



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 嫦娥五号探测器月面定位与精度分析
作者: 郭丽, 李金岭, 王广利, 黄逸丹, 王文彬, 郑为民
DOI: 10.13203/j.whugis20210226
收稿日期: 2021-05-15
网络首发日期: 2022-07-17
引用格式: 郭丽, 李金岭, 王广利, 黄逸丹, 王文彬, 郑为民. 嫦娥五号探测器月面定位与精度分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210226>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210226

引用格式：

郭丽, 李金岭, 王广利, 等. 嫦娥五号探测器月面定位与精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210226 (GUO Li, LI Jinling, WANG Guangli, et al. Lunar Positioning of CE-5 Detectors and Precision Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210226)

嫦娥五号探测器月面定位与精度分析

郭丽¹, 李金岭¹, 王广利^{1, 2}, 黄逸丹¹, 王文彬¹, 郑为民^{1, 2}

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030

2. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海, 200030

摘要:嫦娥五号(Change' E-5, CE-5)着上组合体与上升器成功着陆于月面。两探测器承担的任务不同, 着陆方式不同, 因而月面位置解算方法不同。本文联合统一 X 波段(United X-band, UXB)深空测距站及甚长基线干涉测量技术(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)的测量数据计算两者的月面位置。采用联合统计定位方法得到 CE-5 着上组合体的月面位置。讨论分别基于数传与侧音差分单向测距(Delta differential one-way ranging, DOR)两种信号对月面位置的影响。观测资料的时间跨度在一定程度上影响定位结果。采用多项式拟合的运动学统计定轨方法归算了上升器受控落月轨迹及落月位置, 并与单点定位结果符合在 40m 内。根据相关处理机最后输出时刻推算得到精确至毫秒的上升器的落月时刻。本文定位方法为探月四期月球极区的月面定位提供重要参考。

关键词:嫦娥五号, 联合统计定位, 运动学统计定轨, 上升器, VLBI, UXB

嫦娥五号(CE-5)探测器由轨道器、上升器、着陆器、返回器四大器件共同组成。CE-5 首次实现了月面采样与起飞、月球轨道交会对接、带样返回等。它的成功标志着我国探月工程“绕、落、回”三步走圆满收官, 对我国进一步开展载人登月、建立月球科研基地、月球科学研究以及后续的星际探测计划等, 具有重要的里程碑意义^[1]。

CE-5 探测器在各个飞行阶段的测定轨定位由统一 X 波段(United X-band, UXB)深空测距站及甚长基线干涉(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)网共同完成。我国 VLBI 网是由北京 50m 口径、上海 65m 口径、昆明 40m 口径、乌鲁木齐 26m 口径四个望远镜及上海天文台 VLBI 数据处理中心(简称 VLBI 中心)构成。VLBI 网观测主要采用的是差分单向测距 ΔDOR (Delta differential one-way ranging) 技术, 通过“5 分钟射电源-5 分钟探测器”的交替循环观测模式, 校准了仪器差、钟差等各类共同误差项。UXB 深空测距站提供双程和三向测量的测距测速数据。三向测量是主站发射上行信号, 经

星上转发给多个副站接收下行信号。该方法实现了同时刻多个测站的测距测速测量, 提高了测量的效率。在着上组合体动力下降与月面着陆、上升器月面起飞等关键弧段以三向测量数据为主。嫦娥系列探测器的测定轨定位取得了一系列的研究成果^[2-14]。CE-3 定轨精度可达 20-30 米^[2], 月面定位精度也好于百米水平。CE-3 首次采用了同波束观测方法, 基于同波束差分相时延测量, 利用高程约束或射电成图方法, 巡视器相对于着陆器的相对位置可达米级水平^[2-3]。

CE-5 探测器调姿频繁, 在不同飞行段, 信号的识别与处理变复杂, VLBI 对探测器各类组合体的 4 组 X 波段 DOR 侧音信号和两个数传信号同时处理, 这些信号分布于 8443.5MHz 到 8504.5MHz 频率范围上。利用数字化采样记录一体化终端, 以 2MHz/通道 \times 16 通道 \times 2bit 方式对全部信号进行数据采集记录, 可同时记录了可达 3 个探测器的 DOR 侧音和数传的共 22 个信号, 通过对这些信标择优选取以保证数据总精度水平。VLBI 时延平均形式精度 0.2ns,

收稿日期:2021-05-15

项目资助:国家自然科学基金(11873076); 探月工程(嫦娥五号)。

第一作者: 郭丽, 副研究员, 主要研究方向为 VLBI 定位与脉冲星天体测量。lguo@shao.ac.cn

最好精度 0.06ns。定轨后测轨 VLBI 群时延残差 rms 平均值小于 0.45ns，时延率数据平均残差 rms 小于 0.45ps/s。

VLBI 网首次实现了对上升器起飞前的高精度月面定位、上升器起飞轨迹测定及初轨判断，首次利用 VLBI 同波束技术完成了轨道器和上升器的实时动态测量、月球轨道交会对接远程导引和交会对接过程的实时监测；首次实现了上升器受控落月轨迹、落月位置和落月时刻的精确确定。本文将主要阐述 CE-5 着上组合体与上升器的月面定位应用及精度分析工作。

1 CE-5 着上组合体的月面定位

要实现月面起飞，CE-5 着上组合体月面位置的精确确定尤为重要。在其动力落月后，侧音 DOR 信号 55 分钟后关闭，VLBI 网则继而对数传信号进行跟踪测量，时延有效数据增加约 38 分钟。尽管基于数传信号的时延观测的精度通常低于侧音 DOR，但是在关键弧段仍然会改善测定轨定位的精度。本文首次讨论不同信号的 VLBI 时延对月面定位的影响。CE-5 的有效数据比 CE-3 落月后的数据明显增加很多，为本文讨论数据长度与定位精度的关系提供了条件，因此本文将讨论这两个方面对月面定位精度的影响。

CE-5 着上组合体于北京时间 2020 年 12 月 1 日 23 时 13 分成功软着陆于月球正面风暴洋西北部的蒙斯·吕姆克山脉附近地带，该地带存在多次火山爆发的明显证据，地质年龄较低，有利于我们进一步了解月球的地质演化等。DOR 侧音信号为点频信号，总带宽为 38MHz，信噪比高；数传信号为波形信号（如图 1 所示），总带宽仅 4-5MHz。因此在没有其他信号干扰情况下，基于 DOR 信号通常比数传信号的时延测量精度高很多。

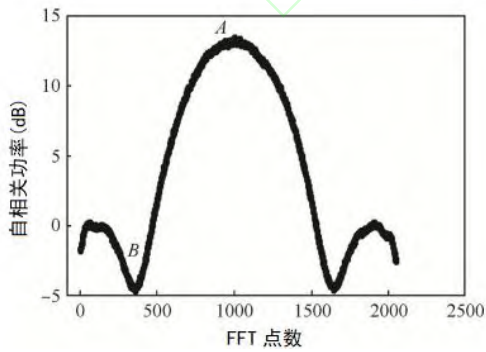


图 1 数传信号示意图

Fig. 1 Sketch map for data-transmission signal

CE-5 着上组合体动力下降及着陆过程，UXB 深空测距站提供三向测距测速测量。主站是佳木斯（JMS，66m）站，副站是喀什（KS，35m）和三亚（SY，15m）站。我们基于这些数据对着上组合体进行了月面定位分析。

定位中采用三向测距、双程测距、VLBI 时延测量值，这里分别对其测量模型进行简要说明。

1.1 测量模型

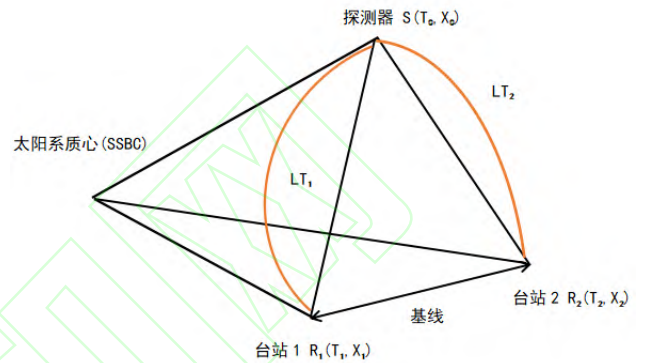


图 2 探测器测量示意图[15]

Fig. 2 Sketch map for measurements of detector

测距和 VLBI 时延的观测方程中可认为是单向测距的组合，对于下行信号，满足：

$$T_1 - T_0 = \frac{R_{01}}{c} + RL T_{01} \quad (1)$$

上式左边是在太阳系质心坐标系（Barycentric Celestial Reference System, BCRS）下，以太阳系质心力学时(TDB)为单位计量的信号从卫星到台站 1 的光行时，它表示为两者距离值 R_{01} 光速的比值与相对论项的修正值 $RL T_{01}$ 之和^[15]。这里 $R_{01} = R_1(T_1) - R_0(T_0)$ ，该光行时通过迭代计算得到精确值。同理可得信号从卫星到达台站 2 的下行信号的光行时 $T_2 - T_0$ ，进而得到 BCRS 下的时延值 $T_2 - T_1$ 。时延测量是地球时（TT）时间为单位的光行时，因此需要做如下转换^[15]，

$$t_2 - t_1 = \left(\frac{T_2 - T_1}{1 - L_C} \cdot \left[1 - \frac{1}{c^2} (\frac{\vec{V}_E^2}{2} + U_E) \right] - \frac{\vec{V}_E \cdot \vec{b}}{c^2} \right) \cdot \left(1 + \frac{\vec{V}_E \cdot \vec{r}_{2,gc}}{c^2} \right)^{-1} \quad (2)$$

类似的，对于双程或三向测距，除了公式(1)的下行信号外，还有上行信号，它满足，

$$T_0 - T_3 = \frac{R_{03}}{c} + RL T_{03} \quad (3)$$

因此测距观测量 ρ ，可以表示成 $(T_1 - T_3)/c$ ，同

时延观测量一样，应该是以 TT 为时间单位的光行时，对于双程测距观测量，两台站是同一测站，两种时间系统的差值的差异目前测量精度上可忽略，而对于三向测距，TDB 与 TT 单位引起的差异可达几十米，必须作相应的时间转换，或时间系统差异的修正^[14]。

测量模型中，除了考虑了上述的相对论效应引起的延迟外，本文定位中，还进行了台站坐标的海潮、固体潮模型修正。

1.2 月面定位方法

由于着陆器在月面上不动，在不考虑月面地形变化时，可认为月面坐标不变。因此本文采用联合统计定位方法对 CE-5 着上组合体进行月面定位，该方法曾应用于 CE-3 的着陆器定位中^[2,3]。联合统计方法将着陆后所有数据用来定位，相比于单点定位方法，增加了有效观测数据的长度，减小随机噪声影响，有利于提高定位的精度。美国月球勘探轨道飞行器 LRO 的 2050 阶月球地形球谐函数模型可约束月面高程值，该模型的高程精度在几十米水平，在地势平缓的地区高程精度更好。CE-5 着上组合体着陆点的地形相比于 CE-3 着陆器的虹湾地区，地势不很平坦，高程约束作用的优势不再明显；另一方面 CE-5 观测数据增加很多，更有利于提高月面定位精度。因此本文的定位计算中，采用直接联合统计定位与结合高程约束两种方法定位，并进行分析比较^[11,13]。

探测器的月面位置在月球固连坐标系（月固系）中描述。月固系有两种，一种是美国喷气实验室（Jet Propulsion Lab, JPL）定义的主轴坐标系，可利用 JPL 的 DE 历表提供的月球天平动的三个欧拉角实现其与月球天球坐标系的转换。第二种是国际天文学联合会（International Astronomical Union, IAU）推荐的平轴坐标系，两者之间可相互转换。通常月球重力场在主轴坐标系下描述，月面地形在平轴坐标系中描述。因此本文的定位采用的是平轴坐标系。

时延 $c\tau_i$ 和测距 ρ_i 观测量，在月固系下的先验位置 (x_0, y_0, z_0) 处线性化，得到偏导数：

$$d(c\tau_i) = \left[\frac{\partial c\tau_i}{\partial (X_i, Y_i, Z_i)} \cdot \frac{\partial (X_i, Y_i, Z_i)}{\partial (x_i, y_i, z_i)} \right] \cdot d(x_0, y_0, z_0) \quad (4)$$

$$d(\rho_i) = \left[\frac{\partial \rho_i}{\partial (X_i, Y_i, Z_i)} \cdot \frac{\partial (X_i, Y_i, Z_i)}{\partial (x_i, y_i, z_i)} \right] \cdot d(x_0, y_0, z_0) \quad (5)$$

上两式中，右端括号内第一项是任一时刻的时延观测量 $c\tau_i$ 和测距观测量 ρ_i 对 BCRS 下卫星的三维位置矢量 (X_i, Y_i, Z_i) 的偏导数，第二项是该时刻 BCRS 下卫星位置 (X_i, Y_i, Z_i) 对月固系下卫星位置矢量 (x_i, y_i, z_i) 的偏导数，表示为天球坐标系对月固坐

标系的转换矩阵，矩阵参数通过读取 DE 历表天平动参数得到。因此月球历表与天平动模型的精度将直接影响月面定位精度，本文采用 JPL 的 DE421 历表，该历表的综合影响仅在米级水平^[13]，目前月面定位精度主要取决于观测量的精度。

1.3 定位策略

在 CE-3 着陆器定位分析中，仅采用三向测距来定位，精度在公里水平，远低于利用两类资料得到的百米精度^[8, 14]，因此时延数据在探测器的月面定位必不可少。VLBI 网先后对 DOR 侧音信号及数传信号跟踪测量了 55 和 38 分钟。如前所述，通常情况下数传信号的精度要远低于 DOR 侧音信号。CE-5 任务中，基于数传信号的时延精度指标要求比 DOR 侧音信号低 10 倍。

为分析基于不同信号的时延数据（策略 1 和 2）及数据长度（策略 3-5）对定位的影响，我们分多种策略展开讨论（如表 1 所示）：利用（1）基于数传信号的时延加测距、（2）基于 DOR 侧音信号的时延与测距数据以及（3-5）在数据资料长度不同情况下定位结果的比对分析。其中策略 3 和 4 中，两种信号时延各占一半时间。

表 1. CE-5 着上组合体月面定位的不同策略的数据采用情况

Tab. 1 Data instructions for different strategies of CE-5 combination of lander and ascender

策略 1	侧音 DOR 时延	55min	测距	150min
策略 2	数传信号时延	38min	测距	150min
策略 3	两信号时延	30min	测距	30min
策略 4	两信号时延	60min	测距	60min
策略 5	全部时延	93min	测距	150min

CE-3 着陆器的月面定位中，不同解算策略，测距的系统差解算值会引起几米到十几米的变化，对最终的定位结果影响显著^[2]。CE-5 中测距数据的精度进一步提升，总测距误差不大于 1m，系统误差的影响对定位影响可以忽略，因此不再解算系统差。测距的星上零值（或固定的系统差）为 300m。月面定位解算参数为月固系下的经纬度和高程值。不同观测资料采用的权重根据实际测量精度来定，分别以时延 0.5ns、测距 1m 的精度给权重，由于不同基线的时延以及不同测距台站的测量精度变化很小，因此不再区分不同基线或者测距的台站。CE-5 着上组合体的月面定位结果由表 2 给出。策略 5 采用全部数据用于定位，考虑到统计定位方法原理，策略 5 的定位精度相对更高。其他策略下与其比较，可以

作为相对精度的参考。表 2 的第 2-4 列分别给出了不同策略下经纬度和高程值（高程值参考于 1737.4km 月面高度），第 5-7 列分别是与策略 5 定位结果在这三个方向上以 m 为单位的差异。表 3 给出了策略 5 的定位残差统计情况。

表 2 和表 3 的结果表明：（1）基于数传信号的时延和测距数据定位精度，远远高于单独采用三向测距公里级的定位精度，与策略 5 的月面定位结果在三个方向上的差异均小于 20m；（2）通过策略 1 与 2 的比较，单独基于数传和侧音 DOR 时延的定位结果三维方向总差异小于 30m，比理论分析的差异小，这表明在一定的系统误差下，统计联合定位方法对随机误差具有有效的压制作用；（3）通过策略 3, 4 和 5 的定位结果可知，1 小时的定位结果相比于全部数据，定位结果在三个方向上差异均小于 15m 内，并无显著差别，这表明 1 小时的测控数据能够给出足够精度的月面位置。

图 3 给出了策略 5 着上组合体的定位后的时延残差情况。残差在 UTC 时 12 分左右开始明显变小，其主要原因是数传信号天线是高增益天线，几乎没有反射，而 DOR 信号的天线是全向天线，到处是反射引起^[6]。我们也采用 2050 阶 LRO 月球地形球谐函数模型约束月面高程，用全部数据来定位，以比较其影响。在高程约束情况下，月面经纬度的值不变，月面高程由地形图给出是 -2544m。与不加约束时的高程值差异为 69m。我们最终的定位结果与 NASA 采用 LRO 探测器成像得到的结果以及与北京中心的结果进行了比对，结果由表 4 给出。其中我们定位结果分为采用与不采用高程约束两种。表 4 最后两行是在经纬度和高程三个方向上的差异，由结果可知，采用高程约束时，我们结果与 NASA 结果在高程上更为符合，也说明，NASA 定位结果确实与光学成像更为接近。由于我们与北京中心采用的是相同的观测数据，在不采用高程约束，我们结果更为符合。

表 2. CE-5 着上组合体月面定位结果
Tab.2 Lunar position of CE-5 combination of lander and ascender

	经度 (°)	纬度 (°)	高程 (m)	经度 (m)	纬度 (m)	高程 (m)
策略 1	-51.9208	43.0594	-2469	15.2	8.9	-6.0
策略 2	-51.9198	43.0595	-2486	12.1	-13.3	11.0
策略 3	-51.9189	43.0596	-2484	-9.1	-13.2	9.0
策略 4	-51.9209	43.0597	-2481	6.1	11.1	6.0
策略 5	-51.9204	43.0599	-2475	-	-	-

表 3 CE-5 着上组合体月面定位残差统计
Tab.3 measurements residuals of CE-5 combination of lander and ascender

观测量	残差 RMS
时延	0.78ns
测距	佳木斯-佳木斯: 1.65m
	喀什-佳木斯: 1.03m

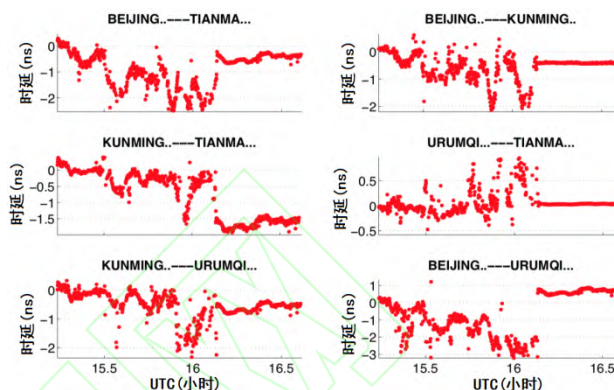


图 3 CE-5 着上组合体月面定位后的时延残差
Fig. 3 Time delay residuals of CE-5 combination of lander and ascender after positioning

表 4. CE-5 着上组合体月面定位结果比较
Tab. 4 Lunar position Comparison of CE-5 combination of lander and ascender

	经度(°)	纬度(°)	高程 (m)
定位结果	-51.9204	43.0599	-2475/-2544
NASA 结果	-51.9161	43.0576	-2570
北京中心	-51.9212	43.0587	-2428
NASA -定位	95.27(m)	-69.74(m)	-95/-26
北京中心-定位	-17.52(m)	-36.32(m)	47/116

注：高程值第 2 列为有高程约束的结果

2 CE-5 上升器受控落月时刻和落月位置的确定

在 CE-5 着上组合体成功实现月面软着陆后，第二日实施了月面采样和样品封装，第三日，上升器携带采样从月面起飞上升，进入环月轨道。12 月 6 日 5 时 42 分上升器与轨返组合体交会对接，并完成采样转移。同日 12 时 35 分，轨返组合体与上升器分离，自此上升器完成了自己的使命。

由于上升器自身没有携带载荷，无法实施其他科学任务。若任其遗留于环月轨道，势必会成为太空垃圾，并对后续月球探测产生不利影响。此外，上升器仍有燃料，精确的控制上升器的落月，也将积累相关测控经验。因此在北京时间 12 月 8 日 6 时 59

分, 上升器受控离轨落月。受控离轨过程中, 喷气制动过程产生的推力难以通过力学模型建模, 常规的动力学定轨方法不再适用。并且上升器受控离轨与着陆器月面软着陆的动力学下降过程也有所不同。月面探测器软着陆涉及制动减速、调姿、悬停避障等一系列复杂操作, 不同的操作使得探测器的轨迹特性差异显著。上升器的受控离轨落月, 只需要对探测器进行制动减速。单点定位方法不受力学模型的影响, 能够实现上述两类情况下的轨迹确定, 但是单点定位依赖于观测精度和几何构型, 在上升器受控落月中, 若采用多项式拟合的运动学统计方法, 能够消除一定噪声影响。本文采用单点定位以及多项式拟合方法归算动力下降过程的轨迹, 并给出两者差异比较。

上升器动力下降结束时, 快速撞击到月面, 由于撞击速度大, 上升器的信号随即消失。根据信号消失时刻可精确推算其落月时刻及对应的月面位置。此外, 当上升器落月后, 高程应该保持不变, 因此理论上也可以根据高程值的变化来判断上升器的月面位置。

2.1 定位原理

本文采用实时单点定位与多项式拟合两种方法为上升器受控落月轨迹进行确定, 单点定位通过几何交汇方法定位, 能够实时给出上升器的位置[7]。多项式拟合的运动学统计定轨方法是将该落月段的轨迹表示为多项式, 通过拟合多项式系数给出整段轨迹。任一时间 t 上升器的位置 (x_i, y_i, z_i) 可表示成,

$$\begin{cases} x_i = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n = \sum_{i=0}^n a_it^i \\ y_i = b_0 + b_1t + b_2t^2 + \dots + b_nt^n = \sum_{i=0}^n b_it^i \\ z_i = c_0 + c_1t + c_2t^2 + \dots + c_nt^n = \sum_{i=0}^n c_it^i \end{cases} \quad (6)$$

这里 (a_i, b_i, c_i) 是上升器位置 (x_i, y_i, z_i) 的多项式系数, 也是该方法中的未知量, 其物理意义是零次项 (a_0, b_0, c_0) 为初始位置, 一次项 (a_1, b_1, c_1) 为初始速度, 二次项 (a_2, b_2, c_2) 对应初始加速度项。多项式拟合定位方法中, 观测方程与式(1)到式(3)一致, 在偏导数为,

$$d(c\tau_i) = \left[\frac{\partial c\tau_i}{\partial(x_i, y_i, z_i)} \cdot \frac{\partial(x_i, y_i, z_i)}{\partial(a_i, b_i, c_i)} \right] \cdot d(a_i, b_i, c_i) \quad (7)$$

$$d(\rho_i) = \left[\frac{\partial \rho_i}{\partial(x_i, y_i, z_i)} \cdot \frac{\partial(x_i, y_i, z_i)}{\partial(a_i, b_i, c_i)} \right] \cdot d(a_i, b_i, c_i) \quad (8)$$

2.2 上升器定位结果及分析

CE-5 上升器于 12 月 8 日 6 时 59 分开始受控离轨, 约 30 分钟后降落在预定落点。数据开始时刻为 6 时 59 分, 结束时刻为 7 时 29 分 37 秒。

多项式拟合方法中, 阶数的选择不同, 定位结果也有所不同。理论上, 阶数越高, 拟合效果更好, 但是会引入过多参数带来的强相关性问题。阶数过少, 拟合不充分, 会有残余周期项未被吸收。通过对观测量的残差进行分析, 采用 5 阶多项式, 拟合效果最好。

本文计算中仅对位置参数进行解算, 采用时延和测距数据进行多项式拟合的运动学统计定轨, 并且与单点定位的结果进行比较, 位置残差在 40m 左右, 三维方向的残差分别是 (9.49, 10.23, 6.28), 两者的星历在三维位置上的差异由图 4 给出, 由图可知, 两者差异并无明显偏差。多项式运动学统计定位的测量残差, 时延残差为 0.53ns, 测距残差为 0.96m。

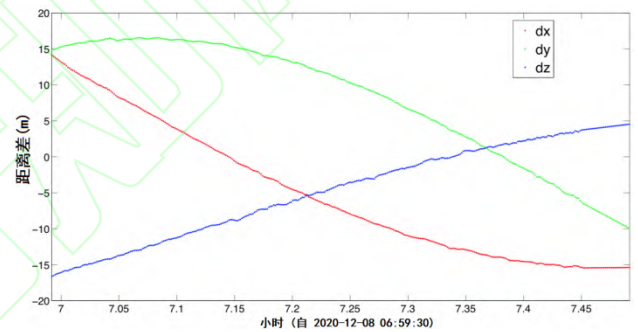


图 4 运动学统计定轨与单点定位星历比较

Fig.4 Position comparison between the methods of kinematic statistical and point positioning.

2.3 上升器落月位置确定

根据相关处理机最后的相关时刻, 扣除上升器的光行时, 推导其受控落月时刻为北京时间 2020 年 12 月 08 日 07 时 29 分 37.829 秒。本文采用单点定位和多项式拟合的运动学统计定轨推算最后落月位置 (如表 5 所示)。由于上升器每个时刻的观测量少, 因此采用 2050 阶 LRO 月球地形球谐函数对落月位置作高程约束, 以提高月面高程值的精度。两种方法得到的上升器在月固系的平轴坐标系下表示, 高程值相对于 1737.4km。可见两者差异在三个方向上均小于 20m。

表 5 CE-5 上升器受控落月位置结果比较

Tab. 5 Lunar position comparison between different methods

	经度(°)	纬度(°)	高程(m)
通报落点	0	-30	-
单点定位方法	-0.2168	-29.8360	1010.4
多项式拟合方法	-0.2171	-29.8361	993.3
两者差异	3.0(m)	7.9(m)	17.1

3 结语

本文分析了 CE-5 着上组合体和上升器的月面定位精度。基于 UXB 深空测距站数据以及 VLBI 的侧音 DOR 和数传信号的时延数据,采用统计联合定位方法确定了 CE-5 着上组合体的月面位置。VLBI 数据对于提高月面位置精度必不可少。尽管基于数传信号的时延精度明显不及侧音 DOR 精度,但是由于统计联合定位方法对于压制随机噪声有显著效果,因此采用精度不同的两种时延定位时,三个方向差异小于 20m。此外,观测数据的不同时间长度对定位结果有一定影响,即观测数据的时间跨度越大,定位结果越好,但是当数据积累 1 小时后,定位结果基本维持不变,因此 1 小时的数据积累在目前的测量精度下可获得足够精度的月面位置。

CE-5 上升器受控离轨落月,与着陆器落月轨控过程相比较简单,开始的减速制动后,上升器即自由飞行,其落月轨迹可用多项式拟合方法描述。经计算,5 阶多项式避免了高阶拟合引入的参数强相关性以及低阶拟合引入的残余周期项问题,可充分拟合上升器落月轨迹。从相关处理机对上升器的最后相关时刻出发,扣除其光行时,推导其落月时刻,并以多项式拟合的运动学定轨方法及单点定位方法计算其落月位置,两者符合小于 40m。

在后续探月四期中,将开展以月球极区为目的地的探测任务,并建立月球科研基地。本文的定位方法为今后深空探测中的月面位置的精确确定具有重要借鉴意义。

致谢

感谢 VLBI 测轨分系统同仁提供本文分析所需的观测数据。

参考文献

[1] Wu Weiren, Liu Jizhong, Tang Yuhua, et al. China Lunar exploration program[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(5): 405-416. (吴伟仁,刘继忠,唐玉华,于登云,于国斌,张哲.中国探月工程[J].深空探测学报, 2019, 6(5): 405-416)

[2] Huang Yong, Chang Shengqi, Li Peijia, et al. *Orbit*

Determination and Lunar Surface Positioning of "Chang'E III" Lunar Probe[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(23): 2268-2277 (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[J]. *科学通报*, 2014, 59(23): 2268-2277)

[3] 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 (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)

[4] 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): 100-108 (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 天文学)*, 2017, 47(2): 100-108)

[5] Zhang Honghua, Guan Yifeng, Huang Xiangyu, et al. Guidance Navigation and Control for Chang'E-3 Powered Descent[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2014, 44(4): 377-384 (张洪华, 关轶峰, 黄翔宇, 等. 嫦娥三号着陆器动力下降的制导导航与控制[J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(4): 377-384)

[6] He Q B, Liu Q H, Zheng X. Chang'E-3 Spacecraft Surface Reflection Causes Turbulence on VLBI Delay[J]. *Radio Science*, 2017, 52(2): 235-247

[7] He Q B, Liu Q H, Li P J, et al. SNR Periodical Variation of Chang'E-3 Spacecraft Orbiting the Moon[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29(2): 470-478

[8] He Q B, Yang Y Z, Li F, et al. Using Cross Correlation to Estimate Doppler Frequency[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(7): 1772-1780

[9] Li Jinling, Liu Li, Zheng Weimin, et al. The Application of Positioning Reduction in the Real-Time Stage of the Chang'E-2 Project[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2011, 41(7): 889-895 (李金岭, 刘鹂, 郑为民, 等. 定位归算在嫦娥二号任务实时阶段的应用[J]. *中国科学: 物理学 天文学*, 2011, 41(7): 889-895)

[10] Chang Shengqi, Huang Yong, Song Yezhi, et al. On Trajectory Determination Strategy for Soft Landing of CE-3 on the Moon[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2014, 33(3): 236-243 (吕胜骐, 黄勇, 宋叶志, 等. 嫦娥三号动力落月段轨迹确定策略[J]. *飞行器测控学报*, 2014, 33(3): 236-243)

- [11] Guo Li, Zhang Yu, Li Jinling, et al. The high precise positioning reduction based on VLBI[J]. *Journal of deep space exploration*, 2020, 7(6): 604-610. (郭丽, 张宇, 李金岭, 等. 基于 VLBI 的高精度定位[J]. 深空探测学报, 2020, 7(6): 604-610)
- [12] Li Peijia, Hu Xiaogong, Huang Yong, et al. Kinematic Statistical Method Using in the Orbit Determination of CE-1[J]. *Progress in Astronomy*, 2010, 28(3): 290-300 (李培佳, 胡小工, 黄勇, 等. 运动学统计定轨法应用于 CE-1 落月轨迹确定[J]. 天文学进展, 2010, 28(3): 290-300)
- [13] Li Peijia, Huang Yong, Chang Shengqi, et al. Positioning for the Chang'E-3 Lander and Rover Using Earth-Based Observations[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(32): 3162-3173 (李培佳, 黄勇, 昌胜骐, 等. 基于地基观测的嫦娥三号着陆器与巡视器高精度定位[J]. 科学通报, 2014, 59(32): 3162-3173)
- [14] Cao Jianfeng, Zhang Yu, Hu Songjie, et al. An Analysis of Precise Positioning and Accuracy of the CE-3 Lunarlander Soft Landing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(2): 274-278 (曹建峰, 张宇, 胡松杰, 等. 嫦娥三号着陆器精确定位与精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(2): 274-278)
- [15] Duev D A, Molera Calvés G, Pogrebenko S V, et al. Spacecraft VLBI and Doppler Tracking: Algorithms and Implementation[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 541: A43

Lunar Positioning of CE-5 Detectors and Precision Analysis

GUO Li¹, LI Jinling¹, WANG Guangli^{1,2}, HUANG Yidan¹, WANG Wenbin¹, ZHENG Weimin^{1,2}

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

2. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China

Abstract: Combination of ascender and lander and ascender of CE-5 detectors successively landed on the moon successfully. The mission and landing modes of these two detectors are different, so we use different methods to determine their landing positions. The lunar positions are obtained with the combined the data from UXB (Unified X-band) tracking network and VLBI (Very Long Baseline Interferometry) network. The method of joint statistical positioning is investigated to determine CE-5 combination of ascender and lander. Although data precision between the data-transmission signal and side-tone signal of DOR (Differential of Range) is marked, their effects on the positioning are not significant. Longer scale of observation data help improving the position precision, but the total length of 1 hour satisfies the accuracy requirements. The kinematic statistical method by polynomial fitting is used to determine the landing trajectory and the lunar position of CE-5 ascender, and is compared with the point positioning method. Their differences are better than 40m. The landing moment of CE-5 ascender is also calculated to millisecond accuracy. Our method will provide a valuable reference for the lunar positioning of detectors in the future Phase IV of Chinese lunar project.

Key Words: Chang'E 5 satellite, Joint statistical positioning, kinematic statistical orbit determination, ascender, Very Long Baseline Interferometry, United X-band

First author: GUO Li, PhD, associate researcher. Specialize in VLBI positioning and pulsar astrometry. Email: lguo@shao.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (11873076); Chang'E Project(Chang'E-5)

网络首发:

标题: 嫦娥五号探测器月面定位与精度分析

作者: 郭丽, 李金岭, 王广利, 黄逸丹, 王文彬, 郑为民

DOI: 10.13203/j.whugis20210226

收稿日期: 2021-05-15

引用格式:

郭丽, 李金岭, 王广利, 等. 嫦娥五号探测器月面定位与精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210226 (GUO Li, LI Jinling, WANG Guangli, et al. Lunar Positioning of CE-5 Detectors and Precision Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20210226)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

嫦娥三号月基光学望远镜几何定位精度分析

严韦, 刘建军, 任鑫, 王奋飞

武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(1): 133-137, 166

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20150162>

