

面向绕月交会对接的同波束VLBI研究

任天鹏^{1,2}, 唐歌实^{1,2}, 许柏¹, 路伟涛^{1,2}, 陈略^{1,2}, 韩松涛^{1,2}, 王美^{1,2}

(1. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094; 2. 航天飞行动力学技术重点实验室, 北京 100094)

摘要: 针对“嫦娥5号”(CE-5)探测器间高精度相对测量需求, 设计了我国深空干涉测量处理中心框架下的同波束VLBI处理算法, 分析了X波段同波束VLBI相位解模糊条件和结果; 通过引入群时延辅助的相位干涉技术, 大幅抑制了干涉时延随机误差, 为同波束VLBI中相位解模糊提供了先验条件; 利用CE-5对接实测数据验证了本文工作的有效性, 为CE-5任务同波束VLBI的实施奠定了基础。

关键词: 同波束VLBI; 交会对接; 嫦娥5号; 群时延辅助的相时延

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)04-0367-06

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2017.04.009

引用格式: 任天鹏, 唐歌实, 许柏, 等. 面向绕月交会对接的同波束VLBI研究[J]. 深空探测学报, 2017, 4(4): 367-372.

Reference format: Ren T P, Tang G S, Xu B, et al. Same-beam VLBI in lunar orbiter rendezvous and docking[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(4): 367-372.

0 引言

我国目前已经发射的月球探测器包括“嫦娥1号”(CE-1)、“嫦娥2号”(CE-2)、“嫦娥3号”(CE-3)和“再入返回飞行试验器”(CE-5T1), 实现了我国无人探月工程“绕、落、回”三步走中的绕月和落月探测^[1-4]。“嫦娥5号”(CE-5)包括轨道器、上升器、着陆器和返回器等多个探测器, 预计在海南发射场利用大推力“长征5号”(CZ-5)运载火箭发射, 是我国最复杂的航天任务之一。“嫦娥5号”将采用月球轨道交会对接技术实现无人月球样品采样返回。在交会对接过程中, 上升器将通过多次变轨, 最终实现和轨道器对接。月球交会对接是“嫦娥5号”任务和未来我国载人登月工程的关键技术之一。

然而, 不同于绕地交会对接中航天器有中继卫星和导航卫星支持, 月球探测器的轨道存在月球遮挡且距离遥远, 因此测控弧段和定轨精度都不及绕地交会对接。面对测量手段有限、地面测量几何差、地面引导的技术难度大等难题, 绕月交会对接需要发展同波束甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)等新型测量技术^[5]。

同波束VLBI测量的基本原理是利用天线的主波束同时接收角距很小的两个或多个探测器信号, 得到两

个或多个探测器信号的相关相位并在探测器间进行差分, 两个探测器的时延差分即为同波束VLBI的时延观测测量。由于两器角距离相近, 可以消除传播路径中电离层、大气以及观测装置的绝大部分影响, 得到的差分时延数据比传统的单探测器VLBI时延测量精度更高^[6-8]。从测量原理上, 同波束VLBI对两个探测器的相对位置有较强的约束。

同波束VLBI已经在日本“月亮女神”(SElenological and ENgineering Explorer, SELENE)和我国“嫦娥3号”月球探测计划中得到了充分应用。在SELENE计划中, 子卫星Rstar和Vstar分别发送3个S波段载波(2 212 MHz、2 218 MHz、2 287 MHz)和1个X波段载波(8 456 MHz)。采用S频段多频点同波束VLBI测量技术对Rstar和Vstar进行测量, 干涉相位解模糊后得到了ps量级的差分时延数据^[5-6]。“嫦娥3号”探测器着陆后, 经过1 h以上的连续观测, 在着陆器和巡视器之间实现了ps量级的同波束VLBI测量^[3]。

“嫦娥2号”之后的月球探测器, 包括“嫦娥5号”, 基本均采用X波段测控体制^[12]。随之而来的是4倍于S波段干涉相位解模糊先验精度。不同于基本相对不动的“嫦娥3号”着陆器和巡视器, “嫦娥5号”月球交会对接期间, 尤其是远程引导阶段, 难以出现1 h以上的连续同波束观测工况。因此需要针对面向月球交会对接的

X波段同波束VLBI实施,尤其是干涉相位解模糊问题开展研究。

本文针对“嫦娥5号”探测器间高精度相对测量需求,设计了我国深空干涉测量处理中心框架下的同波束VLBI处理算法,分析了X波段同波束VLBI中相位解模糊条件和结果;通过引入群时延辅助的相时延技术,大幅抑制了干涉时延随机误差,为同波束VLBI中相位解模糊提供了先验条件;最后利用“嫦娥5号”对接实测数据验证了本文工作的有效性,为“嫦娥5号”任务中同波束VLBI的实施奠定了基础。

1 X波段同波束VLBI原理与实施

1.1 同波束VLBI原理

当两个航天器在角度上非常接近时,它们可以在一个地面天线的同一个波束内被观测,使用两个地面站天线对两个航天器同时观测,可以形成差分干涉测量,这一技术被称为同波束干涉测量,如图1所示。

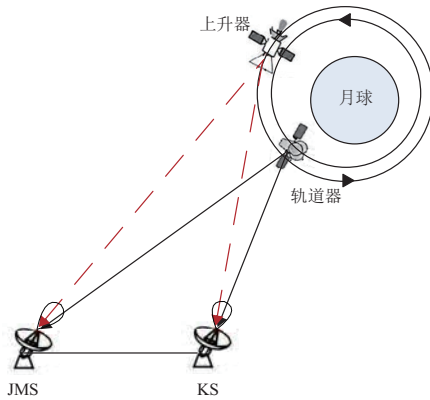


图1 轨道器与上升器间同波束VLBI示意图

Fig. 1 Same-beam VLBI observation between the orbiter and the ascender

假设两个航天器 h ($h=a, b$) 的信号到达测站 g ($g=A, B$) 的传播时延为 $\tau_{p,hg}$, 表示为

$$\tau_{p,hg} = \tau_{hg} + (\tau_{th} - \tau_{tg}) + \tau_{shg} + \tau_{eg} \quad (1)$$

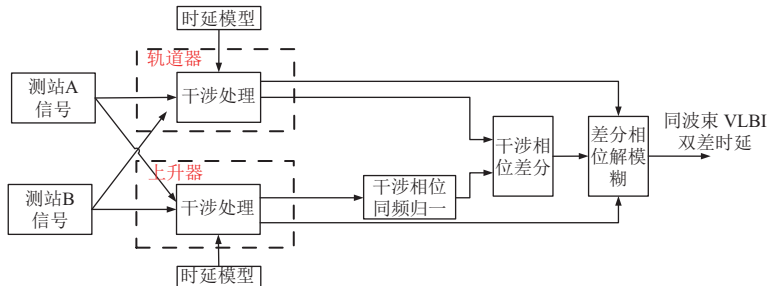


图2 同波束VLBI处理算法

Fig. 2 Same-beam VLBI processing algorithm

其中: τ_{hg} 表示由航天器 h 到测站 g 的几何延迟; $(\tau_{th} - \tau_{tg})$ 表示航天器 h 与测站 g 间的钟差; τ_{shg} 表示由大气、等离子等介质引入的传播介质时延; τ_{eg} 表示测站 g 的设备时延。因此航天器 h 到两测站的干涉时延为

$$\Delta\tau_h = \tau_{p,hA} - \tau_{p,hB} = (\tau_{hA} - \tau_{hB}) - (\tau_{tA} - \tau_{tB}) + (\tau_{shA} - \tau_{shB}) + (\tau_{eA} - \tau_{eB}) \quad (2)$$

对两航天器的干涉时延进行差分得到

$$\Delta\Delta\tau = \Delta\tau_a - \Delta\tau_b = (\tau_{aA} - \tau_{aB}) - (\tau_{bA} - \tau_{bB}) + (\tau_{saA} - \tau_{saB}) - (\tau_{sbA} - \tau_{sbB}) \quad (3)$$

由式(3)可以看出双差测量消去了共有的钟差和设备时延。更进一步,当两航天器的角距很小时,可以认为传播介质时延相等,则式(3)可以表示为

$$\Delta\Delta\tau_n = (\tau_{aA} - \tau_{aB}) - (\tau_{bA} - \tau_{bB}) \quad (4)$$

在不考虑热噪声的影响时,双差时延测量值等于几何双差时延。因此,同波束VLBI对两器相对位置测量具有较强的约束能力。

1.2 处理算法

根据同波束VLBI原理及我国深空干涉测量处理中心软件框架,针对“嫦娥5号”探测器间同波束VLBI设计了数据处理算法,如图2所示。

首先,来自两个测站的接收信号按照频率区分轨道器和上升器,然后每个探测器分别进行时延补偿、FFT、共轭相关等干涉处理,获取干涉时延和干涉相位;最后进行干涉相位同频归一化,实现干涉相位差分与解模糊,获得同波束VLBI的双差时延。

1.3 干涉相位解模糊条件分析

同波束VLBI的前提是干涉差分相位的准确解模糊,要求精度足够的先验时延。换言之,图2中差分干涉相位解模糊需要精度足够的干涉群时延差。根据干涉测量误差分解^[13],同波束VLBI干涉群时延差的误差主要由噪声误差贡献。因此,干涉群时延随机误差评估对X波段同波束VLBI干涉相位解模糊极为重要。

由于“嫦娥5号”探测器DOR侧音与“嫦娥3号”着陆器DOR侧音为相同体制，因此基于“嫦娥3号”着陆器DOR侧音的干涉群时延随机误差，评估预期“嫦娥5号”干涉群时延的随机误差。

对UTC2017年1月9日11时–14时跟踪弧段的CE-3着陆器DOR侧音进行干涉处理。利用不同的积分时长，得到不同的干涉群时延结果；对干涉群时延结果进行曲线拟合，获取其随机误差。“积分时长–干涉时延随机误差”函数关系如图3所示。可以看出，随着积分时长的增加，随机误差持续下降。然而，积分时长增加到一定程度后，随机误差改善情况并不明显。譬如积分时长由15.72 s增加至31.44 s后，随机误差由0.116 ns改变至0.114 ns，几乎没有改善。这是由于干涉时延率残差的存在，使得长时间积分后，不同子积分周期的干涉相位差异较大，矢量求和后并不能提高信噪比。通常要求时延率残差引起的干涉相位差异不超过1 rad^[14]。

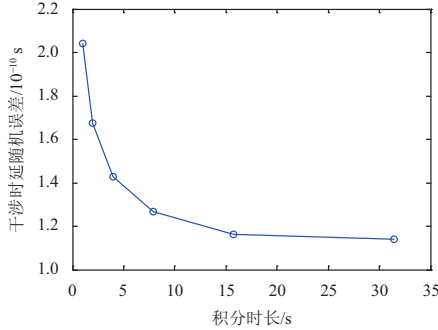


图3 “积分时长–干涉时延随机误差”函数关系

Fig. 3 “Integration time-delay random error” function

由于X波段同波束VLBI干涉相位解模糊的先验时延精度要求优于0.06 ns（理论上）或0.03 ns（工程上），因此根据图3可以知道，“嫦娥5号”实时干涉群时延随机误差难以满足干涉相位解模糊。也就是说，目前技术状态难以支持“嫦娥5号”实施实时/准实时同波束干涉测量。因此，需要引入群时延辅助的相时延^[15]的处理方法，抑制干涉群时延随机误差。

1.4 干涉相位解模糊结果分析

同波束干涉测量的本质是利用相时延而非群时延来表征干涉时延，即

$$\tau = \tau_{\text{group}} + \tau_{\text{group,error}} = \tau_{\text{phase}} + \tau_{\text{phase,error}}$$

$$\tau_{\text{phase}} = (2\pi N + \phi) / f$$

其中： τ_{group} 为群时延； $\tau_{\text{group,error}}$ 为群时延误差； τ_{phase} 为相时延； ϕ 为干涉相位； N 为初始整周模糊。其中相时延误差 $\tau_{\text{phase,error}} = \phi_{\text{error}} / f$ 较小，可以忽略不计。干涉相位解模糊正确时，相时延与群时延将表现为较为接近的结果，干涉相位解模糊残差小于0.5周

（理论上）或0.25周（工程上）甚至更小。由于解模糊残差的存在，整周模糊值测量值可能含小数，表示为

$$N = \frac{[(\tau_{\text{group}} + \tau_{\text{group,error}})f - \phi]}{2\pi}$$

其真值为整数，可以表示为

$$N_{\text{true}} = \frac{(\tau_{\text{group}}f - \phi)}{2\pi}$$

实际测量中，由于解模糊残差小于0.25，因此可以使用取整结果利用代替真值。当干涉相位解模糊正确时，解模糊残差为

$$N_{\text{res}} = N - \text{round}(N)$$

因此，干涉相位解模糊正确时，解模糊残差将小于0.25周。后续将依据此现象初步判断干涉相位解模糊正确与否。

2 群时延辅助的相位干涉技术

由1.3节可以知道，直接利用群时延将难以实现X频段相位干涉测量解模糊。引入群时延辅助的相位干涉技术，间接实现了有效的长时积分，通过大幅提高干涉时延结果精度，有望实现干涉时延解模糊。

由文献[15]可知，群时延辅助的相时延 τ_{phase} 的随机误差由 $\phi/2\pi f$ 和 $E[\tau_{\text{group}} - \phi/2\pi f]$ 的随机误差分别贡献。由于相时延 $\phi/2\pi f$ 随机误差远远低于群时延 $\tau_{\text{group}}(t)$ 随机误差，因此群时延辅助的相时延 $\tau(t)$ 的随机误差约为群时延均值 $E[\tau_{\text{group}}(t)]$ 的随机误差。

干涉测量群时延随机误差可以表示为^[16]

$$\sigma = \sigma_0 / \sqrt{T}$$

其中： T 为积分时长； σ_0 为与积分时长无关的误差因子。单通道时 $\sigma_0 = \sqrt{12}/2\pi B\rho_0 \sqrt{f_s}$ ，双通道时 $\sigma_0 = \sqrt{2}/2\pi \Delta f \rho_0 \sqrt{f_s}$ ， ρ_0 为相关系数， f_s 为采样率， B 为单通道干涉带宽， Δf 为双通道频率间隔。

假设跟踪总时长固定为 $T_0 = nT$ ， n 为积分时长 T 时得到群时延结果的数目。剔除时延变化趋势，群时延结果可以认为满足高斯分布 $(\tau_{\text{real}}, \sigma^2)$ 。因此 n 个群时延均值 $E[\tau_{\text{group}}(t)]$ 的随机误差满足高斯分布 $(\tau_{\text{real}}, \sigma^2/n)$ ，其随机误差为

$$\sigma_{\text{mean}} = \sigma / \sqrt{n} = \sigma_0 / \sqrt{nT} = \sigma_0 / \sqrt{T_0}$$

由于 T_0 是跟踪总时长，因此群时延辅助相时延实现了全跟踪弧段积分，积分时长突破了1.3节分析的时延率残差限制，有效抑制了干涉时延结果的随机误差。

3 试验验证

面向绕月交会对接需求，利用“嫦娥5号”对接试验

数据完成了传统差分干涉测量、传统同波束干涉测量、群时延辅助相时延同波束干涉测量等处理,验证群时延辅助相位干涉技术在X波段同波束干涉测量相位解模糊中的支撑作用,评估了系统测量精度,奠定了研究成果的工程可用性。

3.1 试验方案

在“嫦娥5号”干涉测量对接试验中,开展了同波束干涉测量试验及数据处理。对轨道器4通道DOR侧音与上升器4通道DOR侧音开展传统相关干涉处理,原始干涉相位如图4所示;遵循带宽综合解模糊算法,通道间解模糊后干涉相位如图5所示。

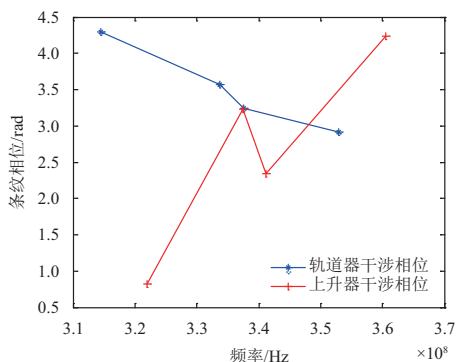


图4 轨道器与上升器原始干涉相位

Fig. 4 Original interferometrical phases of the orbiter and the ascender

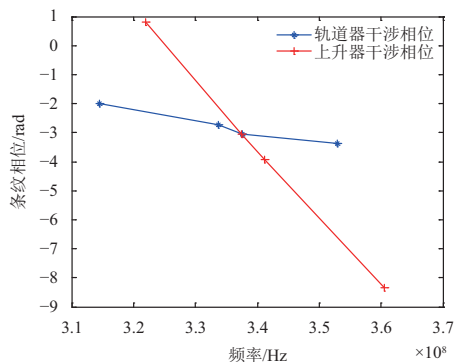


图5 轨道器与上升器带宽综合解模糊干涉相位

Fig. 5 Unwrapped interferometrical phases of the orbiter and the ascender

3.2 双器差分处理结果

根据上文分析结果,将双器差分处理分为3类进行:

- 1) 群时延差分干涉测量 (如图6所示);
- 2) 传统同波束干涉测量 (如图7、图8所示);
- 3) 群时延辅助的相时延同波束干涉测量 (如图9、图10所示)。

由图6与图7可以知道,传统群时延差分结果与传统同波束干涉测量结果基本相同。由1.4节可以知道,差分相位正确解模糊后,相位残差将小于0.25周(工

程上)。而传统同波束干涉测量相位解模糊残差在 $[-0.5, 0.5]$ 之间随机分布(如图8所示)。因而可以判定传统同波束干涉测量并没有实现差分相位正确解模糊。

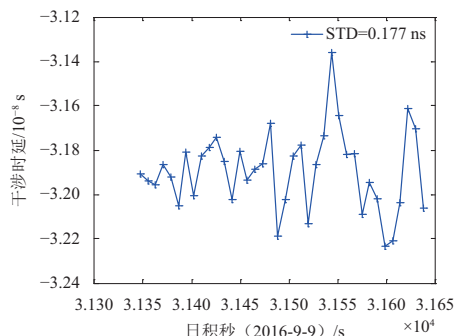


图6 群时延差分干涉测量

Fig. 6 Group-delay-based differential interferometry

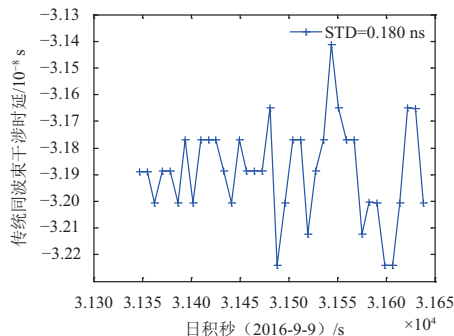


图7 传统同波束干涉测量

Fig. 7 Traditional same-beam interferometry

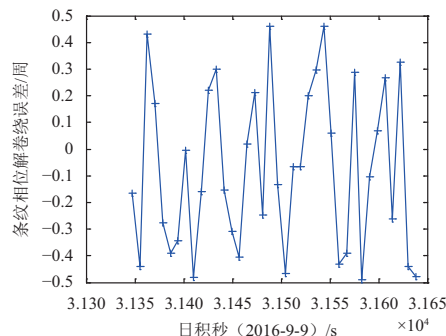


图8 传统同波束干涉测量差分相位解模糊残差

Fig. 8 Unwrapped phase error in traditional same-beam interferometry

同时,由图9可以知道,群时延辅助的相时延同波束干涉测量差分相位解模糊后残余相位最大约0.06周,远小于0.25周,因此基本认为该方法实现了正确的差分相位解模糊,测量随机精度约为0.000 4 ns(如图10所示)。

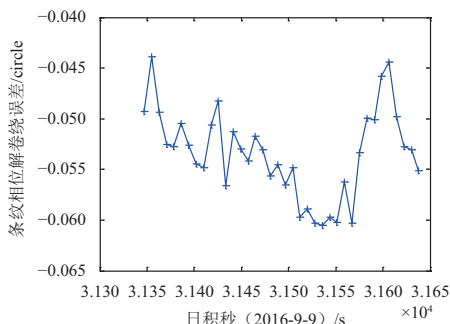


图9 群时延辅助的相时延同波束干涉测量差分相位解模糊残差

Fig. 9 Unwrapped phase error in group-delay-aided phase delay same-beam interferometry

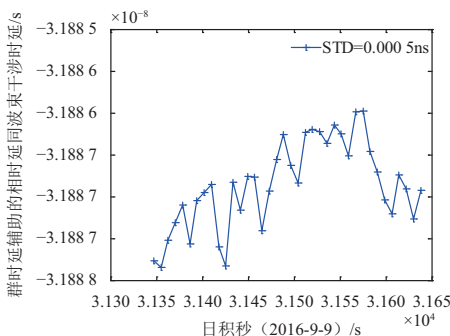


图10 群时延辅助的相时延同波束干涉测量

Fig. 10 Group-delay-aided phase delay same-beam interferometry

4 小 结

本文设计了我国深空干涉测量处理中心工程化软件框架下的“嫦娥5号”同波束VLBI处理算法；结合“嫦娥3号”干涉测量实施精度与“嫦娥5号”预期工况，分析了同波束VLBI中相位解模糊条件和结果；通过引入群时延辅助的相时延技术，大幅抑制了干涉时延随机误差，为同波束VLBI中相位解模糊提供了必要条件。最后，利用“嫦娥5号”对接数据验证了本文工作的有效性，为“嫦娥5号”任务中同波束VLBI的实施奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] Yan J G, Ping J S, Li F, et al. Chang'E-1 precision orbit determination and lunar gravity field solution[J]. Adv Space Res, 2010, 46: 50-57.
- [2] Li P J, Hu X G, Huang Y, et al. Orbit determination for Chang'E-2 lunar probe and evaluation of lunar gravity models[J]. Sci China-Phys Mech Astron, 2012, 55: 514-522.
- [3] 吴伟仁, 刘庆会, 黄勇, 等. “嫦娥3号”月面探测器同波束干涉测量系统的设计与实现[J]. 深空探测学报, 2015, 2(1): 34-42.
- Wu W R, Liu Q H, Huang Y, et al. Design and realization of same-beam interferometry measurement of CE-3[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(1): 34-42.
- [4] Fan M, Hu X G, Dong G L, et al. Orbit improvement for Chang'E-5T lunar returning probe with GNSS technique[J]. Adv Space Res, 2015,

56: 2473-2482.

- [5] 陈少伍, 刘庆会, 董光亮, 等. 月球轨道器交会对接同波束VLBI测量差分相时延实时解算[J]. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 1460-1471.
- Chen S W, Liu Q H, Dong G L, et al. Real-time differential phase delay resolving of same beam VLBI in lunar orbiter rendezvous and docking[J]. Sci Sin Inform, 2013, 43: 1460-1471.
- [6] 刘庆会, 陈明, Goosens S, 等. 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, 40: 809-818.
- Liu Q H, Chen M, Goosens S, et al. Applications of same-beam VLBI in the orbit determination of multi-spacecrafts in a lunar sample-return mission[J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2010, 40: 809-818.
- [7] 刘庆会, 陈明, 熊尉明, 等. 基于超高精度多频点同波束VLBI技术的月球车精密相对定位[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2010, 40: 253-260.
- Liu Q H, Chen M, Xiong W M, et al. Relative position determination of a lunar rover using high-accuracy multi-frequency same-beam VLBI[J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2010, 40: 253-260.
- [8] Liu Q H, Zheng X, Huang Y, et al. Monitoring motion and measuring relative position of the Chang'E-3 rover[J]. Radio Sci, 2014, 49: 1080-1086.
- [9] 陈少伍, 董光亮, 樊敏, 等. 月球轨道器对接航天器相对状态误差分析[J]. 中国空间科学技术, 2014, 5: 32-40.
- Chen S W, Dong G L, Fan M, et al. Relative position and velocity error covariance analysis of two spacecraft in lunar orbit rendezvous and docking[J]. Chin Space Sci Technol, 2014, 5: 32-40.
- [10] 李海涛. 深空测控通信系统设计与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- Li H T. Principles and design methods of deep space TT&C system[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [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: 099502.
- Liu Q H, Wu Y J, Huang Y, et al. Mars rover positioning technology based on same-beam VLBI[J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 099502.
- [12] 李金岭, 刘鹏, 乔书波. 嫦娥二号卫星X波段测控体制时延定位分析[J]. 测绘科学技术学报, 2011, 28(2): 84-87.
- Li J L, Liu L, Qiao S B. Positioning analysis of observations from X-Band monitoring and control system experiments in the Chang'E-2 project [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2011, 28(2): 84-87.
- [13] 唐歌实. 深空探测无线电测量技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [14] 钱志翰, 李金岭. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2012.
- [15] 任天鹏, 唐歌实. 基于CEI的高精度相位干涉测量实验[J]. 遥测遥控, 2015, 36(6): 8-12.
- Ren T P, Tang G S. CEI-based high-precision phase interferometry Tests[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(6): 8-12.
- [16] Whitney A R. Precision geodesy and astrometry via very long baseline interferometry[D]. [S. l.]: Thesis of Massachusetts Institute of Technology, 1974.

作者简介:

任天鹏(1982—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向: 无线电干涉测量

信号处理与误差分析。

电话: (010)66362814

通信地址: 北京市5130信箱120分箱(100094)

E-mail: tpren@nudt.edu.cn

Same-Beam VLBI in Lunar Orbiter Rendezvous and Docking

REN Tianpeng^{1,2}, TANG Geshi^{1,2}, XU Bai¹, LU Weitao^{1,2}, CHEN Lue^{1,2},
HAN Songtao^{1,2}, WANG Mei^{1,2}

(1. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

2. Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics Laboratory, Beijing 100094, China)

Abstract: To obtain a high precision relative measurement between the orbiter and the ascender of the CE-5 lunar probe, a same-beam VLBI algorithm is proposed in the framework of the deep-space interferometry processing center. The conditions and results of getting a right cycle ambiguity are discussed. After introducing the group-delay-aided phase interferometry, the random errors of interferometrical delay are suppressed greatly. It provides a priori condition for a right cycle ambiguity. Finally, the proposed algorithm is verified by using the CE-5 data, laying the foundation for the X-band same-beam VLBI in the CE-5 task.

Key words: same-beam VLBI; rendezvous and docking; Chang'E-5(CE-5); group-delay-aided phase interferometry

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]