”中,利用差分相时延对月球车动作的监测灵敏度在5~10 cm之间。

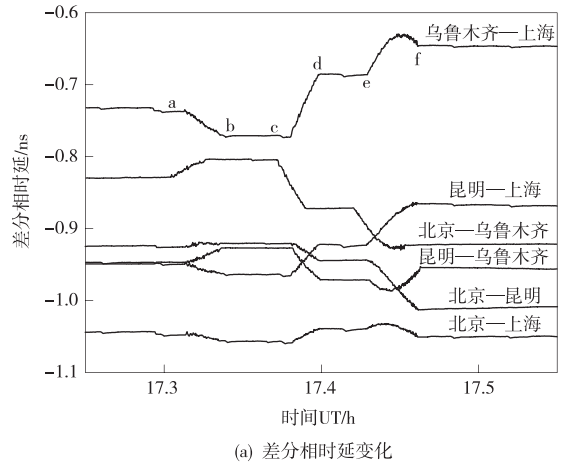


图3 转弯时引起的6条基线上的差分相时延的变化及着陆器拍摄的月球车转弯时的照片

Fig. 3 Change of differential phase delay of CE-3 rover and the pictures of lander during the rover movement and turning

着陆器与处于停泊点的月球车在月面不动,其相对于地球的运动由月球相对于地球的运动以及月球自身的转动产生。利用这一条件,可以利用运动学统计定位法对月球车进行定位。其基本方法为利用一段时间内(2~3 h)的同波束VLBI差分相时延数据以及月球平动和转动的相关信息,将差分相时延数据进行综合平差处理,最后获得月球车和着陆器在月固系中的位置<sup>[1]</sup>。在定位计算时考虑到着陆器不动且位置精确已知,只解算月球车相对于着陆器的位置。同时考虑到着陆器附近地势平坦,且月球车距离着陆器很近,可根据着陆器数传天线和月球车数传或遥测天线的相位中心的高度差固定高程,只解算平面二维方向的月球车位置。利用月球车遥

测信号和着陆器数传信号得到的连续 2~3 h 的同波束 VLBI 差分相时延数据,计算得到的月球车在 A、B、C、D、E、S1 停泊点相对于着陆器的位置如表 1 所示。

月球车的数传天线和遥测天线的相位中心距离的设计值约 1.16 m,通过比较月球车两天线位置差的解算结果和设计值,可以评价月球车的相对定位精度。考虑到月球车数传天线和遥测天线的相位中心约 0.18 m 高程差后,利用同波束 VLBI 数据解算的两天线的距离差约为 1.03 m,即月球车的数传天线和遥测天线相位中心解算的距离与设计值的差异为 0.13 m。结果表明利用同波束 VLBI 差分相时延得到的月球车的相对定位精度约为 1 m。

同波束 VLBI 技术在火星车和轨道器的精密测定轨及火星大气及电离层的掩星观测研究、金星轨道器和浮空器精密测定轨及金星大气动力学观测研究中能发挥更为重要的作用。

表 1 利用同波束 VLBI 差分相时延解算得到的月球车在停泊点 A、B、C、D、E、S1 的相对位置

Table 1 Relative positioning result between the lunar rover and lander at the points of A, B, C, D, E, S1

m						
方向	A	B	C	D	E	S1
北	11.14	5.79	-4.79	-8.83	-17.40	-25.58
东	1.35	7.62	8.77	0.42	-0.37	-0.45

## 2 深空探测高精度 VLBI 技术今后的研究

在深空探测器的测定轨中,VLBI 技术将发挥更大的作用。比如,在火星探测中的地火转移段、火星捕获段和环火飞行段的测定轨中均需要利用 VLBI 技术。地火转移段和火星捕获段与环火段相比测定轨难度大得多。探测器进入火星捕获段时,地火距离一般为 2.5 亿 km,与月球探测器捕获时的 38 万 km 相比,距离增加了 658 倍。要达到月球探测器捕获时同等的 VLBI 测定轨能力,VLBI 时延测量精度与探月时相比需提高数百倍。

为了进一步提高 VLBI 时延测量精度,下述研究都是必需的。如:

1) VLBI 时延测量误差的分解及改进措施的研究:需要对引起 VLBI 测量误差的因素如射电源校正误差、台站位置误差、观测装置相位变化引起的误差、地球定向误差、大气和等离子体时延改正误差、

热噪声引起的随机误差等进行详细分析和分解,并针对各个误差因素通过利用新设备、新技术、新方法予以改进。

2) 大气和等离子体时延改正方法的研究:大气时延是目前最主要的 VLBI 时延测量误差来源。可综合利用水汽辐射计、GPS 装置、气象数据等建立适应的大气改正方法予以改进。太阳等离子体和地球电离层时延的影响,特别是在探测器与太阳的夹角较小时其影响更大,需要研究更高精度的改正方法。

3) 弱信号的高精度 VLBI 处理技术的研究:深空探测器距离遥远,接收到的信号微弱,可通过补偿多普勒频移及提高相关处理时的谱分辨率等措施予以解决。

4)  $\Delta$ DOR 型 VLBI 群时延和相时延解算方法的研究:VLBI 观测量现在一般为群时延,群时延的测量误差与接收信号带宽成反比。深空探测中由于带宽的限制,群时延随机误差大。而相时延的测量误差与接收信号频率成反比,故相时延的随机测量误差非常小,但存在整周模糊度。可在精确解算群时延的基础上,利用群时延数据对相时延的系统差进行修正,从而在一个连续的观测弧段内得到含微小系统误差的相时延观测数据。

5) 同波束 VLBI 技术的应用:火星探测中有轨道器和火星车,金星探测中有轨道器和浮空器。可利用同波束 VLBI 技术同时观测两个探测器,得到两探测器间的高精度差分相时延,进而提高两个探测器的测定轨和测定位精度。

6) 深空探测中提高 VLBI 测量精度的最有效方法还是利用大口径射电望远镜提高整个 VLBI 网的观测灵敏度。

## 3 结束语

综上所述,VLBI 技术在深空探测器的测定轨和测定位中必不可少。高精度 VLBI 技术和新型 VLBI 技术的研究需持续不断地开展,高水平研究队伍的保持需要国家和同仁的持续支持。

### 参 考 文 献

- [1] 黄勇,昌胜骐,李培佳,等.“嫦娥 3 号”月球探测器的轨道确定和月面定位[J].科学通报,2014,59:2268-2277. [Huang Y, Chang S Q, Li P J, et al. Orbit determination of Chang'E-3 and positioning of the lander and the rover[J]. Chin Sci Bull, 2014, 59: 2268-2277.]

- [ 2 ] Counselman C C, Hinteregger H F, Shapiro I I. Astronomical applications of differential interferometry[J]. Science, 1972(178):607 - 608.
- [ 3 ] Liu Q, Kikuchi F, Matsumoto K, et al. Same-beam VLBI observations of SELENE for improving lunar gravity field model[J]. Radio Science, 2010, 45 ( 2 ): 1 - 16. doi: 10.1029/2009RS004203.
- [ 4 ] Liu Q, Chen M, Xiong W, et al. Relative position determination of a lunar rover by using high-accuracy multi-frequency same-beam VLBI[J]. Sci China Ser G, 2010, 53(3):1 - 8.
- [ 5 ] 郑鑫,刘庆会,吴亚军,等. 基于同波束 VLBI 差分相时延的“玉兔”月球车动作监视分析[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2014(44):872 - 878. [Zheng X, Liu Q H, Wu Y J, et al. Motion monitoring and analysis of Chang'E-3 rover based on same-beam VLBI differential phase delay[J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014(44):872 - 878. ]
- 作者简介:  
刘庆会(1966—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向:VLBI 技术、深空探测测定轨、射电天文技术与方法。  
通信地址:上海市南丹路 80 号(200030)  
电话:(021)64385502  
E-mail:liuqh@shao. ac. cn  
吴亚军(1984—),男,工程师,博士研究生,主要研究方向:VLBI 技术、射电天文技术与方法。  
通信地址:上海市南丹路 80 号(200030)  
E-mail:wuyajun@shao. ac. cn

## Application of High Precision VLBI Technology in Deep Space Exploration

LIU Qinghui, WU Yajun

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

**Abstract:** This paper reports the research progress of high precision VLBI technology used for single-spacecraft orbit determination and same beam VLBI technique used for multi-spacecraft position determination. The  $\Delta$ DOR VLBI residual delay after determining orbit of Chang'e-3 Lander is 0.67 ns, and the error of differential phase delay between the Lander and Yutu rover of Chang'e-3 is down to 0.3 ps. By using the differential phase delay data, the rover motions such as movement and turning as small as several centimeters are monitored, and the relative position between the rover and the Lander is precisely measured with an accuracy of 1 meter. For deep space exploration, further research works are put forward to improve the VLBI delay measurement accuracy.

**Key words:** high precision VLBI; same beam VLBI; deep space exploration; Chang'e-3

[责任编辑:宋宏]