VLBI 相位参考成像方法用于玉兔巡视器精确定位

童锋贤^{①②③}, 郑为民^{①②*}, 舒逢春^{①②}

① 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

② 中国科学院射电天文重点实验室, 南京 210008;

③ 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: zhwm@shao.ac.cn

2014-06-10 收稿, 2014-07-04 接受, 2014-10-16 网络版发表

国家自然科学基金(11173052, 11373061)、国家高技术研究发展计划(2012AA121603)、上海市优秀学术带头人项目(14XD1404300)和上海市导航定位重点实验室项目(06DZ22101)资助

摘要 实时高精度 VLBI 技术在嫦娥三号任务中的成功应用, 为探测器的成功落月及月面定位提供了重要保障. 目前使用 VLBI 群时延及测距数据获得的玉兔巡视器在月面上相对着陆器的位置精度约 100 m. 为获得更精确的巡视器位置, 在中国 VLBI 网同波束观测条件下, 将天文相位参考成像方法成功用于月面定位. 先将探月 VLBI 软件相关处理结果转为通用 FITS-ID1 数据格式, 然后用天文成像软件对着陆器和巡视器进行相位参考成像, 得到巡视器天线相对于着陆器天线的角位置. 在此基础上, 提出了新的探测器月面相对定位算法, 获得了玉兔相对于着陆器高精度月面位置. 由于利用了同一基带转换器数据进行相位参考成像, 消除了共同的系统误差, 因此获得了极高的定位精度. 本文分别完成了玉兔离开着陆器前, 两器处于初始零位条件时, 以及两器在不同位置相互拍照时的相对位置测量. 理论分析、零位测量及与视觉定位结果的比较表明, 采用 VLBI 相位参考法获得的玉兔巡视器的相对位置精度约为 1 m. 本方法可用于未来月球及行星表面巡视器相对位置精密测量、导航与视觉定位结果的标定.

关键词

月面定位
相位参考定位
VLBI
FITS-ID1
玉兔月球车

嫦娥三号(CE-3)工程已圆满成功, 这是中国第一次实现在地外软着陆的探测器, 也是自阿波罗计划结束后重返月球的第一个月球软着陆的探测器. 中国 VLBI 网(CVN)成功地将实时高精度 VLBI 技术应用于 CE-3 任务, 为探测器的成功落月及月面定位提供了重要保障^[1]. 由于 VLBI 时延预测精度的提高、 Δ DOR(delta differential one-way ranging)技术^[2]、实时 VLBI 的首次采用, 使 CE-3 着陆器的实时定位精度达到 100 m, 数据实时性则好于 1 min^[1,3,4].

2013 年 12 月 15 日, CE-3 成功落月以后, 玉兔巡视器被释放, 围绕着陆器在半径 10 m 以内多点进行相互拍照. 在玉兔与着陆器(两器)互拍结束后, 玉兔开始月面科学探测, 直至 2014 年 1 月 26 日, 玉兔发生故障不再移动. 在两器距离较近时, 可采用玉

兔搭载的立体相机进行视觉定位, 当距离较远时, 可采用 VLBI 方法进行定位, 并对视觉结果标定. 当两器距离小于 100 m, 现有 Δ DOR 群时延的相对位置测量精度也在 100 m 左右^[1], 为在今后类似的月面科学探测中获取更高的玉兔相对位置精度, 需要考虑其他方法.

VLBI 相位参考成像是一种高精度天文测量技术, 已用于射电源结构及空间探测器的精密定位^[2,5-7]. 以美国 VLBA(very long baseline array)为例, 其最长基线达到 8000 km. 在 X 频段、信噪比为 10 时, VLBA 的理论测角精度约为 15 μ as. 由于系统误差的存在, 实际测量精度可达约 0.15 mas, 为理论精度的 10 倍^[5]. CVN 所属的上海、北京、新疆和云南测站, 在垂直于目标视线方向的 UV 平面投影的最长基线长度约为

引用格式: 童锋贤, 郑为民, 舒逢春. VLBI 相位参考成像方法用于玉兔巡视器精确定位. 科学通报, 2014, 59: 3362–3369

Tong F X, Zheng W M, Shu F C. Accurate relative positioning of Yutu lunar rover using VLBI phase-referencing mapping technology (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 3362–3369, doi: 10.1360/N972014-00578

2000 km. 据此推算, 当信噪比为 40 时, CVN 可获得 0.15 mas 的角位置精度, 在地月距离上相当于约 0.3 m 的位置精度. 因此只要信号的信噪比足够高, 就可利用相位参考方法对玉兔精确定位.

美国和欧洲近年来已将相位参考成像法应用于深空探测器的精密测量实验, 效果明显. 1997 年 10 月 15 日, Cassini-Huygens 号土星探测器于美国的肯尼迪航天中心发射升空并于 2004 年 7 月到达土星周围. 从 2006 年 10 月开始美国国家射电天文台(NRAO)和美国航空航天局(NASA)合作, 对 Cassini-Huygens 号探测器采用相位参考的方法, 成功获得精度优于 1 mas 的探测器角位置(赤经方向小于 0.2 mas、赤纬方向小于 0.4 mas)^[6]. 2011 年欧洲太空局(ESA)和欧洲 VLBI 联合研究所(JIVE)利用欧洲 VLBI 网(EVN)对金星快车(VEX)探测器进行了相位参考成像定位, 角位置精度优于 1 mas^[7]. 但目前未见国外有相位参考方法用于月面或行星表面探测器相对定位的报告.

本文采用相位参考成像的方法, 利用了同波束

观测条件下的观测数据, 先直接获取了两器 X 频段天线之间的相对角位置, 再由相对角位置确定两器机械中心在月球本地坐标系中的位置关系, 获得的玉兔相对位置精度约为 1 m.

1 VLBI 相位参考成像原理

类似于光学望远镜获取目标图像, VLBI 综合孔径望远镜系统可以对射电源进行成像, 得到源的亮度分布. 根据 Van Cittert-Zernike 定理, VLBI 各测站接收的数据经过相关处理后得到的 UV 平面可见度函数相当于在成像透镜焦平面上离散采样, 这实际上是射电源亮度傅里叶变换的空间采样(图 1). 为保证较完整的基线(U,V)覆盖, 需要有较合理 VLBI 测站分布. 经过对可见度数据的反傅里叶变换、去卷积等复杂处理后, 可以恢复源的亮度分布图像^[8]:

$$A(l,m)I(l,m) = \iint_{-\infty}^{+\infty} V(u,v)e^{2\pi i(ul+vm)} du dv, \quad (1)$$

式中 $A(l,m)$ 为天线的有效接收面积, $I(l,m)$ 为源的亮度

图 1 玉兔巡视器与着陆器相位参考成像定位原理

分布, $V(u, v)$ 为可见度数据在 UV 平面上的表示形式. 成像过程采用天文软件 AIPS 和 Difmap 完成^[9].

为提高探测器定位精度, 可以利用位置精确已知的临近河外射电源为参考源, 采用“射电源-探测器-射电源”的观测模式快速交替观测参考源与目标源, 尽量消除 VLBI 观测系统的误差. 为实现相位连接和减小系统误差随时间变化的影响, 在满足信噪比条件下, 应尽量缩短交替观测时间^[10]. 对于 X 波段的相位参考, 射电源与探测器的角距不应大于 4° , 跟踪目标的时间间隔应小于 3 min (<http://www.nrao.edu/~vdhawan/memo3.ps>). 当参考源与目标源的位置十分接近, 处于望远镜同一波束覆盖范围时, 就达到同波束(in-beam)VLBI 观测条件(图 2).

在对玉兔位置测量时, 由于两器距离较近, 符合同波束观测条件, 以着陆器替代河外参考射电源作为参考源, 玉兔为目标源. 此时, 无需交替观测两器, 就能以同一个波束, 在同一时刻且是接收设备的同一通道内接收到两器的信号, 较彻底地消除相位参考时传播介质、仪器装置的延迟, 得到两器的差分相位为 $\Delta\phi$:

$$\Delta\phi = \phi_{\text{tar}} - \phi_{\text{cal}}, \quad (2)$$

式中, $\phi_{\text{tar}}, \phi_{\text{cal}}$ 分别为目标源与校准源的相位. $\Delta\phi$ 包含两器的相对位置关系, 通过傅里叶去卷积操作可得到两器相对位置的图像.

图 2 VLBI 同波束观测

成像后实际得到了玉兔天线相对于着陆器天线的图像. 由于目标距测站的距离较远, 两器天线可视点为点目标, 因此玉兔图像斑点的中心坐标就是两器天线的角位置差. 该角位置差对应于两器天线在地心 J2000.0 坐标系下的赤经、赤纬差. 经过进一步计算与坐标变换, 可将赤经、赤纬差转换为两器机械中心的月面相对位置, 简要流程如图 1 所示.

2 CE-3 两器观测条件与数据预处理

2013 年 12 月 14 日, CE-3 探测器落月后 1 h, 着陆器关闭 DOR 等测控信号, 通过定向天线向地面发送数传信号. 玉兔根据需要使用全向天线发送频率约为 8462 MHz, 带宽约为 2 kHz 的窄带遥测信号和定向天线发送 8496 MHz, 带宽约 8 MHz 的宽带数传信号. 试验利用了玉兔的窄带遥测信号和着陆器的宽带数传信号进行相位参考成像定位. 测站设置数字基带转换器(DBBC)的一个通道接收玉兔发射的遥测信号, 另一个或几个通道接收着陆器的数传信号. 通过合理的 DBBC 带宽设置, 在一个接收玉兔遥测信号的通道内能同时接收到着陆器宽带数传信号(图 3). 本文在采用 in-beam 相位参考成像定位时, 利用了这一特殊观测条件, 较彻底地消除 VLBI 系统时延与相位误差, 提高了测量精度.

选取了 2013 年 12 月 14~15 日和 20~21 日的 CVN 观测数据进行相位参考成像. 14 日的观测采用带宽 2 MHz 和 2 bit 模式接收两器信号, 相关处理机积分时间为 0.983040 s. 其他时间段采用带宽 8 MHz 和 2 bit 模式接收两器信号, 积分时间为 0.983040 s.

12 月 14 日, 两器尚未分离, 构成特殊的零位观测条件. 由于此时两器的几何位置精确已知, 通过比较相位参考测定的玉兔位置与零位值, 可评判相位参考成像定位的准确度. 12 月 15~21 日, 着陆器释放玉兔后, 玉兔围绕着陆器在 A~E 五个点进行两器互拍. 对以上 6 个位置点进行了同波束观测条件下的相位参考成像定位.

因为上海 VLBI 中心的软件相关处理机输出的数据格式主要用于探月工程, 其数据格式较简单, 不能直接利用现有天文软件. 为此, 在对两器进行相位参考成像定位时, 需先用 CVN 的处理机输出可见度数据, 然后结合观测纲要等文件生成 UVW 文件, 最后生成 FITS-IDI 数据^[11], 供 AIPS, difmap 等软件对两器相位参考成像定位使用.

图3 着陆器-玉兔巡视器的相位谱与幅度谱

3 着陆器与玉兔巡视器相位参考成像处理

进行 in-beam 相位参考成像时,以着陆器为参考源、玉兔为目标源。先将 FITS-IDI 数据读进 AIPS,并将通道内信噪比较低的数据标记去除,用着陆器的可见度数据来校准玉兔的可见度数据,然后将校准后的数据导出 AIPS;然后运行 difmap 软件读取该校准后数据,执行去卷积等操作,获取两器在观测时段内赤经、赤纬差的综合值。取所选观测时段的中间时刻作为该综合赤经、赤纬差的参考时刻。图 4 为相位参考成像所得的玉兔在 A~E 互拍点时相对于着陆器在天球中的位置关系。图 4 中的坐标为玉兔相对于着陆器的赤经、赤纬差(表 1)。

4 由角位置计算月面相对位置

通过相位参考成像得到的是两器天线中心在地

图4 采用 CVN 软件处理机 FITS-IDI 数据获取的玉兔在 A~E 点处的成像合成结果

表 1 相位参考方法获得的玉兔相对于着陆器的角位置

停泊点	时刻(年-月-日, 时:分:秒, UTC)	在 J2000.0 下的玉兔角位置	
		RA(mas)	DEC(mas)
O	2013-12-14, 17:46:41	-0.27	0.68
A	2013-12-15, 15:00:00	-3.36	3.24
B	2013-12-15, 18:00:00	-6.26	0.93
C	2013-12-20, 17:07:55	-4.59	-1.02
D	2013-12-20, 22:30:25	-0.22	-4.18
E	2013-12-21, 20:42:37	-0.46	-8.29

心 J2000.0 坐标系中的赤经、赤纬差. 为得到玉兔在月面本地北-东-地坐标系(以着陆器为原点, X 轴指向北, Y 轴指向东, Z 轴指向月心)的相对位置, 需根据赤经、赤纬差先求得玉兔天线相对于着陆器天线的位置, 再结合两器的姿态、位置及几何尺寸参数, 将天线之间的位置转换到两器机械中心之间的位置. 本文提出了一种根据两器天线之间的赤经、赤纬差计算月面两器天线间相对位置的方法.

如图 5 所示, A 为着陆器, 在地心 J2000.0 坐标系中的位置矢量为 $\overrightarrow{OA}$; B 为玉兔巡视器, 在地心 J2000.0 坐标系中的位置矢量为 $\overrightarrow{OB}$; B 相对 A 点在地心 J2000.0 坐标系中的赤经、赤纬差为 $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$; B 点相对 A 点的位置矢量为 $\overrightarrow{AB}$; 在以 A 点为原点的北-东-地坐标系中的两器机械中心的高程差为 H_0 (图 6). 以上描述的各量中除 $\overrightarrow{AB}$ 外, 其余均为已知量, 获得 $\overrightarrow{AB}$ 后就

图 5 由两器赤经、赤纬差求月面相对位置

可得到 B 以 A 点为原点的北-东-地坐标系中的位置.

在地月距离尺度上, $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ 及 ΔR 相对于 $\overrightarrow{OA}$ 均可视为小量. 所以, 可以在 A 点处用泰勒级数展开的方法计算相对位置矢量 $\overrightarrow{AB}$ (图 5). 由 $\overrightarrow{OA}$ 可求得 A 的地心距 d_0 及其在天球上的赤经、赤纬 (α, δ) , 然后在 A 点处以微小的偏移量 $(\Delta\alpha, \Delta\delta)$ 及 $\Delta R = 0$ 进行泰勒级数展开得到 $\overrightarrow{OA'}$ (式(3)), ΔR 为 d_0 存在的微小偏差.

$$\overrightarrow{OA'} = \overrightarrow{OA} + d_0 \cdot \begin{bmatrix} -\Delta\delta \cdot \sin \delta \cdot \cos \alpha - \Delta\alpha \cdot \cos \delta \cdot \sin \alpha \\ -\Delta\delta \cdot \sin \delta \cdot \sin \alpha + \Delta\alpha \cdot \cos \delta \cdot \cos \alpha \\ \Delta\delta \cdot \cos \delta \end{bmatrix} + \Delta R \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta \cdot \cos \alpha \\ \cos \delta \cdot \sin \alpha \\ \sin \delta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由 $\overrightarrow{OA'} = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AA'}$ 及式(3)得到

$$\overrightarrow{AA'} = d_0 \cdot \begin{bmatrix} -\Delta\delta \cdot \sin \delta \cdot \cos \alpha - \Delta\alpha \cdot \cos \delta \cdot \sin \alpha \\ -\Delta\delta \cdot \sin \delta \cdot \sin \alpha + \Delta\alpha \cdot \cos \delta \cdot \cos \alpha \\ \Delta\delta \cdot \cos \delta \end{bmatrix} + \Delta R \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta \cdot \cos \alpha \\ \cos \delta \cdot \sin \alpha \\ \sin \delta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

为计算 $\overrightarrow{AB}$, 只需在 $\overrightarrow{OA'}$ 的方向上移动 ΔR 至 B 点, 使 A' 与 B 点重合, 即 $\overrightarrow{AA'} = \overrightarrow{AB}$. 此时 $\overrightarrow{AB}$ 在月面以 A 点为原点的北-东-地坐标系中的高程应为 H_0 .

将式(4)中的 $\overrightarrow{AA'}$ 转换到月面北-东-地坐标系中的旋转矩阵记为 R_{c2m} (限于篇幅, 略去具体表达式), 则经过 R_{c2m} 旋转后得到的北-东-地中的坐标为记为 (x_1, y_1, h_1) , 即

图 6 玉兔巡视器的全向天线与着陆器的定向天线之间的高度差

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ h_1 \end{bmatrix} = d_0 \cdot R_{c2m} \cdot \begin{bmatrix} -\Delta\delta \cdot \sin\delta \cdot \cos\alpha - \Delta\alpha \cdot \cos\delta \cdot \sin\alpha \\ -\Delta\delta \cdot \sin\delta \cdot \sin\alpha + \Delta\alpha \cdot \cos\delta \cdot \cos\alpha \\ \Delta\delta \cdot \cos\delta \end{bmatrix} + \Delta R \cdot R_{c2m} \cdot \begin{bmatrix} \cos\delta \cdot \cos\alpha \\ \cos\delta \cdot \sin\alpha \\ \sin\delta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由于只改变 ΔR 的值, 所以根据式(5), 可以得到 ΔR 与 h_1 的线性关系式: $h_1=h_0+\Delta R \cdot K$, h_0 , K 在该时刻为某一常数. 根据这个线性关系可以求得在 $\overrightarrow{OA'}$ 的方向上需要移动的真实距离 ΔR , 然后将该 ΔR 代入式(4), 求得 $\overrightarrow{AB}$ (此时 A' 与 B 点重合), 进而求得 B 在以 A 点为原点的北-东-地坐标系中位置.

两器机械中心和天线中心不重合, 且玉兔位置应以两器机械中心的相对位置表示. 为确定两器机械中心在月面上的相对位置, 需依据两器的几何设计尺寸, 通过坐标变换, 将天线位置转换为两器机械中心的坐标, 最终得到北-东-地坐标系中玉兔的位置.

该定位方法同样适用于除月球以外的其他天体上的相对定位, 其误差与 DE/LE 历表误差、参考点在天体上的位置、相对高程差及坐标系统之间的转换精度有关.

5 定位结果及分析

表 2 为两器在 A~E 五个位置互拍时, 采用立体相

机视觉定位与采用成像定位获得的玉兔位置及其差异. 两器天线成像定位表示中间结果, 两器成像定位所获位置以各自机械中心为参考.

根据测量条件可采用 3 种方法评定测量精度. 与视觉定位结果比较可作为第一种方法. 视觉导航系统可直接确定两器机械中心之间的相对位置, 其测量误差为里程的 4%^[12]. 在两器互拍点, 行走 10 m 引起的位置误差约为 0.4 m. 表 2 结果表明, 对于两器相对位置, 成像定位与视觉定位结果的差异均小于 1 m. 若考虑到成像定位本身的精度, 成像定位方法的精度约为 1 m.

2013 年 12 月 14 日, 着陆器成功落月后两器未分离时, 两器信标已经打开. 用成像法测量了此时玉兔的相对位置, 作为零位测量结果(图 7). 由于未分离时, 两器的尺寸及安装天线的位置作为先验值精确已知, 因此采用零位测量结果与先验值比较是另一种外符合评定方法, 能够更为客观地反映成像法的准确度. 表 3 给出的是两器未分离时着陆器的定向天线与玉兔的全向天线之间的关系, 所计算的位置准确度约 0.6 m.

理论估算可作为第三种方法对测量结果进行内符合精度评定. 采用文献[5]中衡量 VLBA 相位参考成像的精度公式:

$$\sigma_{\alpha,\delta} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\text{SNR}} \cdot \frac{\lambda}{B}. \quad (6)$$

表 2 采用视觉定位和成像定位获得的玉兔相对位置(m)

停泊点	坐标方向	视觉定位	两器天线成像定位	两器成像定位	结果差异
A	北	9.03	11.24	9.47	-0.44
	东	1.55	1.24	1.15	0.40
	地	1.19	1.52	1.52	-0.33
B	北	5.00	6.94	5.12	-0.12
	东	8.90	9.28	9.30	-0.40
	地	1.68	1.52	1.52	0.16
C	北	-5.65	-3.52	-5.34	-0.31
	东	8.36	8.84	8.86	-0.50
	地	1.65	1.52	1.52	0.13
D	北	-9.75	-9.03	-9.51	-0.24
	东	0.27	-0.12	0.49	-0.22
	地	1.26	1.52	1.52	-0.26
E	北	-19.77	-18.78	-19.26	-0.51
	东	-0.20	-0.89	-0.29	0.09
	地	1.17	1.52	1.52	-0.35

表 3 零位时玉兔全向天线与着陆器定向天线相对位置(m)

	北	东	地	两天线距离
<i>O</i> 点的成像值	1.20	-0.01	-0.76	1.42
<i>O</i> 点的真实值	1.02	-0.60	-0.76	1.41
差异	0.18	0.59	0.00	0.01

图 7 零位时着陆器定向天线与玉兔巡视器全向天线几何关系(a)和零位时相位参考成像结果(b)

实际观测精度约为式(6)所计算的理论值的 10 倍^[5]。此次观测数据的信噪比在 20~30 左右, 根据公式(6), 信噪比若取为 20, 基线在 *UV* 平面上的投影的长度为 2000 km, 观测波长约为 3.6 cm 时, 其实际测量精度约为 0.3 mas, 对应月球距离约 0.6 m。

综合上述理论与实测结果, 可认为本方法获得的玉兔位置精度约为 1 m。

6 结论与展望

相位参考方法利用校准源的可见度数据来校准

目标源的可见度数据, 从而获取目标源相对于校准源的角位置关系, 达到高精度空间探测器定位的要求。本文利用 CVN 软件处理机的 FITS-IDI 数据, 采用 in-beam 相位参考方法进行空间探测器相对定位, 得到玉兔的相对位置, 精度约 1 m, 验证了 CVN 在空间探测领域采用相位参考方法定位的可行性。在未来的月球与深空探测中, 高精度相位参考成像技术将发挥重要作用, 可以进行月面探测器的绝对与相对定位, 月面巡视器导航和深空探测器精密定位等。

致谢 感谢北京航天飞行控制中心提供的视觉定位比对数据。感谢 VLBI 测轨分系统提供的测量数据。感谢中国科学院上海天文台的洪晓瑜、蒋栋荣、钱志瀚、安涛、黄勇、李培和张波等老师对论文写作的帮助。

参考文献

1 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

2 Lanyi G, Bagri D S, Border J S. Angular position determination of spacecraft by radio interferometry. Proc IEEE, 2007, 95: 2193-2201

3 Zheng W M, Zhang J, Yu Y, et al. Software correlator in Chang'E-3 mission. Proceedings of the Eighth IVS General Meeting. Beijing: Science Press, in Press

4 Zheng W M, Huang Y, Chen Z, et al. Real-time and high accuracy VLBI in CE-3 mission. Proceedings of the Eighth IVS General Meeting. Beijing: Science Press, in Press

- 5 Pradel N, Charlot P, Lestrade J F. Astrometric accuracy of phase-referenced observations with the VLBA and EVN. *Astron Astrophys*, 2006, 452: 1099–1106
- 6 Jones D L, Fomalont E, Dhawan V, et al. VLBA astrometric observations of the Cassini spacecraft at Saturn. *Astron J*, 2011, 141: 29–38
- 7 Duev D A, Calvés G M, Pogrebenko S V, et al. Spacecraft VLBI and Doppler tracking: Algorithms and implementation. *Astron Astrophys*, 2012, 541: 849–858
- 8 赵光耀. M87 喷流中亮结 HST-1 的多频多历元 VLA 偏振观测研究与 3C66A&B 的多频多历元 VLBA 相位参考观测研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2013. 15–20
- 9 Imai H. Special Issues in AIPS Analysis of J-Net/VERA Data Version 4. Japan: Kagoshima University, 2010
- 10 钱志瀚, 李金岭. 深长基线干涉测量技术在深空中的应用. 北京: 中国科学技术出版社, 2012. 126–128
- 11 Greisen E W. The FITS Interferometry Data Interchange Convention-Revised Version AIPS Memo 114r, NASA, 2009
- 12 王保丰, 周建亮, 唐歌实, 等. 嫦娥三号巡视器视觉定位方法研究. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44: 452–460

Accurate relative positioning of Yutu lunar rover using VLBI phase-referencing mapping technology

TONG FengXian^{1,2,3}, ZHENG WeiMin^{1,2} & SHU FengChun^{1,2}

¹Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

²Key Laboratory of Radio Astronomy Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Real-time high-accuracy VLBI techniques played an important role in the Chinese lunar exploration mission in executing the soft landing of the Chang'E-3 probe on the lunar surface. To make this possible, in-beam phase referencing was used to obtain accurate relative positioning between the Yutu rover and the lander. The visibilities outputted by the correlator software were initially converted to the uniform FITS-IDI format. Astronomical mapping software, such as AIPS and Difmap, was then used to complete the mapping and angular positioning of the Yutu antenna. A new positioning algorithm was developed to determine the three dimension positions of the rover on the lunar surface. We took advantage of the in-beam observations, for which the signals from lander and rover were received in the same digital terminal, to eliminate system errors. Theoretical analysis, null position testing, and comparisons with visual localization results show that an accuracy of about one meter is achieved in relative positioning. The in-beam phase-referencing technique has potential for use in accurate positioning, navigation, and visual location calibration in future lunar and/or planetary exploration.

lunar surface positioning, phase-referencing, VLBI, FITS-IDI, Yutu lunar rover

doi: 10.1360/N972014-00578