论文

天马望远镜在嫦娥三号测定轨 VLBI 观测中的应用分析

刘庆会*, 贺庆宝, 郑鑫, 吴亚军, 李培佳

中国科学院上海天文台, 上海 200030

*联系人, E-mail: liuqh@shao.ac.cn

收稿日期: 2014-08-26; 接受日期: 2014-11-27; 网络出版日期: 2015-01-20

国家自然科学基金资助项目(批准号: 11273049, 11473059)

摘要 天马望远镜(上海 65 m 射电望远镜)于 2012 年 10 月完成了第一阶段建设并具备了 S/X, L, C 波频段的 VLBI 观测能力. 2013 年 12 月全程参加了嫦娥三号着陆器和月球车 X 频段的 VLBI 测定轨测定任务. 在嫦娥三号中, 利用天马望远镜代替上海佘山 25 m 射电望远镜, 使中国 VLBI 观测网的灵敏度提高至 1.67 倍. 同时, 利用 2 比特采样代替嫦娥二号的 1 比特采样, 使灵敏度提高至 1.38 倍. 上述两项措施使定轨后的 Δ DOR 型 VLBI 时延残差由嫦娥二号时的 1.77 ns 降至嫦娥三号时的 0.67 ns, 着陆器和月球车同波束 VLBI 差分相时延随机误差降至 0.011 ps rms. 本文在介绍天马望远镜及其 X 频段致冷接收和数据采集系统的基础上, 对其在嫦娥三号测定轨 VLBI 观测中的应用进行分析.

关键词 天马望远镜, VLBI, 嫦娥三号, 测定轨

PACS: 95.55.Pe, 95.55.Jz, 95.55.Br

doi: 10.1360/SSPMA2014-00323

天马望远镜(上海 65 m 射电望远镜)于 2009 年开始设计建设, 2012 年 10 月完成了第一阶段建设任务并具备了 S/X, L, C 波段的 VLBI 观测能力. 2012 年 12 月参加了嫦娥二号探测图塔蒂斯小行星时的 S 波段 VLBI 测定轨任务. 2013 年 12 月, 天马望远镜(TM)和北京(BJ)50 m、昆明(KM)40 m、乌鲁木齐(乌站、UR)25 m 射电望远镜以及上海 VLBI 数据处理中心组成的中国 VLBI 观测网, 全程参加了嫦娥三号着陆器和月球车 X 频段的 VLBI 测定轨测定任务. 在嫦娥三号 VLBI 观测中, 天马望远镜代替上海佘山 25 m 射

电望远镜(SH), 使中国 VLBI 观测网 4 面天线的接收面积之和和提高至 1.67 倍, 即观测灵敏度也提高至约 1.67 倍. 同时, 利用 2 比特采样代替嫦娥二号时的 1 比特采样, 灵敏度下降因子由 1 比特时的 0.637 增至 2 比特时的 0.881, 使灵敏度提高 1.38 倍. 嫦娥三号在奔月、绕月、落月探测时, 采用了周期 5 min 的交替观测模式进行河外射电源和探测器的观测, 并在射电源和探测器间进行差分处理, 即 Δ DOR 型 VLBI 观测, 其目的是为了更好除去大气、电离层和观测装置内部时延的影响^[1]. 天马望远镜的加入带来的中国

引用格式: 刘庆会, 贺庆宝, 郑鑫, 等. 天马望远镜在嫦娥三号测定轨 VLBI 观测中的应用分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 039501
Liu Q H, He Q B, Zheng X, et al. Analysis of VLBI observation for Tianma radio telescope in Chang'E-3 orbit determination (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 039501, doi: 10.1360/SSPMA2014-00323

VLBI 网观测灵敏度的提高, 不仅提高了射电源和探测器 VLBI 时延本身的测量精度, 而且使研究者们有更多机会观测距离探测器更近的射电源, 从而更好地除去大气、电离层和观测装置内部时延的影响. 天马望远镜和 2 比特采样的利用使定轨后的 Δ DOR 型 VLBI 时延残差由嫦娥二号时的 1.77 ns 降至 0.67 ns, 着陆器和月球车同波束 VLBI 差分相时延随机误差降至 0.011 ps rms. 中国 VLBI 网为嫦娥三号在奔月、绕月、落月探测时的着陆器测定轨测定, 以及月面探测时的月球车相对测定轨及动作检测做出了重要贡献. 本文在介绍天马望远镜及其 X 频段致冷接收和数据采集系统的基础上, 对其在嫦娥三号测定轨 VLBI 观测中的应用进行分析.

1 天马望远镜及其 X 频段致冷接收和数据采集系统

天马望远镜主要由方位轮轨、座架、主反射面及调整系统、副反射面及调整系统、馈源及换馈系统、致冷接收机系统、VLBI 观测终端及射电天文观测终端、时间频率基准系统及配套系统等组成. 建成后的天马望远镜如图 1 所示, 其主要创新之处有如下几方面. (1) 无缝焊接方位轮轨: 直径 42 m 的轮轨整体焊接, 测量结果表明, 其表面不平度优于 0.4 mm rms. (2) 高精度主反射面: 全息测量及照相测量的结果表明, 在未使用主动面系统进行调整的情况下, 在最佳俯仰角 50°附近其整体面型精度为 0.58 mm rms. (3) 主动

面调整系统: 安装有 1104 个促动器, 能够以 0.015 mm 的精度调整主反射面面形, 克服重力变形等影响, 使主反射面整体面形精度优于 0.3 mm rms. (4) 副反射面六杆并联调整系统: 以 0.05 mm 的精度实现对副反射面 X, Y, Z(天顶方向) 3 个方向的平移调整, 以及以 10" 的精度对 X, Y 两个方向的旋转调整, 从而克服副面撑腿重力变形等影响. (5) 自动换馈机构: 通过旋转馈源安装盘在 1 min 内实现各个馈源的自动更换, 大幅提高观测效率. 另外, 天马望远镜在致冷接收机、终端、控制系统研发等多方面均有创新.

天马望远镜在 2014 年 9 月前已经配备了 L, S, C, X 和 Ku 共 5 个波段的致冷接收机. 接收带宽、系统噪声温度和效率如表 1 所示. 用于嫦娥三号着陆器和月球车 VLBI 观测的天马望远镜 X 频段致冷接收、变频和数据采集系统如图 2 所示. 可接收左旋和右旋圆极化信号(LCP/RCP), 在仰角 20°以上时系统噪声温度小于 32 K. 利用六杆并联调整系统根据不同仰角的模型对副反射面进行调整后, X 频段接收效率优于 55%^[2]. 但在嫦娥三号 VLBI 观测时, 副反射面固定, 接收效率在 80°左右的高仰角和 20°以下的低仰角时略有下降.

嫦娥三号着陆器发射的载波频率为 8470 和 8479 MHz 的两组 DOR 信号和中心频率为 8496 MHz 的数传信号以及月球车发射的中心频率为 8462 MHz 的数传信号或遥测信号经致冷接收机放大后, 利用 8100 MHz 的锁相本振和下变频器分别转换至中心频率为 370, 379, 396, 362 MHz 的中频信号. 这些中频信号经过长约 100 m 的电缆由馈源舱传输至观测室后, 先利用均衡放大器补偿因电缆传输引起的幅频特性变化, 再输入至数据采集终端 CDAS 进行模数转换. 采样后的数字信号由 CDAS 内部的 FPGA 进行处理, 再次下变频至数 MHz 的基频信号, 并按通道输出数据

图 1 (网络版彩图)天马望远镜及其主要创新点

Figure 1 (Color online) Tianma telescope and its main innovations.

表 1 天马望远镜各个波段的接收带宽、系统噪声温度和效率

Table 1 Received bandwidth, system noise temperature and efficiency of Tianma telescope

波段	接收带宽 (GHz)	系统噪声温度 (K)	效率
L	1.25–1.75	26	0.55
S	2.2–2.4	33	0.55
C	4.0–8.0	20	0.55
X	8.2–9.0	32	0.55
Ku	12.0–18.0	34	待测

图 2 天马望远镜 X 波段致冷接收、变频和数据采集系统

Figure 2 X-band cooling receiver, down converter and data acquisition system of Tianma telescope.

经格式器 MK5B 后实时传送至 VLBI 中心进行相关处理. 模数转换的时钟和变频器本振信号均由氢原子钟 10 MHz 的基准信号锁相倍频产生.

2 天马望远镜在嫦娥三号奔月和环月段测定轨 VLBI 观测中的应用分析

嫦娥三号着陆器在 2013 年 12 月 2 日至 5 日的奔月段, 以及 12 月 6 日至 14 日的环月段, 发射两组 DOR 信号用于 VLBI 测定轨. 对嫦娥三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除去大气、电离层及装置内部时延的大部分影响. 两组 DOR 信号除了载波频率 f_c 分别为 8470 和 8479 MHz 有所不同外, 其信号强度、调制方式等皆类似. 以载波频率为中心, 分别调制 ± 65 kHz 的遥测信号、 ± 500 kHz 的测距信号、 ± 3.8 和 ± 19.2 MHz 的 DOR 信号. 在嫦娥三号奔月和环月段的 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. 图 3 为北京、昆明、乌鲁木齐、天马测站在 12 月 9 日接收的嫦娥三号 DOR 信号主载波 f_c 、遥测信号和测距信号. 从图中可清晰分辨出这些信号, 并可分辨出 $f_c \pm 130$ kHz 的二次谐波. 利用 A 处主载波和 B 处噪声的相对功率, 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, 27.0 dB. 虽然接收信号的信噪比与各站望远镜的实际观测仰角有关, 但仍可明显看出天马站接收信号的信噪比最大.

图 4 给出了 2013 年 12 月 9 日约 9 h 的观测得到的北京、昆明、乌鲁木齐、天马测站接收的嫦娥三号着陆器 DOR 信号的主载波信号的信噪比. 由于嫦娥三号环绕月球运动, 且有时飞至月球背面, 故在约 9 h 的观测时间内共有 5 个弧段的观测数据. 在每个弧段内, 每个测站接收信号的信噪比都呈现出周期性的变化, 其主要起因是嫦娥三号姿态变化引起的等效全向辐射功率(EIRP)变化、天线波束内接收到的月球背景噪声的变化等引起. 北京、昆明、乌鲁木齐、天马测站的主载波信号在约 9 h 观测的平均信噪比分别为 18.2, 18.4, 13.9, 23.3 dB. 天马测站比乌鲁木齐测站强 9.4 dB、比北京和昆明测站强约 5 dB, 综合性地反映出天马望远镜的强大接收能力.

对北京、昆明、乌鲁木齐、天马测站记录的 f_c , $f_c - 19.2$ MHz, $f_c + 3.8$ MHz, $f_c + 19.2$ MHz 等 4 个通道的嫦娥三号 DOR 信号和射电源信号分别进行相关处理, 可得到 6 条基线 4 个通道的相关相位. 各通道的 DOR 信号和射电源信号的相关相位进行差分后, 利用主载波通道 2 MHz 带宽内信号的相关相位对频率进行拟合处理, 可求出单通道内的群时延. 利用单通道内的群时延和 4 个通道的相关相位进行带宽综合处理可得到嫦娥三号 DOR 信号的带宽综合群时延, 称为 Δ DOR 型 VLBI 时延. 对大气和电离层时延进一步修正后, 利用修正后的 VLBI 时延和测速测距数据, 对嫦娥三号进行轨道计算, 可同时得到定轨后的精密轨道和 VLBI 时延残差.

图 5 给出了嫦娥三号在 12 月 9 日环月期间 6 条基线定轨后的 VLBI 时延残差. 北京-昆明、北京-乌

图 3 (a) 北京、(b) 昆明、(c) 乌鲁木齐、(d) 天马测站在 12 月 9 日接收的嫦娥三号的 DOR 信号主载波、遥测信号和测距信号

Figure 3 Spectra of CE-3 main carrier, DOR signal, ranging and telemetry signals received on December 9 by using (a) Beijing, (b) Kunming, (c) Urumqi and (d) Tianma stations.

图 4 (a) 北京、(b) 昆明、(c) 乌鲁木齐、(d) 天马测站接收的嫦娥三号 DOR 信号的主载波信号的信噪比

Figure 4 Signal-to-noise ratio of the main carrier of CE-3 DOR signal received by using (a) Beijing, (b) Kunming, (c) Urumqi and (d) Tianma stations.

图 5 嫦娥三号六条基线定轨后的 VLBI 时延残差

Figure 5 CE-3 VLBI residual delays after orbit determination on six baselines.

鲁木齐、北京-天马、昆明-乌鲁木齐、昆明-天马、乌鲁木齐-天马 6 条基线的 VLBI 时延残差分别为 0.171, 0.164, 0.057, 0.107, 0.162, 0.185 ns rms. 从图中可以看出, 时延残差有整体性弯曲现象, 特别是北京-昆明、北京-乌鲁木齐、昆明-天马等基线. 在观测开始和结束的时间段内残差变大, 其主要原因是这些观测弧段仰角较低, 在 10° – 20° 之间, 大气和电离层的影响较大, 即使利用射电源校正和 GPS 数据进行大气和电离层时延改正仍无法完全去除其影响所致.

在嫦娥二号中也开展了 Δ DOR 型 VLBI 试观测. 嫦娥二号和三号的 DOR 信号本身的强度、带宽以及 VLBI 数据处理方法都类似. 但在嫦娥二号中, 上海站利用了上海佘山 25 m 射电望远镜且是 1 bit 采样; 而在嫦娥三号中, 则利用了 65 m 天马望远镜且是 2 bit 采样. 图 6 给出了嫦娥二号在 2011 年 4 月 4 日环月段的 6 条基线定轨后的 VLBI 时延残差. 北京-昆明、北京-乌鲁木齐、北京-佘山、昆明-乌鲁木齐、昆明-佘山、乌鲁木齐-佘山 6 条基线的 VLBI 时延残差分别为 1.810, 2.174, 0.812, 2.144, 2.091, 2.242 ns rms, 远大于嫦娥三号的 VLBI 时延残差.

图 7 给出了嫦娥二号和嫦娥三号定轨后的 VLBI 时延残差, 它是利用 6 条基线的时延残差的均方根计算得出的. 嫦娥二号有 18 天的数据, 由图 7(a)可知,

除了第 1 次和第 2 次奔月段的 VLBI 时延残差较小外, 其他 16 次环月段的时延残差在 1–3 ns 之间, 18 次观测的 VLBI 时延残差的平均值为 1.77 ns. 嫦娥三号共有 12 天的数据, 奔月段 4 天、环月段 8 天. 由图 7(b)可知, 12 天的 VLBI 时延残差在 0.4–1.0 ns 之间, 其平均值为 0.67 ns, 为嫦娥二号 VLBI 时延残差的 38%.

嫦娥三号定轨后的 VLBI 时延残差与嫦娥二号相比大幅减小的主要原因有两个: 嫦娥三号利用 65 m 天马望远镜代替佘山 25 m 射电望远镜, 使我国 VLBI 网的观测灵敏度提高至 1.67 倍, 特别是减小了与天马望远镜有关的 3 条基线的 VLBI 时延测量误差. 嫦娥三号利用 2 比特采样代替嫦娥二号的 1 比特采样, 使接收灵敏度提高至 1.38 倍, 对 6 条基线的 VLBI 时延测量误差的减小均有贡献. 这两个改进措施不仅降低了射电源和探测器 VLBI 时延本身的测量误差, 而且使研究者们有更多机会观测距离探测器更近的射电源, 从而更好地除去大气、电离层和观测装置内部时延的影响, 使定轨后的 VLBI 时延残差由嫦娥二号时的 1.77 ns 降至 0.67 ns.

在文献[3]中, 对基于 VLBI 和测速测距数据的嫦娥三号定轨和定位精度进行了详细的分析^[3]. 在地月转移段, 由于没有重复性且轨道机动多, 较难利用重叠轨道方法评估精度. 取而代之, 比较了上海天文台

图 6 嫦娥二号 6 条基线定轨后的 VLBI 时延残差

Figure 6 CE-2 VLBI residual delays after orbit determination on six baselines.

图 7 (a) 嫦娥二号和(b) 嫦娥三号定轨后的 VLBI 时延残差

Figure 7 VLBI residual delays after orbit determination of (a) CE-2 and (b) CE-3.

和北京航天飞行控制中心分别独立定轨的结果, 地月转移阶段的轨道互差小于 1 km. 在环月段, 利用重叠轨道方法评估了 100 km×100 km 和 100 km×15 km 轨道的定轨精度. 结果表明, 100 km×100 km 轨道的定轨精度约为 20 m, 而 100 km×15 km 轨道的定轨精度约为 30 m, 后者定轨精度略低的原因主要是月球重力场的影响所致. 另外, 利用 VLBI 数据和统计定位方法确定了着陆器在月面的位置, 并和 NASA 基于月球卫星 LRO 的图像数据得到的位置比较, 结果表明, 基于 VLBI 和测速测距数据的嫦娥三号着陆器定位精度约为 50 m.

3 天马望远镜在嫦娥三号月球车测定位同波束 VLBI 观测中的应用分析

在月球车和着陆器于 2013 年 12 月 14 日成功分离后, 为了准确测量月球车相对于着陆器的位置, 利用了同波束 VLBI 技术^[4,5]. 同波束 VLBI 技术即利用射电望远镜的主波束对月球车和着陆器同时进行观测, 通过在月球车和着陆器间对 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, 从而得到准确反映月球车和着陆器相对位置的差分时延观测量^[6,7].

在嫦娥三号落月后, 着陆器每天连续发送约 10 h

的数传信号. 月球车每天连续发送约 8 h 的遥测信号, 在另外约 2 h 内发送数传信号. 在此期间, 利用带宽 8 MHz 的 2 个通道分别记录着陆器和月球车的信号. 图 8 给出了北京、昆明、乌鲁木齐、天马接收的着陆器带宽 5 MHz 的数传信号的频谱. 利用中心峰值 A 处和谷值 B 处的相对功率计算得到的北京、昆明、乌鲁木齐、天马测站接收的着陆器数传信号的信噪比分别为 19.7, 19.5, 14.2, 22.7 dB. 图 9 给出了月球车遥测信号的频谱. 北京、昆明、乌鲁木齐、天马测

图 8 (a) 北京、(b) 昆明、(c) 乌鲁木齐、(d) 天马测站接收的嫦娥三号着陆器数传信号的频谱

Figure 8 Spectra of data transmission signals of CE-3 lander received by using (a) Beijing, (b) Kunming, (c) Urumqi and (d) Tianma stations.

图 9 (a) 北京、(b) 昆明、(c) 乌鲁木齐、(d) 天马测站接收的嫦娥三号月球车遥测信号的频谱

Figure 9 Spectra of telemetry signals of CE-3 rover received by using (a) Beijing, (b) Kunming, (c) Urumqi and (d) Tianma stations.

站接收的月球车遥测信号的信噪比分别为 12.1, 11.3, 6.8, 16.5 dB. 结果表明, 天马望远镜的接收能力最强.

4 个测站的 VLBI 原始观测数据经网络实时传送至上海 VLBI 数据处理中心, 月球车和着陆器的信号用同一个时延预测值模型进行相关处理, 得到着陆器和月球车的相关处理数据. 利用着陆器和月球车信号的相关谱幅度最大处附近的数据分别提取着陆器和月球车的相关相位, 可得到月球车相对于着陆器的差分相时延 $\Delta\tau_{pd}(t)$:

$$\Delta\tau_{pd}(t) = \frac{\varphi_R(t)}{2\pi f_R(t)} - \frac{\varphi_L(t)}{2\pi f_L(t)} + C, \quad (1)$$

其中, $\varphi_R(t)$, $\varphi_L(t)$ 分别为月球车和着陆器的相关相位时间序列, $f_R(t)=8462$ MHz, $f_L(t)=8496$ MHz 分别为月球车和着陆器的射频接收频率. 在一段连续的观测弧度内 C 为常数, 主要由 $\varphi_R(t)$ 和 $\varphi_L(t)$ 中的整周模糊度引起.

图 10(a)给出了 2013 年 12 月 23 日的月球车和着陆器 6 条基线的差分相时延. 在此观测时段内, 月球车停止不动, 与着陆器的距离约 26 m. 由图 10(a)可知, 在 0.8 h 的观测时段内, 各条基线的时延有数 ps 至十几 ps 的变化, 这是由于对月球车与着陆器信号进行相关处理时利用同一时延预测模型、月球车与着陆器距离约 26 m、月球和地球的相对运动这 3 个因素所共同引起的. 实际上, 正是利用差分相时延在一段时间内的变化, 实现了对停在某一探测点的月球车的相对定位, 其相对定位精度为 1 m^[3]. 图 10(b)给出了北京-昆明、北京-天马、昆明-天马 3 条基线的闭合差分相时延, 其均方根值为 0.011 ps. 图 10(c)给出了北京-昆明、北京-乌鲁木齐、昆明-乌鲁木齐 3 条基线的闭合差分相时延, 其均方根值为 0.018 ps. 可以看出利用天马望远镜可得到随机误差更小的差分相时延数据.

在文献[8]和[9]中, 对基于差分相时延数据的月球车相对定位和动作监测结果进行了详细的分析^[8,9]. 结果表明, 利用随机误差极小的差分相时延数据, 不仅实现了误差 1 m 的月球车相对定位, 并能以数厘米的灵敏度监测出月球车的移动、转弯等动作.

由上可知, 天马望远镜成功完成了嫦娥三号 VLBI 测定轨任务, 并对 VLBI 时延测量精度和嫦娥三号定轨定位精度的提高做出了贡献. 另一方面, 天

图 10 (网络版彩图)(a) 嫦娥三号着陆器和月球车的六条基线的差分相位时延; (b) 北京-昆明、北京-天马、昆明-天马和(c) 北京-昆明、北京-乌鲁木齐、昆明-乌鲁木齐三条基线的闭合差分相位时延

Figure 10 (Color online) (a) Differential phase delay of CE-3 rover and lander on six baselines, closure differential phase delay of (b) Beijing-Kunming, Beijing-Tianma and Kunming-Tianma, and (c) Beijing-Kunming, Beijing-Urumqi, and Kunming-Urumqi baselines.

马望远镜等大口径望远镜的主波束变窄, 对用于探测器跟踪的轨道预测精度提出了更高的要求. 在嫦娥三号中, 即使是在轨道预测误差最大的动力下降段, 天马望远镜也成功完成了探测器的跟踪, 说明我国对探测器轨道的预测能力达到了较高水平. 另外, 有时还存在望远镜灵敏度过高带来探测器信号溢出的问题. 实际上, 在嫦娥三号着陆器数传信号的 VLBI 观测中, 天马望远镜曾出现了信号溢出问题, 导致相关相位中出现了周期为 10 多秒的抖动现象. 采取在天马望远镜接收系统中增加约 10 db 衰减器的措施解决了此类问题, 图 10 的结果也证明了这一

结论.

4 结论

嫦娥三号 VLBI 观测中, 天马望远镜和 2 比特采样的应用, 使着陆器定轨后的 VLBI 时延残差降至 0.67 ns rms, 着陆器和月球车同波束 VLBI 差分相位时延随机误差降至 0.011 ps rms. 天马望远镜对嫦娥三号 VLBI 测定轨定位的成功完成, 证明了其在 VLBI 观测中的能力, 将在今后的深空探测器 VLBI 测定轨和行星科学研究中发挥更重要的作用.

参考文献

- Wu W R, Wang G L, Jie D G, et al. High-accuracy VLBI technique using Δ DOR signals (in Chinese). *Sci Sin-Inf Sci*, 2013, 43: 185–196 [吴伟仁, 王广利, 节德刚, 等. 基于 Δ DOR 信号的高精度 VLBI 技术. *中国科学: 信息科学*, 2013, 43: 185–196]
- Wang J Q, Yu L F, Zhao R B, et al. Sub-reflector model depending on elevations and performance evaluation for TM65m radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 1232–1240 [王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. TM65 m 射电望远镜副面随动模型及性能评估. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 1232–1240]
- Huang Y, Chang S Q, Li P J, et al. Orbit determination of Chang'E 3 and positioning of the lander and the rover. *Chin Sci Bull*, 2014, 59: 3858–3867 [黄勇, 吕胜骐, 李培佳, 等. “嫦娥三号”月球探测器的轨道确定和月面定位. *科学通报*, 2014, 59: 2268–2277]
- Liu Q H, Kikuchi F, Tsuruta S, et al. Effects of phase characteristics of telescopes on same-beam differential VLBI. *IEEE T Antenn Propag*, 2007, 55: 1466–1470
- Liu Q H, Kikuchi F, Matsumoto K, et al. Same-beam VLBI observations of SELENE for improving lunar gravity field model. *Radio Sci*, 2010, 45: RS2004, doi: 10.1029/2009RS004203
- 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 (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2010, 53: 571–578 [刘庆会, 陈明, 熊蔚明, 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. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, 40: 253–260]
- Chen M, Liu Q H, Wu Y J, et al. Relative position determination of a lunar rover using biased differential phase delay of same-beam VLBI. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2011, 54: 1–12
- 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.

Sci Sin-Phy Mech Astron, 2014, 44: 872–878 [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. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 872–878]

- 9 Liu Q H, Zheng X, Huang Y, et al. Monitoring motion and measuring relative position of the Chang'E-3 rover. Radio Sci, 2014, 49: 1080–1086

Analysis of VLBI observation for Tianma radio telescope in Chang'E-3 orbit determination

LIU QingHui^{*}, HE QingBao, ZHENG Xin, WU YaJun & LI PeiJia

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

Tianma radio telescope (Shanghai 65-m radio telescope) finished the first stage of construction in October 2012, and was capable of doing VLBI observation in S/X, L, C band. It fully engaged in the mission of Chang'E-3 orbit and position determination with VLBI tracking in X band in December 2013. In Chang'E-3 mission, Tianma radio telescope replaced Shanghai 25-m radio telescope, thus improved the sensitivity of Chinese VLBI net by 1.67 times. Meanwhile, using 2 bits quantization in Chang'E-3 instead of 1 bit quantization in Chang'E-2 made the sensitivity 1.38 times higher. After implementing the above 2 measures, the Δ DOR VLBI residual delay after determining orbit of Chang'E-3 was 0.67 ns, while the VLBI residual delay of Chang'E-2 was 1.77 ns. Furthermore, error of differential phase delay between the lander and rover of Chang'E-3 was down to 0.011 ps rms. This article introduces Tianma radio telescope and the system of X-band receiver and data acquisition, and analyses its application in Chang'E-3 mission.

Tianma radio telescope, VLBI, Chang'E-3, orbit determination

PACS: 95.55.Pe, 95.55.Jz, 95.55.Br

doi: 10.1360/SSPMA2014-00323