

文章编号: 1000-8349(2012)02-255-11

差分 VLBI 技术在采样返回任务中的应用

戴志强, 郑 鑫, 陈冠磊, 陈 明, 赵融冰, 刘庆会

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

摘要: 针对采样返回任务中多探测器精密短弧定轨问题, 研究了甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 技术在两探测器间的交替观测模式、 2π 模糊度解算方法和数据差分处理方法, 给出了星载信标的设计原则和方案。利用日本 SELENE 探月卫星的两个小卫星 R-star 和 V-star 的同波束 VLBI 相关相位生成了交替 VLBI 相位观测量, 对其进行了差分处理求解差分时延, 然后利用差分时延和测速测距数据进行定轨计算。对差分时延的分析表明, 交替 VLBI 差分群时延 RMS 值为 46 mm, 测量精度与同波束 VLBI 差分群时延相当; 交替 VLBI 差分相时延 RMS 值为 1.6 mm, 测量精度与同波束 VLBI 差分相时延相当。定轨结果表明, 交替 VLBI 在进行多探测器的短弧定轨时能达到同波束 VLBI 相当的精度。

关键词: 深空探测; 差分 VLBI; 多探测器精密定轨; 采样返回

中图分类号: P184.5

文献标识码: A

1 引 言

我国于 2007 年和 2010 年先后发射了嫦娥一号、嫦娥二号探月卫星, 迈出了深空探测的第一步。后续的探月三期计划对月球实施采样返回探测。届时将会有轨道器、着陆器和上升器等多个探测器需要测定其轨道或位置^[1], 这要求地面测控系统能够同时对多个目标进行测轨定位。同时, 在采样完成后的返回阶段, 返回器会经历远程导引、自动寻的、最后逼近、对接合拢等多个步骤完成与轨道器的交会对接。在进行远程导引时, 返回器要经历多次频繁变轨, 这要求地面测控系统必须快速地对上升器和轨道器进行精密的短弧定轨。本文针对深空探测采样返回任务中多个目标的高精度短弧定轨问题展开研究。

深空探测器测定轨技术主要有测速、测距和测角三种方式, VLBI 技术是主要的测角手段。VLBI 的观测量一般是群时延, 它是通过相关相位与频率的变化关系得出的。点频信号各个频点的频率间隔即相当于带宽, 因此其间隔越大, 求出的群时延的测量精度就越高。如

收稿日期: 2011-11-07; 修回日期: 2011-12-27

资助项目: 中国科学院百人计划; 国家自然科学基金 (11073048); 浦江人才计划 (10PJ1411700); 863 计划 (SS2012AA121203)

在深空探测中常用的 DOR (Differential One-way Range) 信号, 其频点间的最大带宽一般有 40 MHz 左右, 据此可得到随机误差为 3 cm 量级的 VLBI 群时延数据。VLBI 时延除了随机误差外, 还有系统误差的影响。在传统的 VLBI 观测中, 为了消除大气、电离层和观测设备的影响, 需要交替观测卫星和河外射电源。由于大气、电离层和观测设备延迟随时间变化, 而且卫星和射电源间的角距一般有数度至十几度, 从而导致不同传播路径上大气和电离层时延的不一致, 即使利用射电源观测和 GPS 技术也不能把大气、电离层和观测设备的影响完全去除。现在用于深空探测中的传统 VLBI 时延的系统误差在大气和电离层扰动较小时最小可降至 3~10 cm 左右, 而我国探月卫星中应用的 VLBI 时延测量误差可达 15~50 cm。同时, 传统的 VLBI 必须交替观测射电源和多个卫星, 减少了对卫星的观测时间, 不利于观测时延的获取。因此, 为了满足采样返回任务中多目标测定轨问题对精度和实时性的较高要求, 有必要针对任务特点进一步展开 VLBI 观测处理的技术方法研究。

为了提高 VLBI 测量精度及其对多探测器定轨的贡献, 刘庆会等人提出了基于 S 波段多频点同波束 VLBI 技术的采样返回多探测器精密定轨方案^[2]。S 波段多频点同波束 VLBI 即用射电望远镜的主波束同时接收两个卫星发送的信标, 得到两个卫星信标的相关相位并在卫星间进行差分, 以消除电离层、大气及观测设备的绝大部分的影响, 从而得到差分相关相位, 并据此得到高精度的差分群时延及超高精度的差分相时延。利用 S 波段多频点同波束 VLBI 技术和我国 4 个 VLBI 测站 (北京 50 m, 上海 25 m, 昆明 40 m 和乌鲁木齐 25 m) 得到的差分相时延数据并结合测速测距数据, 可实现轨道器和返回器的误差 10 m 左右的精密定轨^[3,4]。对于口径 25 m 的射电望远镜来说, 其 S 波段的主波束宽度约为 0.38° , X 波段的主波束宽度则约为 0.09° 。因此, 采用 S 波段信标能够带来更多的同波束 VLBI 观测机会, X 波段则只有极少的同波束 VLBI 观测机会。然而, S 波段多频点同波束 VLBI 技术的实现需在轨道器和返回器上搭载专门设计的 S 波段信标源。由于载荷重量与能源的限制, S 波段信标源的搭载困难, 特别是对于需从月面起飞的上升器来说。如在我国探月三期采样返回工程中, 计划将采用 X 频段的 DOR 信标进行 VLBI 测轨, 不再搭载专用的 S 波段信标源。对于我国 VLBI 网来说, X 波段信标的使用大幅减小了同波束 VLBI 观测的机会, 增加了采样返回任务中多目标精密测定轨的难度。

针对上述问题, 本文研究了采样返回任务中的多个探测器间的交替 VLBI 技术, 以及观测的差分处理方法, 给出了适于交替 VLBI 观测的 X 波段 DOR 信标源设计方案, 并首次评价了其在多探测器精密短弧定轨中的贡献。我们利用日本 SELENE 的两个小卫星 R-star 和 V-star 的同波束 VLBI 相位观测量生成了交替 VLBI 相位观测量, 然后在探测器间对相关相位进行差分得到差分相关相位, 并解算出探测器间的差分时延, 最后结合测速测距数据对每个探测器进行了短弧定轨分析, 并和同波束 VLBI 的定轨结果进行了比较。研究结果表明, 交替 VLBI 的定轨精度与同波束 VLBI 相当。对于短弧定轨, 差分群时延结合测速测距数据能达到 <75 m 的定轨精度, 差分相时延结合测速测距数据达到约 10 m 的定轨精度, 满足采样返回任务的要求。

2 多目标交替 VLBI 观测及 X 波段 DOR 信标源设计方案

受到射电望远镜主波束宽度的限制, 当两个探测器间的距离较大时, 射电望远镜不能同时接收两个探测器的测控信号, 必须在探测器间进行交替观测。图 1 给出了多探测器交替 VLBI 观测的示意图, 即在某一时刻, 射电望远镜只观测其中一个探测器, 观测一段时间后转向下一个探测器, 如此交替观测多个探测器直至完成对多探测器的观测任务。在交替 VLBI 观测中, 由于两个探测器的角距较小且接收信号较强, 对两个探测器的相关相位进行差分, 可以在很短的切换观测时间内较好地去除电离层、大气和观测设备的绝大部分影响, 得到高精度的差分时延。

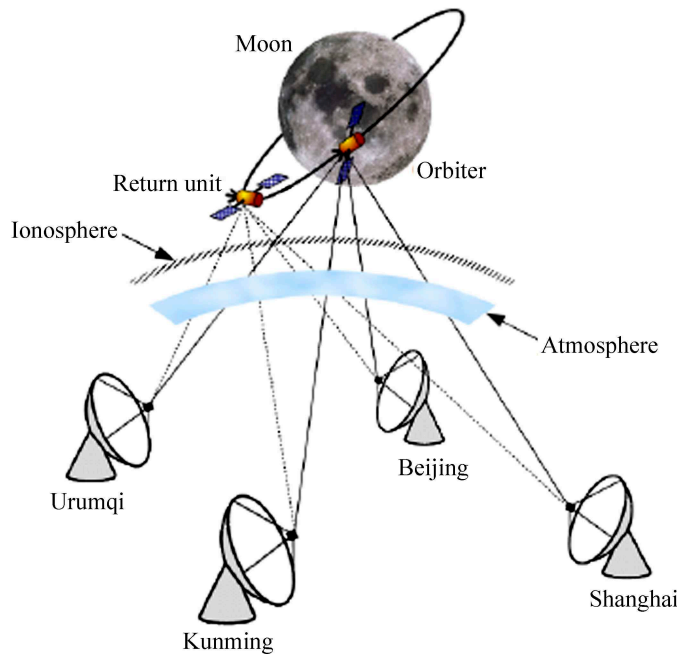


图 1 多探测器交替 VLBI 观测示意图, 地面站在轨道器和返回器之间交替观测, 得到每个探测器的原始相关相位

为了能够通过差分有效地消除各项误差的影响, 适用于交替 VLBI 观测的 X 波段 DOR 信标应依据以下原则设计: 在考虑到多普勒效应的情况下, 应该使不同探测器上对应频点的信号尽量靠近, 使得各个探测器上的对应信号都能通过接收机的同一通道记录, 这样在差分时就能够比较彻底地消除观测装置的影响。同时, 由于信号的频率接近, 且在穿过大气和电离层时经过的路径大致相同, 在差分的时候也能够更好地消除大气和电离层的影响。图 2 给出了适于轨道器和返回器两个探测器的信标源设计方案^[2,5], 每个探测器的信标由一个主载波 $f_{ci}(i=1,2)$ 和 4 个 DOR 侧音信号组成, 主载波位于 8 425 MHz 附近, DOR 信号的频率距离主载波分别为 4 MHz 和 20 MHz。主载波附近有一定带宽的测控信号和 ± 0.5 MHz 的测距侧音信号, 使得在探测器初轨误差较大时仍能解决整周模糊度问题, 从而得到差分时延数

据。考虑到每个探测器 X 波段的多普勒频移最大不超过 200 kHz, 为了避免因多普勒频移和信号频率的不稳定性造成不同探测器信号间的相互干扰, 轨道器和返回器的主载波频率间隔可以设为 1.5 MHz。

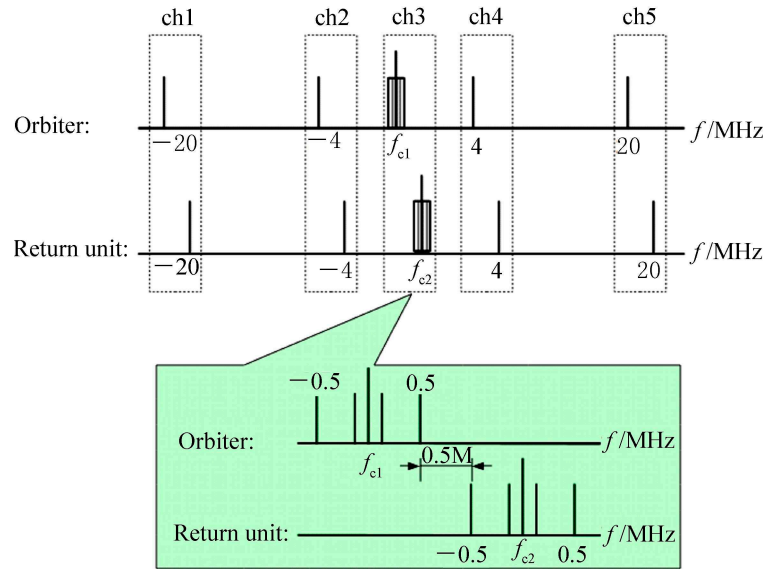


图 2 适于交替 VLBI 观测的 X 波段 DOR 信标源设计方案

3 VLBI 数据处理

由于我国的采样返回项目仍在研究论证之中, 尚未取得实测数据, 因此本文利用日本 SELENE 项目的测速测距和同波束 VLBI 数据来验证交替 VLBI 的测定轨能力。日本 SELENE 由一个主探测器和两个子探测器 R-star 和 V-star 组成。R-star 和 V-star 分别发射 $S_1=2\,212$ MHz、 $S_2=2\,218$ MHz、 $S_3=2\,287$ MHz 3 个频点的信号。SELENE 的 VLBI 观测主要由日本 VERA4 站 (ISGK、MZSW、IRIK 和 OGSW) 及 4 个国际站 (中国上海 25 m、中国乌鲁木齐 25 m、澳大利亚 Hobart 26 m 和德国 Wettzell 20 m) 完成, 以 VERA4 站的观测为主。当 R-star 和 V-star 间的夹角小于 0.56° 时射电望远镜跟踪其中间位置从而进行同波束 VLBI 观测; 当夹角大于 0.56° 时进行交替 VLBI 观测, 交替观测时间间隔为 120 s。为了与同波束 VLBI 数据所确定的精确轨道进行比较分析, 本文利用 SELENE 的同波束 VLBI 数据来生成交替 VLBI 观测量, 并用这两种数据进行定轨, 然后做比较分析, 评价交替 VLBI 技术对多个目标的测定轨能力。然而, 交替 VLBI 的相关相位数据存在 2π 模糊度的问题, 因此在本章中我们首先给出交替 VLBI 相关相位中解算 2π 模糊度的方法, 并给出解算实例。

3.1 交替 VLBI 相关相位 2π 模糊度的解算方法和解算结果

实际的交替 VLBI 观测过程中, 天线在两个探测器间交替观测, 得到的是分段的相关相

位观测量, 前后两段相位之间有一定的时间间隔, 因此在两段相邻的相关相位观测量间可能会出现 2π 模糊度。如图 3(a)、(b) 所示, 其中图 3(a) 是用 R-star 和 V-star 同波束 VLBI 相关相位生成的交替 VLBI 相关相位, 图 3(b) 是实测的 R-star 和 V-star 交替 VLBI 相关相位, 实线是相关处理实际输出的含有 2π 模糊度的相关相位, 虚线是消除了 2π 模糊度之后的相关相位。 2π 模糊度的解算是基于拟合残差的标准差最小原则进行的, 即对相邻的两段相关相位观测量 A 和 B 进行多项式拟合得到拟合残差, 然后计算拟合残差的标准差, 通过调整 A、B 间的 2π 模糊度使其拟合残差的标准差达到最小, 从而得到 A、B 两段相关相位观测量间的 2π 模糊度个数, 最后对其进行改正。图 3(c) 和 (d) 对应于图 3(b) 中 11:56:00–12:02:00 间两段实测的交替 VLBI 相关相位在模糊度搜索过程中利用 4 次多项式得到的拟合残差及其标准差, (c) 中实线是进行正确的 2π 模糊度 ($N_c = -2$) 修正后得到的拟合残差, 虚线是进行错误的模糊度 ($N_c = -1$ 和 $N_c = -3$) 修正后得到的拟合残差。从图 3(c) 和 (d) 可以看出, 当搜索到正确的 2π 模糊度时, 相邻两段相关相位的拟合残差表现为随机噪声, 其标准差也达到最小, 否则拟合残差会表现出系统性的偏差, 其标准差也会增大。因此, 利用这一方法可消除交替 VLBI 相关相位中的 2π 模糊度, 对相关相位进行连接。

3.2 同波束 VLBI 数据处理

图 4 给出了 R-star 和 V-star 相关相位的例子。由于 VERA 接收系统本身存在较大的噪声^[6], 在实际的观测过程中多普勒频移有时会使观测信号和噪声的谱线重叠, 导致信号与噪声不能分离, 信号的相关相位不能准确提取, 从而使原始相关相位观测量有时会出现 2π 整数倍的跳变, 如在图 4(b) 上图中, S1、S2 和 S3 信号的原始相关相位观测量在 20:20 左右的时刻出现了 2π 整数倍跳变。相关相位中的跳变会影响到时延解算精度, 从而影响定轨精度。因此, 我们首先对 SELENE 的原始同波束相关相位中 2π 整数倍跳变进行修正, 同时对噪声较大的原始相关相位, 利用前后质量较好的相关相位进行多项式拟合予以修正, 最后得到高质量的连续相位, 图 4(b) 下图给出了经过修正后的相关相位。

在同波束 VLBI 观测时, 同一时刻能得到两个探测器的相关相位; 而交替 VLBI 观测模式在某一时刻只观测一个探测器, 得到其中一个探测器的相关相位。为了模拟交替 VLBI 观测, 我们对 R-star 和 V-star 这两个探测器的连续相关相位按一定的时间间隔 (本文中切换时间为 60 s) 交替删除数据, 得到时间上间断的相关相位。由于在某一时刻只有一个探测器的相关相位, 不能与另一个探测器的相关相位进行直接差分, 必须先对每个探测器的原始相关相位观测量进行处理, 使其在时间上连续。我们采用 6 次多项式对前后两段已有的相关相位进行多项式拟合, 内插得到中间间断的相关相位, 使得在观测时段内的任意时刻都同时有两个探测器的相关相位, 然后在探测器间将对应频点对应时刻的相关相位间做差分, 得到两个探测器的差分相关相位, 最后利用探测器间的差分相位解算出差分时延。

经过前述几步的处理后得到了 4 类 VLBI 差分时延观测量: R-star 和 V-star 间的交替 VLBI (SWV) 差分相时延、交替 VLBI 差分群时延、同波束 VLBI (SBV) 差分相时延和同波束 VLBI 差分群时延, 其中差分群时延是由频率间隔 75 MHz 的 S1 和 S3 的差分相关相位求得的, 差分相时延则由 S1 的差分相关相位求得。对于 X 波段的信标, VLBI 差分相时延很难求出, 只能得到 VLBI 差分群时延, 但本文的研究结果表明 VLBI 差分群时延也能达到很高的测

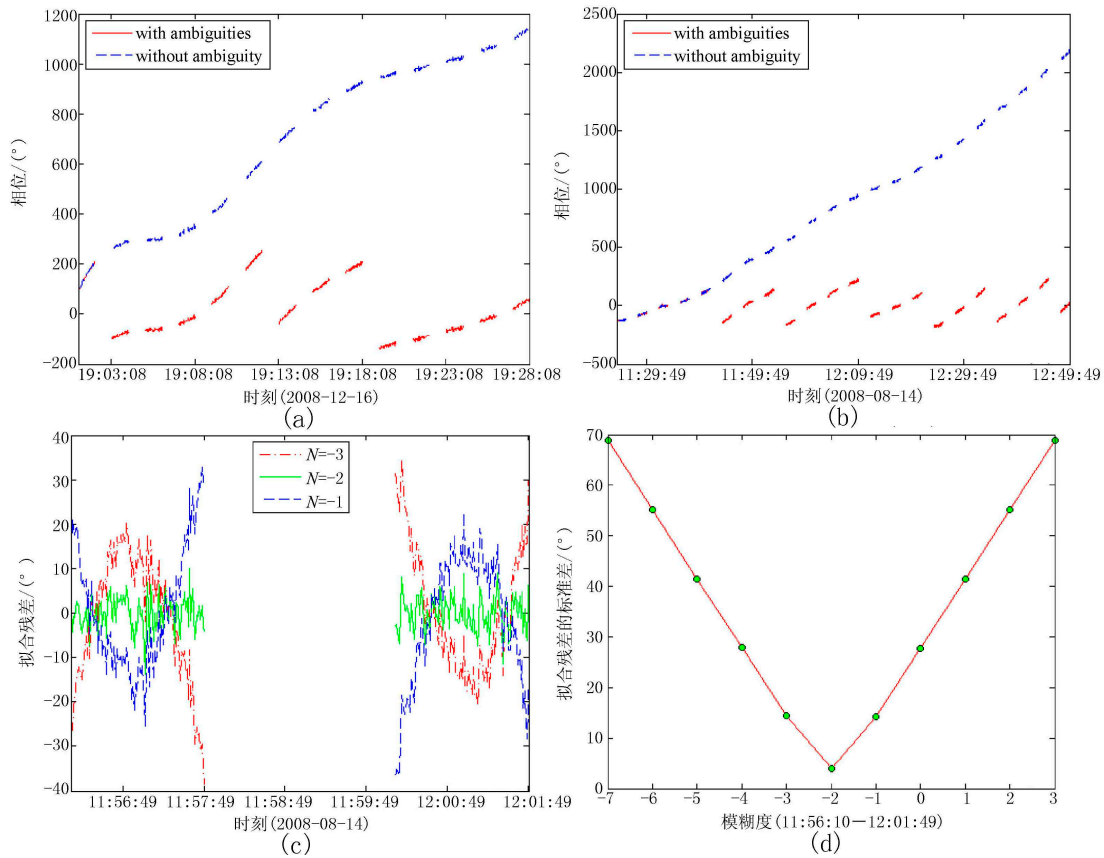


图 3 (a) 利用同波束 VLBI 相关相位生成的交替 VLBI 相关相位; (b) 实际交替 VLBI 观测得到的相关相位; (c) 采用不同的 2π 模糊度修正相位后得到的拟合残差; (d) 2π 模糊度搜索过程中拟合残差的标准差。

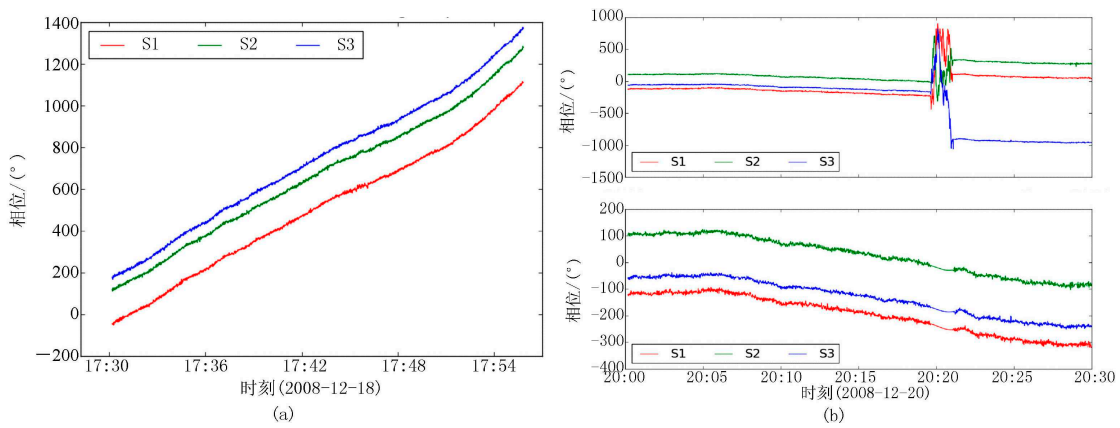


图 4 同波束 VLBI 相关相位观测量

(a) 没有 2π 跳变的原始相关相位观测量; (b) 上图为含有 2π 跳变的原始相关相位观测量, 下图为修正后的结果。

量精度。R-star 和 V-star 间的同波束 VLBI 差分相时延的测量精度为 1 mm 左右^[3], 因此我们以同波束 VLBI 差分相时延作为参考来评价另外 3 种差分时延的测量精度。通过将交替 VLBI 差分相时延、交替 VLBI 差分群时延和同波束 VLBI 差分群时延分别与同波束 VLBI 差分相时延做差, 得到差值的 RMS 分别为 1.6 mm、46 mm 和 32 mm, 如图 5 所示。由此可知在两个探测器的角距小于 0.5° 的情况下, 交替 VLBI 差分相时延达到与同波束 VLBI 差分相时延相当的测量精度, 交替 VLBI 差分群时延也能达到与同波束 VLBI 差分群时延相当的测量精度。

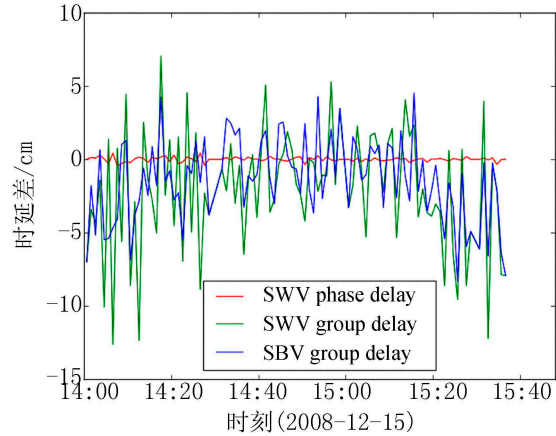


图 5 交替 VLBI 差分相时延、交替 VLBI 差分群时延和同波束 VLBI 差分群时延分别与同波束 VLBI 差分相时延的差

4 定轨结果及分析

将第三章中得到的交替 VLBI 差分相时延、群时延和同波束 VLBI 差分相时延、群时延这 4 类差分时延数据分别与测速测距数据进行组合, 形成 5 组用于定轨的实验数据。考虑到长弧定轨的相关研究已比较成熟^[3,4,7], 同时采样返回项目对多目标的短弧定轨提出了较高要求, 因此本文着重研究交替 VLBI 的短弧定轨能力。我们首先采用相邻弧段间重叠分析法对定轨结果评价其内符合精度, 然后将其与精度更高的两天长弧定轨结果进行比较, 分析其外符合精度。定轨时采用的月球重力场模型是 SGM100i^[7] 模型, 定轨软件是 GEODYN II^[8]。

4.1 短弧定轨结果重叠弧段分析

我们利用 2008 年 12 月 20 日 17:00-24:00 之间的数据进行短弧定轨。图 6 给出了进行短弧定轨的弧段以及所用的各类数据的时间分布, 每个定轨弧段的长度只有 4 h, 在 Arc 1a 和 Arc 1b 之间形成 1 个多小时的重叠弧段用于进行重叠弧段分析。由于 V-star 的多普勒数据较少, 因此只对 R-star 做了重叠弧段分析。表 1 统计了 R-star 短弧三维定轨精度: 只用测速测距数据时, 短弧三维定轨精度只有 3 112 m, 加入 VLBI 差分群时延后其三维定轨精度提高至约 40 m, 加入 VLBI 差分相时延后其三维定轨精度进一步提高至约 13 m。

表 1 R-star 短弧重叠弧段分析得到的轨道差异的 RMS

/m				
D/R	D/R+sw_group	D/R+sbv_group	D/R+sw_phase	D/R+sbv_phase
3112.47	41.96	38.00	13.38	12.70

4.2 短弧定轨与长弧定轨的比较分析

在进行短弧定轨时, 弧段的长度只有约 4 h, 相当于一个轨道周期, 测量数据较少, 定轨

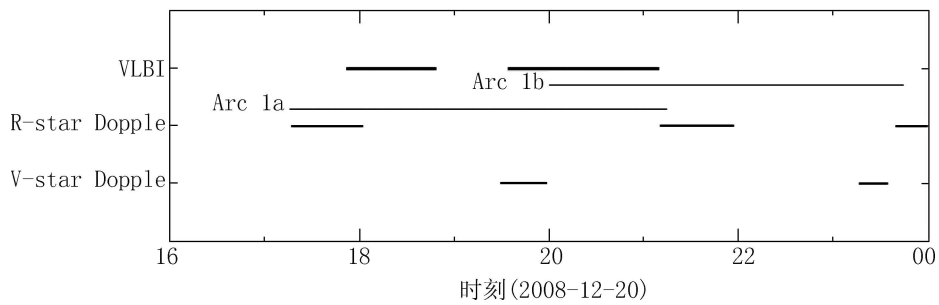


图6 短弧定轨的观测弧段分布与定轨弧段选择

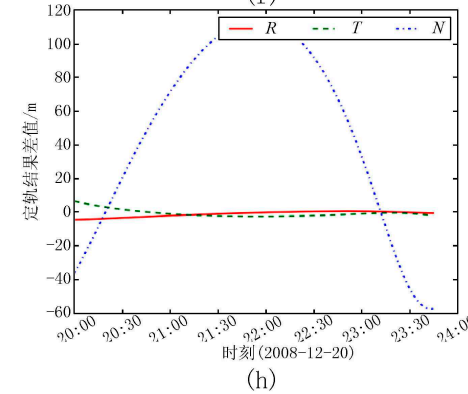
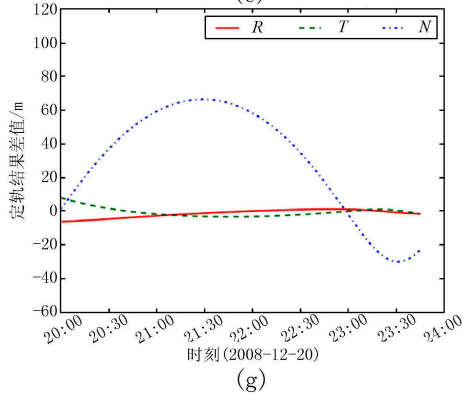
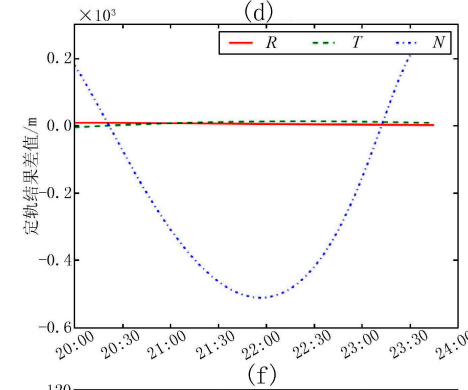
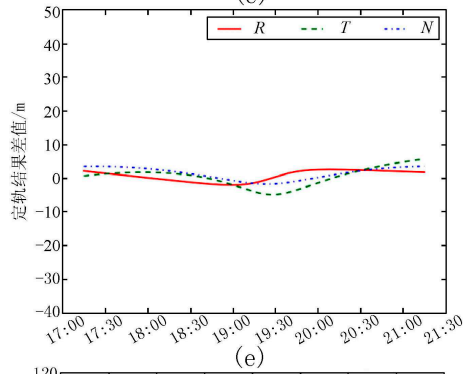
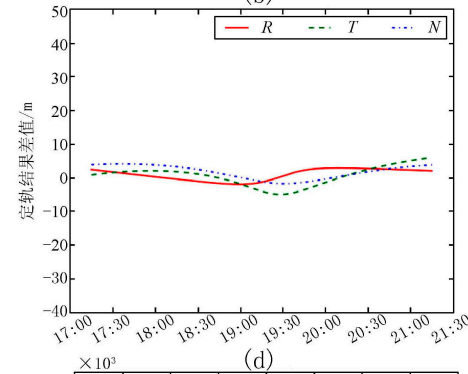
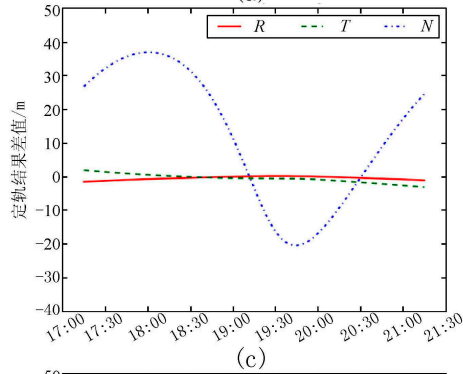
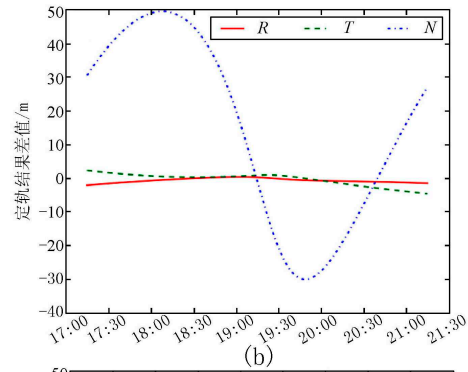
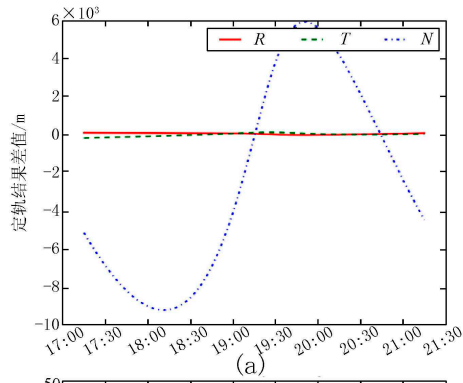
结果的重叠弧段偏差只能作为一个参考。相反,长弧定轨观测弧段跨度超过2 d,所用数据也多,因此其定轨结果更真实可信,相对于短弧定轨,可以看作真实的轨道。因此我们以差分相时延的长弧定轨结果为参考,来分析不同类型观测数据对短弧定轨的贡献。图7给出了 Arc 1a 和 Arc 1b 两个短弧定轨结果与对应时刻的长弧定轨结果在径向、沿迹方向和轨道面法向三个方向上的差值。表2总结了短弧轨道与长弧轨道三维差异的RMS值。从图7和表2可以看出,只用测速测距时,2个弧段短弧三维定轨精度只有333 m和5 900 m,加入VLBI差分群时延后其三维定轨精度分别提高到约23 m和74 m,加入VLBI差分相时延后其三维定轨进一步提高到10 m左右。由于定轨弧段较短,因此测速测距数据的分布对定轨结果有较大影响。从图6可看出, Arc 1a 的测速测距数据分布于弧段两端,对弧段中间的约束力较差,这造成了该弧段内由测速测距数据确定的长弧轨道和短弧轨道间达几千米的差异;而 Arc 1b 的测速测距数据较均匀地分布于弧段的中间和一端,对整个弧段都有较强的约束力,因此这一弧段内由测速测距数据确定的长弧轨道和短弧轨道间的差异只有数百米,较真实地反映了测速测距数据的短弧定轨能力。总的来说,测速测距和VLBI差分群时延能将短弧定轨精度提高到100 m以内,测速测距和VLBI差分相时延能将短弧定轨精度提高到10 m左右。

表2 R-star 长弧与短弧重叠弧段分析所得轨道差异的RMS值

/m				
D/R	D/R+sw_group	D/R+sbv_group	D/R+sw_phase	D/R+sbv_phase
5900.90	31.40	23.28	4.30	4.07
333.39	44.30	73.98	13.80	11.84

5 结 论

本文针对采样返回任务中多探测器测定轨问题研究了差分VLBI的交替观测模式、相关相位 2π 模糊度解算方法和数据差分处理方法,提出了星载信标的设计原则和方案,并利用SELENE的同波束VLBI观测数据生成了多探测器的交替VLBI观测数据,对其进行了差分处理求解差分时延,最后利用差分时延和测速测距数据进行了轨道解算和分析。结果表明,



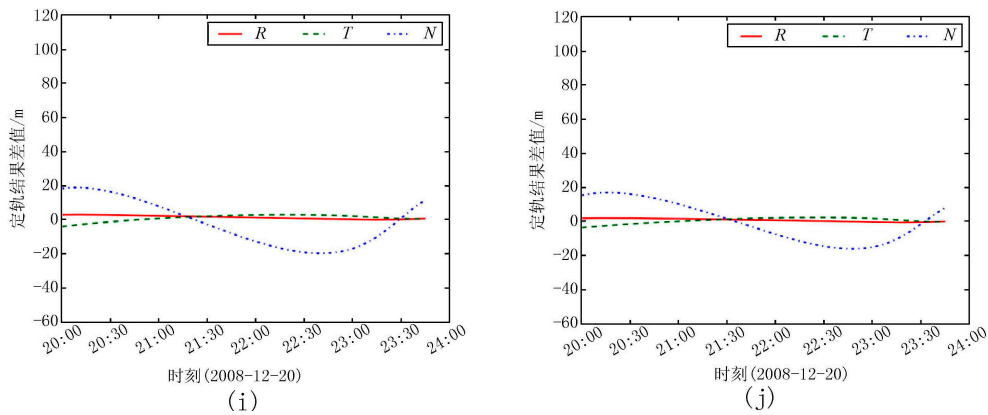


图7 R-star 2 个时段的短弧定轨结果与长弧定轨结果比较
(a)–(e) 对应 Arc 1a, (f)–(j) 对应 Arc 1b。

无论是差分群时延还是差分相时延, 交替 VLBI 能够达到近似于同波束 VLBI 的精度, 但略低于后者。对定轨结果的重叠弧段分析则验证了 VLBI 在多探测器短弧定轨中的重要贡献。只利用测速测距数据时, 4 h 短弧定轨精度只有数百米; 加入交替 VLBI 或同波束 VLBI 差分群时延后, 短弧定轨精度提高至 <74 m; 加入交替 VLBI 或同波束 VLBI 相时延后, 短弧定轨误差进一步降至 10 m 左右。因此, 差分 VLBI 技术能够大幅提高短弧定轨精度, 特别适合于探月三期采样返回任务及载人登月中多探测器的快速精密定轨任务。

参考文献:

- [1] 欧阳自远. 地球科学进展, 2004, 19(3): 351
- [2] 刘庆会, 陈明, Sander Goossens 等. 中国科学: 物理学力学天文, 2010, 40: 809
- [3] Liu Q, Kikuchi F, Matsumoto K, et al. Radio Science, 2010, 45(2): 25
- [4] Kikuchi F, Liu Q, Hanada H, et al. Radio Science, 2009, 44: 1
- [5] Chen Ming, Liu Qinghui, Wu Yajun et al. Sci China Phys Mech Astron, 2011, 54(12): 2284
- [6] 陈明, 刘庆会. 天文学进展, 2010, 28(4): 415
- [7] Goossens S, Matsumoto K, Liu Q, et al. J Geod, 2010, 85(4): 205
- [8] Pavlis D E, Poulouse S, McCarthy J, et al. SGT Inc., 2006, 1

The Application of Differential VLBI to a Sample-Return Mission

DAI Zhi-qiang, ZHENG Xin, CHEN Guan-lei, CHEN Ming,
ZHAO Rong-bing, LIU Qing-hui

(Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 20030, China)

Abstract: To study the precise short-arc orbit determination for multiple spacecrafts in a sample-return mission, the VLBI switching observation mode, integer ambiguity resolution, differential process method and spacecrafts' signal requirements are investigated. Based on the same-beam VLBI cross-correlation phase, we produced the switching VLBI observation data, and calculated the differential phase between two spacecrafts to derive the differential delay. The precise orbits for each spacecraft are derived from the differential delay data. By comparing with the same-beam VLBI, we found that the group delay and phase delay of switching VLBI were as precise as that of same-beam VLBI, with the RMS of 46 mm and 1.6 mm respectively. If using Doppler/ranging data only, the accuracy of the 4-hour short-arc orbit determination is several hundreds meters. By combining the VLBI group delay data, the accuracy of short-arc orbit determination is improved to <75 m. Meanwhile, by combining the VLBI phase delay data, the accuracy of the short-arc orbit determination is improved to ~ 10 m.

Key words: deep space explore; differential VLBI; multi-spacecraft precise orbit determination; sample-return

《天文学进展》2012 年征订启事

《天文学进展》是天文学类中文核心期刊。刊物为季刊，2012 年本刊于 2、5、8、11 月中旬出版，每期定价 40 元，全年 160 元（含邮寄费和包装费）。

凡需订阅 2012 年《天文学进展》，请到所在地邮局进行订购。

统一刊号：CN 31-1340/P

邮发代号：4-819

欢迎订阅！谢谢支持！

《天文学进展》编辑部