

探月卫星同波束干涉测量技术应用研究

韩松涛^{*①②} 陈明^① 李翠兰^① 路伟涛^①

^①(北京航天飞行控制中心航天飞行动力学技术重点实验室 北京 100094)

^②(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘要: 探月工程嫦娥4号中继星任务同时搭载月球轨道微卫星, 受地面测控资源分配限制, 微卫星的轨道测量由地基S/X频段统一测控(TT&C)系统天线(USB)保障。该文通过分析地月转移轨道段中继星、微卫星相对于跟踪测站的几何构型, 依托深空干涉测量系统设计实现对微卫星、中继星的同波束干涉测量(SBI)跟踪; 发挥中继星测控资源丰富、轨道精度高的优势, 获取了微卫星优于1 ns的测角观测量; 并应用于微卫星短弧定轨, 统计分析表明定轨精度由2 km提升至优于1 km、预报精度由6 km提升至2 km, 为微卫星轨道机动后的快速高精度轨道确定与预报提供了有力支撑。

关键词: 同波束干涉测量; 短弧定轨; 深空测控干涉测量系统; 嫦娥4号

中图分类号: TN961

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)08-1960-06

DOI: 10.11999/JEIT180914

Research on Application of Same-beam Interferometry in China Lunar Exploration

HAN Songtao^{①②} CHEN Ming^① LI Cuilan^① LU Weitao^①

^①(National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics,
Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

^②(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Because of restricted earth-based tracking network, Tracking, Telemetry and Command (TT&C) for lunar orbit micro-satellite is depended on Unified S/X Band (USB) antennas in China Chang'E-4 lunar exploration. Based on analysis of the geometry between relay satellite, micro-satellite and earth-based antennas during earth-moon transfer orbit, an applicable method to acquire delay observable through Same-Beam Interferometry (SBI) tracking by China deep space network is discussed. Benefited from more kinds of tracking resources and high accuracy orbit of relay satellite, delay observable for angular position measurement of micro-satellite in the order of 1 ns is obtained, which improves the micro-satellite orbit determination accuracy from 2 km to less than 1 km and improves orbit prediction accuracy from 6 km to 2 km. SBI tracking plays an important role in short arc orbit determination of micro-satellite.

Key words: Same beam interferometry; Short-arc orbit determination; Deep space Tracking Telemetry and Command Interferometric system; Chang'E-4

1 引言

甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)技术是获取深空探测器高精度角位置信息的重要手段^[1], 特别是采用射电源短时交替差分测量模式(Delta Differential One way

Ranging, Δ DOR)极大提升了深空探测器的测量精度^[2], 已成功应用于国际上的深空探测任务中^[3-5]。由中国科学院上海天文台主导的VLBI射电天文观测网(China VLBI Network, CVN)在我国探月工程任务中也得到了成功应用, 有力支撑了月球探测器高精度轨道测定^[6,7]。同波束干涉测量(Same Beam Interferometry, SBI)是甚长基线干涉测量的一种重要应用形式, 当两个航天器角位置非常接近时, 它们可以在地面站天线的同一个波束内被观测^[8-11]。美国国家航空航天局(National Administration of Space Agency, NASA)早期将同波束干涉测量技术

收稿日期: 2018-09-14; 改回日期: 2019-01-28; 网络出版: 2019-02-18

*通信作者: 韩松涛 justdoit_doing@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(11603001, 11833001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (11603001, 11833001)

应用在对Magellan和Pioneer 12两个航天器的观测,获得航天器在天平面的相对位置精度(经5 min平均)达到40~100 m^[12];通过特殊探测器多下行频点,还可以获取目标间绝对相位时延,中国科学院上海天文台刘庆会对日本月球卫星月之女神(SELENE)的两个自旋小卫星Rstar和Vstar开展同波束观测,获取ps量级的差分相位时延,在国内首次实现了月球探测器之间的超高精度干涉测量^[13,14]。

嫦娥4号中继星任务首次实现探测器绕地月拉格朗日L2点运行,为后续着巡组合体月球背面软着陆提供测控通信中继服务;同时中继星任务搭载微卫星在月球轨道开展有关科学研究工作^[15]。受地面测控资源分配制约, CVN网干涉测量资源以及深空测控资源主要用于中继星的跟踪,微卫星测定轨主要依靠统一载波测控体制获取的测距、测速观测量。针对嫦娥4号中继星任务中,微卫星变轨后快速轨道确定和预报需求,本文依托深空测控干涉测量系统,在稀疏标校射电源缺失无效情况下,在地月转移轨道弧段设计实现了对中继星、微卫星的同波束干涉测量跟踪,并应用于微卫星变轨后的快速轨道确定,轨道确定及预报精度改进2~3倍,为微卫星轨道机动后快速高精度轨道确定与预报提供了有力支持。本文第2节简要介绍了同波束干涉测量的基本原理;第3节讨论了基于深空干涉测量系统开展的数据获取及数据处理情况;第4节对比分析短弧定轨的精度改进情况;最后总结展望本文工作。

2 同波束干涉测量基本原理^[16,17]

当两个航天器角距较小时,可以同时构成基线的两测站天线的同一波束内被观测,如图1所示。

依据干涉测量技术原理,原始数据经相关处理分析获取的信号时延观测量可表征为

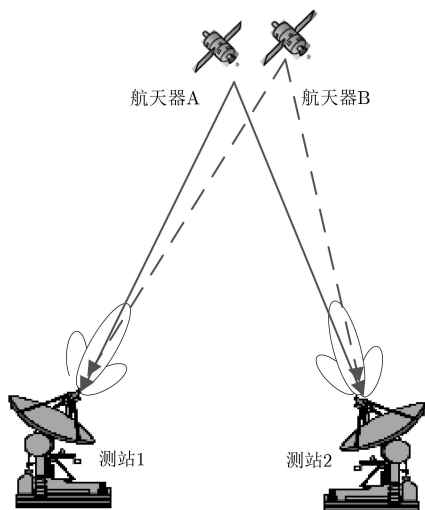


图1 SBI测量原理示意图

$$\begin{aligned}\tau_A &= \tau_{gA} + \Delta\tau_A \\ &= \tau_{gA} + \tau_{cA} + \tau_{aA} + \tau_{pA}\end{aligned}\quad (1)$$

其中 τ_A 表示相关处理得到的时延观测量, τ_{gA} 表示几何时延值, $\Delta\tau_A$ 表示观测量误差之和, τ_{cA} 表示测站钟差, τ_{aA} 表示传播介质引入的时延误差, τ_{pA} 表示链路时延,下标A表征目标,两目标分别用A,B表示。

对同波束干涉测量而言,两个目标的信号被天线同一波束同时接收,原理上测站钟差对两目标的影响一致;传播介质时延中的中性大气部分对两目标的影响一致,电离层对两目标的时延影响在目标信号频率处于同频段的情况下可视为一致;链路时延中的模拟链路部分时延一致,数字链路部分时延在两目标信号在同一通道采集记录的情况下时延一致,对于两目标信号在不同通道采集记录的情况受系统多通道时延一致性的影响。对深空测控干涉测量系统而言,依据系统设计指标及实测评估情况^[18],可视为链路时延对两目标的影响一致。满足

$$\left. \begin{aligned}\tau_{cA} &= \tau_{cB} \\ \tau_{aA} &= \tau_{aB} \\ \tau_{pA} &= \tau_{pB}\end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由此

$$\tau_A - \tau_{gA} = \tau_B - \tau_{gB} \quad (3)$$

其中, τ_A, τ_B 通过高精度相关处理获取,由式(3),一方面可以获取两个目标的高精度相对几何时延,另一方面当某一目标的轨道精度较高,即几何时延精度较高,可以实现对另一目标几何时延的标校。

3 嫦娥4号中继星、微卫星同波束干涉测量

3.1 同波束观测分析

受共视弧段影响,嫦娥4号中继星任务中的深空干涉测量主要依托佳木斯66 m以及喀什35 m深空天线进行。图2分别显示了微卫星某次轨道机动弧段,佳木斯、喀什深空站观测中继星、微卫星的视角情况,弧段内两目标角距分别约0.23°~0.26°(佳木斯深空站),0.26°~0.33°(喀什深空站)。

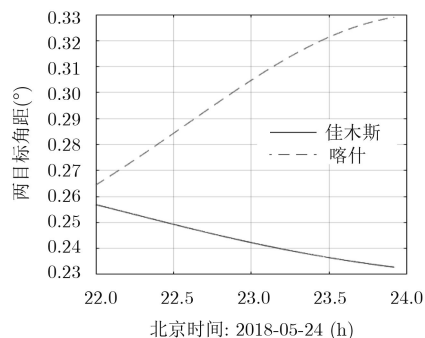


图2 跟踪弧段内两目标角距

对于抛物面天线,波束宽度是指主瓣功率最大值下降3 dB时的夹角,通常用式(4)表征^[19]

$$\theta = \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

其中, λ 为信号波长, 单位为m, D 为天线口径, 单位为m, 夹角 θ 单位为rad。

分别代入深空站天线参数和信号波长, 可得佳木斯、喀什深空站的理论波束宽度分别为 0.12° , 0.22° , 经比对可知, 双目标理论上未能完全进入天线主波束内, 但工程上两目标信号能够被天线接收(会明显损失信噪比)。图3显示了喀什深空站接收到信号的信噪比, 目标信号均落于各通道中心频点处, 可以明显区分微卫星信号由于未能进入天线主瓣波束造成的能量损失。

依据星上干涉测量信标设计状态, 中继星和微卫星分别搭载S频段转发器, 下行1组DOR侧音与载波相干, 相干比为1/600。依据两目标下行信号的频率分布, 设计多通道采集模式, 单通道采集带宽为2 MHz。

3.2 数据处理分析

以微卫星某次轨道机动后的2 h跟踪弧段为例, 图4显示了应用先验引导模型获取的干涉条纹以及残余时延情况, 其中, 残余时延主要由相关处理引导模型的不精确引起。当前, 深空干涉测量系统配置了GPS共视接收机实现站间时间同步, 链路时延可通过强射电源标校进行先验修正, 因此, 残余时延在一定程度上可反映先验预报星历的精度。

观察微卫星残余时延, 量级上明显大于中继星

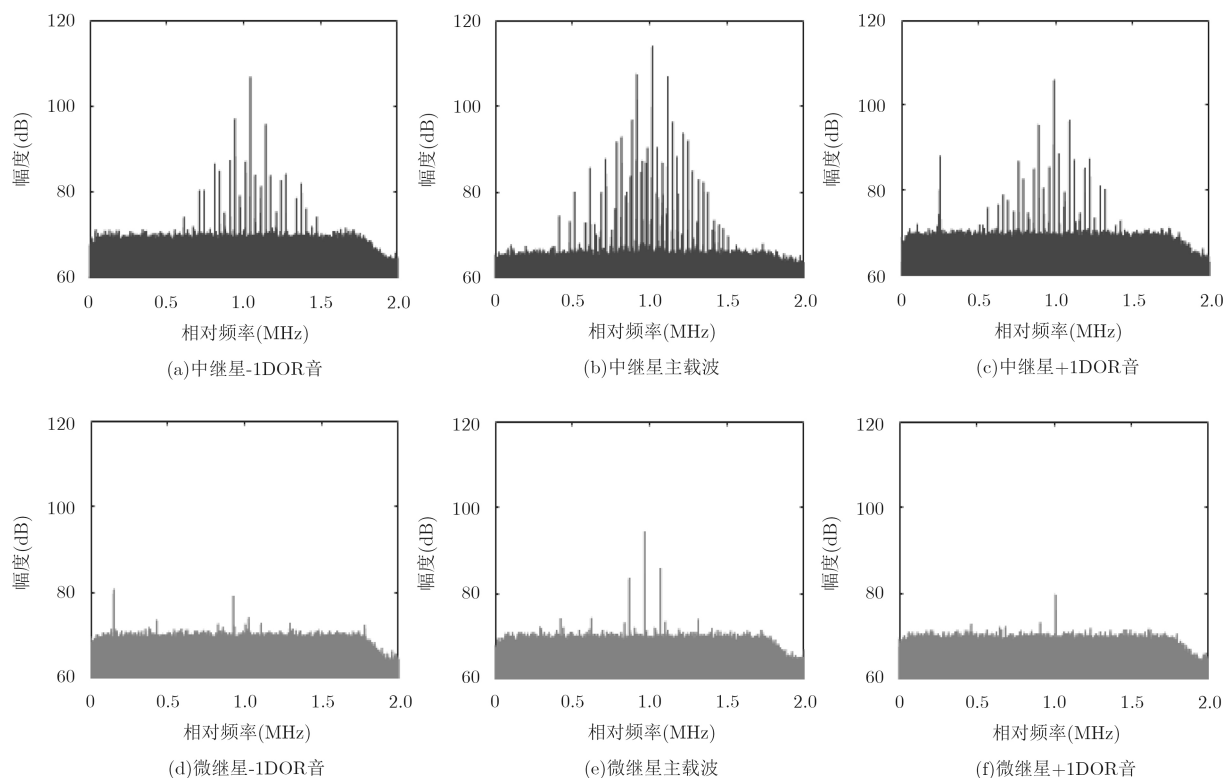


图3 喀什深空站接收两目标信号频谱

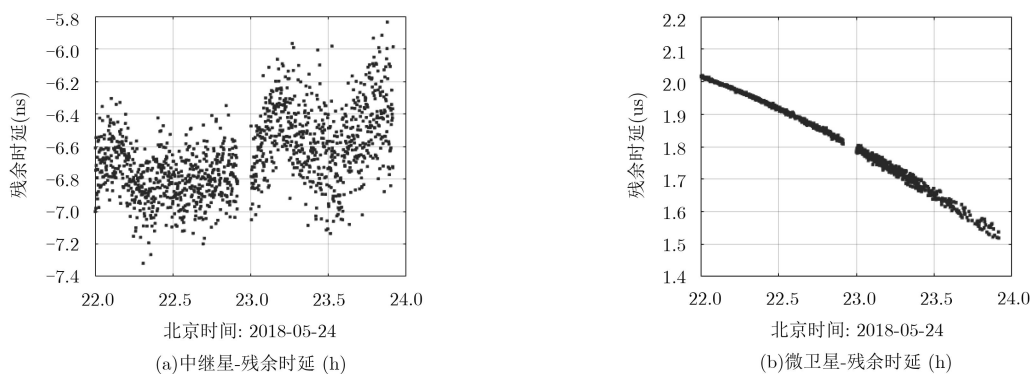


图4 基于先验引导模型的干涉相位及残余时延

残余时延(恶化近3个量级),这也验证了中继星得益于丰富测控资源保障,其定轨、预报精度明显高于微卫星。

地基测控资源的测距、测速(双程、3程)以及VLBI测角观测量,实时传输至北京航天飞行控制中心,定轨分系统利用各类观测量信息准实时获取目标的轨道信息。用于中继星轨道确定的观测量包括测距、测速、CVN网 Δ DOR测量等观测量信息,实现中继星精密轨道的确定后,进而获取中继星几何时延理论值 τ_{gB} ,之后依据式(5)实现微卫星几何时延估计值的获取。

$$\tau_{gA} = \tau_A - (\tau_B - \tau_{gB}) \quad (5)$$

此处, τ_A 、 τ_B 分别表示微卫星、中继星经相关处理得到的时延观测量。

4 短弧定轨精度比对分析

4.1 定轨精度分析

利用同波束干涉测量获取的微卫星几何时延观测量,联合观测期间的USB测速、测距观测量,进行微卫星快速短弧轨道确定。由图5所示,同波束干涉测量信息的定轨残差随机精度在1 ns左右,未出现明显的系统性偏差,噪声水平随时间有变大趋势;图中的间断现象是由于深空干涉测量跟踪采取多SCAN跟踪模式,SCAN间隔为10 min。由图2可知,随着观测弧段的延长,对喀什深空站两目标角距逐步增大,且目标距离随之变远,天线波束接收

性能恶化,导致信噪比损失,定轨残差分布特性符合预期。

4.2 短弧定轨精度比对

为了验证引入同波束干涉测量对短弧定轨精度的改善情况,采用事后模式应用微卫星近36 h的跟踪弧段的USB测量数据,进行微卫星精密轨道确定,此精密轨道水平在200~500 m,作为参考基准。

如图6(a)所示,在 36.5×10^4 km轨道高度单USB短弧(2 h跟踪弧段)定轨精度为2 km,加入同波束干涉测量数据定轨精度得到明显改善,如图6(b)所示,定轨的精度优于1 km,特别是对轨道面法向精度改善尤为明显。如图7(a)所示,从 36.5×10^4 km轨道高度预报到近月点,单USB短弧定轨预报精度约为6 km,如图7(b)所示,加入同波束干涉测量数据定轨预报精度约为2 km。由短弧定轨和预报精

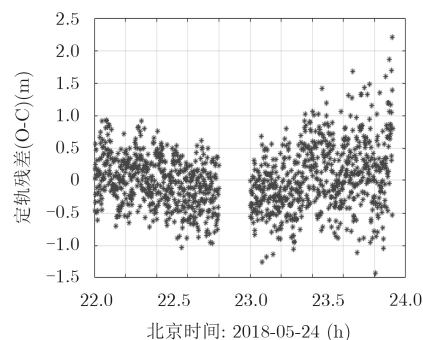
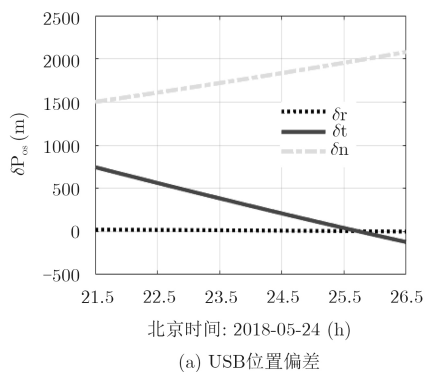
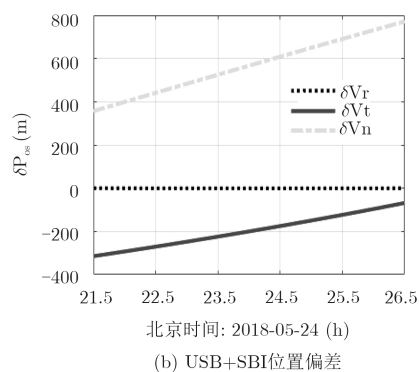


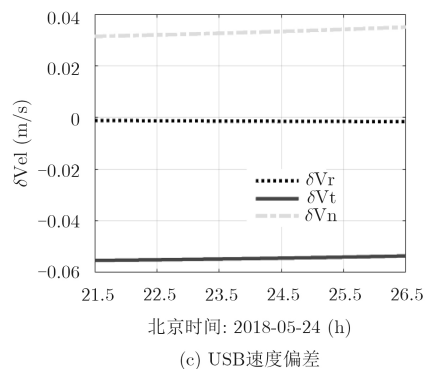
图5 定轨残差图



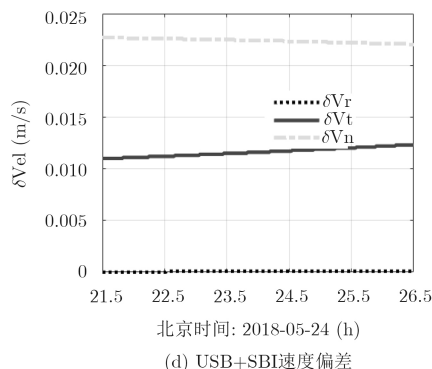
(a) USB位置偏差



(b) USB+SBI位置偏差



(c) USB速度偏差



(d) USB+SBI速度偏差

图6 定轨精度比较

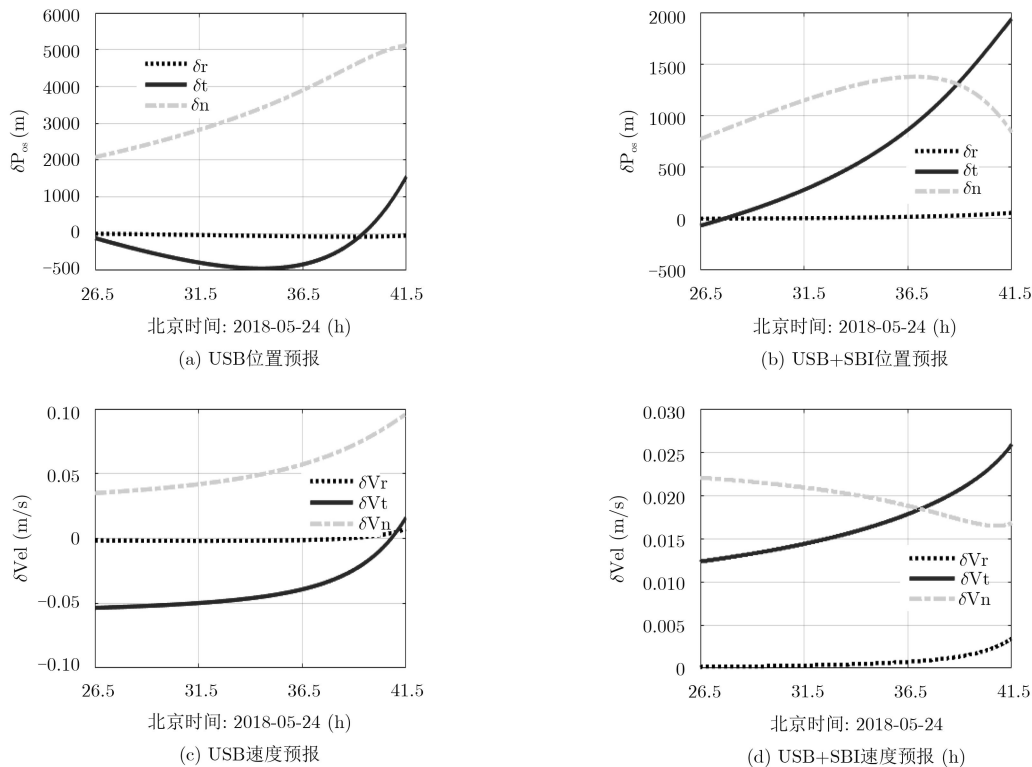


图7 预报比较结果图

度说明在短弧定轨中加入同波束干涉测量数据对定轨预报精度有显著提高。

图中的 δr , δt , δn 分别表示轨道径向、轨道切向、轨道法向的位置偏差分量； δV_r , δV_t , δV_n 分别表示轨道径向、轨道切向、轨道法向的速度偏差分量，其中轨道是相对于地球J2000坐标系。

5 结束语

本文针对嫦娥4号中继星任务多目标测控需求，利用有限测控资源，在稀疏标校射电源缺失无效情况下，基于深空测控干涉测量系统对微卫星与中继星开展同波束干涉测量，发挥中继星测控资源丰富、轨道测定精度高的优势，通过同波束干涉测量，以中继星精密轨道作为参考基准，实现对微卫星的干涉测量观测量的获取，测角结果成功应用于对微卫星的短弧定轨，对微卫星地月转移轨道段某次轨道机动后的快速轨道确定和预报发挥了一定作用。

后续我国月球探测任务面临多目标测控的应用需求，基于探测器目标的轨道构型特点(如着陆器与环绕器、着陆器与巡视器，环绕器之间等)，开展多体制干涉测量跟踪，对降低深空测控系统对标校射电源的依赖，提升我国深空测控干涉测量系统的应用效能，具有重要参考价值。

参考文献

- [1] 李海涛, 周欢, 郝万宏, 等. 深空导航无线电干涉测量技术的发展历程和展望[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(6): 470–478.
- [2] LI Haitao, ZHOU Huan, HAO Wanhong, et al. Development of radio interferometry and its prospect in deep space navigation[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2013, 32(6): 470–478.
- [3] CURKENDALL D W and BORDER J S. Delta-DOR: The one-nanoradian navigation measurement system of the deep space network—history, architecture, and componentry[R]. IPN Progress Report 42-193, 2013.
- [4] DUEV D A, CALVÉS G M, POGREBENKO S V, et al. Spacecraft VLBI and doppler tracking: Algorithms and implementation[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 541: A43. doi: [10.1051/0004-6361/201218885](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201218885).
- [5] CALVÉS G M, NEIDHARDT A, PLÖTZ C, et al. Venus and Mars Express spacecraft observations with wettzell radio telescopes[C]. IVS 2016 General Meeting, Johannesburg, South Africa, 2016: 382–385.
- [6] BORDER J S. Innovations in delta differential one-way range: From viking to mars science laboratory[C]. 2009 International Symposium on Space Flight Dynamics, Toulouse, France, 2009: 1–16.
- [7] ZHENG W M, HUANG Y, CHEN Z, et al. Real-time and high-accuracy VLBI in CE'3 mission[C]. The 2014 IVS General Meeting, Shanghai, China, 2014: 466–472. URL: http://ivscc.bkg.bund.de/publications/gm2014/100_Zheng_etal.pdf.
- [8] 马茂莉, 郑为民, 黄逸丹, 等. 嫦娥三号探测器DOR信号本地

- 相关处理与定轨验证[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47(2): 029502. doi: [10.1360/SSPMA2016-00361](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00361).
- MA Maoli, ZHENG Weimin, HUANG Yidan, *et al.* Local correlation and orbit determination for DOR signals in Chang'E-3[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, 47(2): 029502. doi: [10.1360/SSPMA2016-00361](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00361).
- [8] 刘庆会, 吴亚军. 高精度VLBI技术在深空探测中的应用[J]. 深空探测学报, 2015, 2(3): 208–212.
- LIU Qinghui and WU Yajun. Application of high precision VLBI technology in deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2015, 2(3): 208–212.
- [9] 郭丽, 李金岭, 童锋贤, 等. 同波束VLBI技术对嫦娥三号巡视器的高精度相对定位[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2016, 41(8): 1125–1130. doi: [10.13203/j.whugis20140439](https://doi.org/10.13203/j.whugis20140439).
- GUO Li, LI Jinling, TONG Fengxian, *et al.* Precisely relative positioning of Chang'E 3 rover with SBI delta VLBI delay measurements[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(8): 1125–1130. doi: [10.13203/j.whugis20140439](https://doi.org/10.13203/j.whugis20140439).
- [10] 郑鑫, 刘庆会, 吴亚军, 等. 双月球探测器相对定位的同波束VLBI技术研究[J]. 宇航学报, 2014, 35(9): 1030–1035. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2014.09.007](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2014.09.007).
- ZHENG Xin, LIU Qinghui, WU Yajun, *et al.* Research on same-beam VLBI technique for relative position determination of two lunar spacecrafts[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(9): 1030–1035. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2014.09.007](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2014.09.007).
- [11] 刘庆会, 吴亚军, 黄勇, 等. 基于同波束VLBI的火星车测定位技术[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45(9): 099502. doi: [10.1360/SSPMA2015-00287](https://doi.org/10.1360/SSPMA2015-00287).
- LIU Qinghui, WU Yajun, HUANG Yong, *et al.* Mars rover positioning technology based on same-beam VLBI[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2015, 45(9): 099502. doi: [10.1360/SSPMA2015-00287](https://doi.org/10.1360/SSPMA2015-00287).
- [12] BORDER J S, FOLKNER W M, KAHN R D, *et al.* Precise tracking of the Magellan and pioneer Venus orbiters by same-beam interferometry Part I: Data accuracy analysis[R]. TDA Progress Report 42-110, 1992.
- [13] 刘庆会, 陈明, GOOSSENS S, *et al.* 同波束VLBI在采样返回式多目标探测器精密测轨测位中的应用[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 53(6): 1153–1161.
- LIU Qinghui, CHEN Ming, GOOSSENS S, *et al.* Applications of same-beam VLBI in the orbit determination of multi-spacecrafts in a lunar sample-return mission[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2010, 53(6): 1153–1161.
- [14] 刘庆会, 史弦, 菊池冬彦, 等. 上海和乌鲁木齐射电望远镜的超高精度同波束VLBI观测[J]. 中国科学 G辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 52(12): 1858–1866.
- LIU Qinghui, SHI Xian, FUYUHIKO K, *et al.* High-accuracy same-beam VLBI observations using Shanghai and Urumqi telescopes[J]. *Science in China Series G-Physics, Mechanics & Astronomy*, 2009, 52(12): 1858–1866.
- [15] 凤凰网资讯. 嫦娥四号中继星“鹊桥”顺利进入使命轨道运行[EB/OL]. http://news.ifeng.com/a/20180614/58718025_0.shtml, 2018.
- [16] 唐歌实. 深空测控无线电测量技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 109–122.
- TANG Geshi. Radiometric Measuring Techniques for Deep Space Navigation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 109–122.
- [17] 刘庆会. 同波束VLBI技术在深空探测器测定轨中的应用[J]. 遥测遥控, 2016, 37(6): 36–44. doi: [10.3969/j.issn.2095-1000.2016.06.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1000.2016.06.004).
- LIU Qinghui. Applications of same-beam VLBI technology in orbit determination of deep space satellites[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2016, 37(6): 36–44. doi: [10.3969/j.issn.2095-1000.2016.06.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1000.2016.06.004).
- [18] 姜坤, 王元钦, 马宏, 等. 甚长基线干涉测量数字基带转换器子通道时延影响分析[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1509–1514.
- JIANG Kun, WANG Yuanqin, MA Hong, *et al.* Impact analysis of the sub-channel delay in Very Long Baseline Interferometry digital baseband converter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1509–1514.
- [19] 喻业钊, 韩雷, 周爽, 等. 佳木斯66 m射电望远镜指向精度测量及改进[J]. 天文研究与技术, 2016, 13(4): 408–415. doi: [10.3969/j.issn.1672-7673.2016.04.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7673.2016.04.004).
- YU Yezhao, HAN Lei, ZHOU Shuang, *et al.* A study on the measurements and improvements of pointing accuracy of Jiamusi 66 m radio telescope[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2016, 13(4): 408–415. doi: [10.3969/j.issn.1672-7673.2016.04.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7673.2016.04.004).
- 韩松涛: 男, 1982年生, 博士后, 研究方向为深空探测轨道测量.
- 陈明: 男, 1974年生, 研究员, 研究方向为航天器测定轨技术.
- 李翠兰: 女, 1979年生, 高级工程师, 研究方向为航天器测定轨技术.
- 路伟涛: 男, 1985年生, 助理研究员, 研究方向为深空无线电测量.