

# 基于 CE-3 的无线电测月研究

唐歌实<sup>1,2</sup>, 曹建峰<sup>1,2</sup>, 韩松涛<sup>1,2</sup>, 胡松杰<sup>1,2</sup>, 任天鹏<sup>1,2</sup>, 陈略<sup>1,2</sup>,  
孙靖<sup>1,2</sup>, 王美<sup>1,2</sup>, 李羿霏<sup>1,2</sup>, 李黎<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** CE-3号探测器于2013年12月14日成功着陆于月表虹湾区,在预期1年的生存期内,着陆器能够相干转发下行X波段信号。基于这些信号,地面测控天线以及VLBI(very long baseline interferometry,甚长基线干涉测量)天线能够进行距离、速度、载波相位、VLBI时延以及时延率的测量。传统的激光测月技术只能提供距离测量信息,无线电测月技术能够同时提供更丰富的观测量类型,有可能获取优于激光测月技术的科学成果。为了分析LRM(lunar radio measurement,无线电测月)可能的贡献,MEKAS(Moon Earth kinematical analysis software)软件用于支撑无线电测月的数据分析处理,其能够模拟全部观测量类型,具备协方差分析以及CE-3着陆器定位、测站坐标解算等功能。模拟分析表明无线电测月技术在地月球科学方面具有广阔的应用前景。

**关键词:** 嫦娥3号; 玉兔号月球车; X波段转发器; 无线电测月

**中图分类号:** V556.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2095-7777(2014)03-0236-05

**DOI:**10.15982/j.issn.2095-7777.2014.03.013

## Research on Lunar Radio Measurement on Chang'e-3

TAGN Geshi<sup>1,2</sup>, CAO Jianfeng<sup>1,2</sup>, HAN Songtao<sup>1,2</sup>, HU Songjie<sup>1,2</sup>, REN Tianpeng<sup>1,2</sup>,  
CHEN Lue<sup>1,2</sup>, SUN Jing<sup>1,2</sup>, WANG Mei<sup>1,2</sup>, LI Yifei<sup>1,2</sup>, LI Li<sup>1,2</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China;  
2. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** After the successful launch on December 2, 2013, Chang'e-3 performed soft landing on lunar surface on December 14. Which is designed to stand in place for more than 1 year, and it can transmit X-band signal when the transponder is switched on. With their signals, ranging, Doppler, carrier phase, VLBI delay and delay rate can be acquired from ground TT&C antennas and VLBI antennas. These techniques can be called Lunar Radio Measurement (LRM) collectively. By LRM technique, more rich observations can be acquired nearly at the same time, so it could be more effective in contributing to space geodesy than LLR(Lunar Laser Ranging) which only provides ranging observation. To analyze the LRM technique, MEKAS (Moon Earth Kinematical Analysis Software) is developed, which can simulate all kinds of observations mentioned above, carry out covariance analysis and determine the parameters including CE-3 position on the lunar surface, ground site coordinates UT1, EOP and love number. Simulation results show that LRM technique has wide prospects in earth and lunar science.

**Key words:** Chang'e-3; Yutu Rover; X-band transponder; lunar radio measurement

## 0 引言

激光测月(lunar laser ranging, LLR)是一种非

常重要的空间大地测量技术,可确定月球星历、天平动、月球内部结构、地球自转参数以及月地动力学参数等重要参数<sup>[1-3]</sup>。LLR还是检验爱因斯坦广义相

对论的有力工具<sup>[4-5]</sup>。但是,在所有的 ILRS (International Laser Ranging Service, 国际激光测距服务组织)观测站中,只有少数几个测站有能力开展激光测月观测,其中 92%有效观测集中在美国的 McDonald 站和法国的 Grasse 站<sup>[6-8]</sup>。此外,LLR 观测与 ICRF (International Celestial Reference Frame, 国际天球参考架)无关,很难把月球运动与准惯性天球参考架相连接。这些问题制约了 LLR 在地月科学研究中发挥更大作用,相比之下,利用 CE-3 号的全球联测及参考架连接优势可为地月科学研究提供新的机会。

CE-3 探测器于 2013 年 12 月 2 日发射,经过 12 天的飞行,于 14 日成功着陆于月表虹湾区,设计寿命 1 年。着陆器安装了 X 波段转发器,能够以相干模式转发中国深空网 (Chinese Deep Space Network, CDSN) 上行测控信号。利用这些信号,中国深空网可以进行测速、测距,此外全球分布的 IVS 测站还可以开展 VLBI 观测。以上各类地月之间的测量信息统称为无线电测月 (lunar radio measurement, LRM)。相对于激光测月而言,无线电测月具有如下优势:首先,大尺度的 IVS 天线分布提供了更好的 PDOP 因子;其次,VLBI 是唯一的用于确定惯性天球参考架的技术,可以更好地连接月球轨道与天球参考架的关系。第三,可以同时获取到测距、多普勒测速、载波相位,时延、时延率数据。基于以上原因,无线电测月技术将有助于更好地了解月球行星科学,尤其是地月系统的动力学与运动学参考架。因而,对 CE-3 进行无线电测月技术研究具有重要科学价值。

## 1 系统组成

无线电测月技术体系包含两部分:一是地面跟踪测量系统,二是星上转发器。地面跟踪测量系统由 CDSN、中国 VLBI 网 (China VLB Net, CVN)、北京航天飞行控制中心 (BACC) 组成。深空网的佳木斯 66 m 天线、喀什 35 m 天线负责 CE-3 上行指令的发送以及遥测信号的接收,并兼顾测距、测速功能,此外深空站支持 VSI、VSR 格式的 VLBI 数据记录采集,干涉测量数据传输至北京中心相关处理中心,提取时延观测量。5 个 CVN 网测站记录 MARK5 格式的 VLBI 数据,并传输至上海天文台相关处理中心用于提取干涉测量观测量。CDSN 以及 CVN 网测站均配置有氢原子钟,GNSS 接收机、

水汽微波辐射计等辅助设备,用于时间、频率稳定性、传播介质时延等误差修正。

利用 IVS 全球布站的优势能够进一步提升位置精度因子。由于 CE-3 只在深空网可视跟踪弧段内具有下行信号,IVS 分布在亚洲、欧洲、非洲以及大洋洲的测站具有更优的观测条件。此外由于 CE-3 下行信号相对于标校射电源功率更强,VGOS 标准的 12 m 口径天线能够有效支持无线电测月观测。

为验证小口径天线对 CE-3 的观测性能,北京中心航天飞行动力学技术重点实验室改造一个 12 m 口径天线,其采用主动相位补偿技术向下变频等模块提供高稳定的频率基准。

CE-3 着陆器、巡视器作为月球表面的信标机资源,具有如下特点:1)只在月昼期间工作;2)多个下行点频信号 (DOR 测音以及测距音);3)下行信号由北京中心遥控指令控制;4)巡视器遥测信号全程开启。

## 2 观测试验及精度评估

在 CE-3 任务期间,获取了多种测量模式的观测量:1)深空网测站获取的测距、测速观测量;2)由相关中心获取的不同基线时延、时延率;3)由相关中心获取的 SBI 双差分时延、时延率;4)由基带设备以及原始采集数据处理分析获取的载波相位。

为计算时延、时延率,测站原始数据需要传递至相关处理中心,目前软相关处理器以其灵活可扩展的优势被广泛应用<sup>[9]</sup>。北京中心研发了 BSCS (BACC software correlator system) 软相关处理系统,用于干涉测量的数据处理分析。软件采用 C 语言开发,运行于高性能集群系统。

下面几幅图显示了 CE-3 多种观测模式的精度

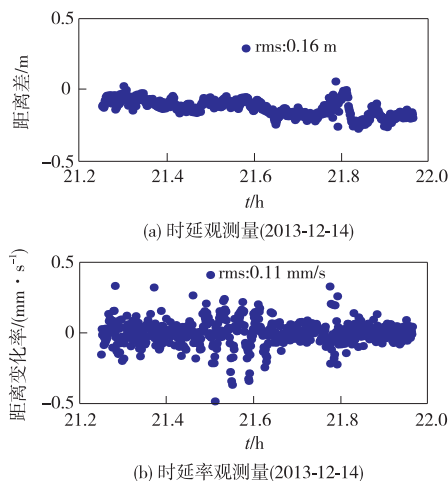
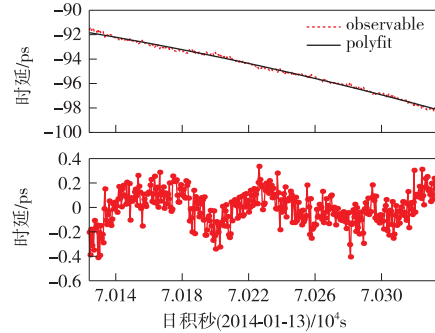
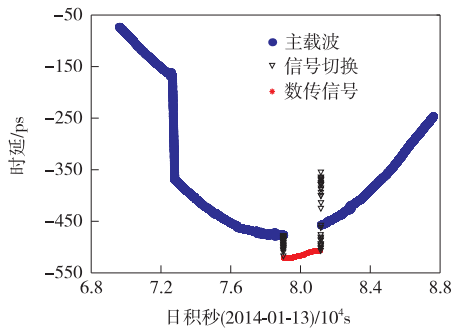


图1 Delta-DOR 测量精度分析(时延 0.5 ns, 时延率 0.33 ps/s)  
Fig. 1 Analysis of Delta-Dor measurement

分析情况。图 1 统计分析表明,Delta-DOR 时延、时延率精度分别为 0.5 ns 以及 0.33 ps/s;图 2 所示 SBI 测量结果精确反映了巡视器相对着陆器的运动状态,可分辨巡视器毫米级的位置变化。

图 3 统计分析表明,深空网载波相位测量精度为 0.1 rad,12 m 天线测量精度 0.5 rad,在 X 波段等价于 1~2 mm 量级的距离测量精度。

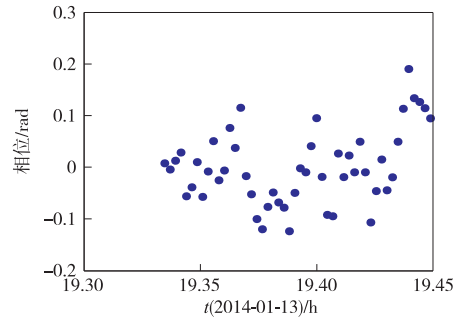
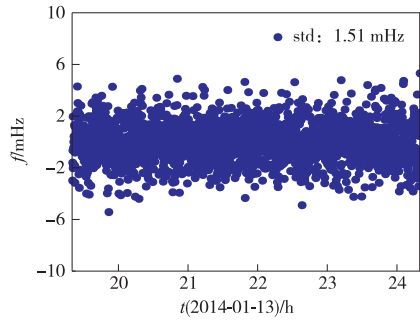


(a) SBI测量监视巡视器状态

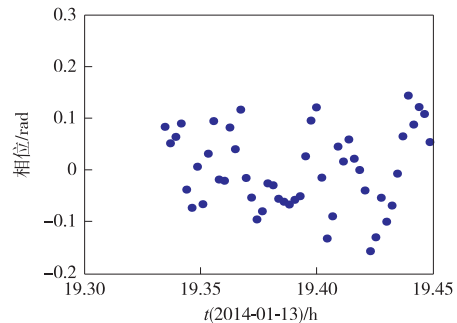
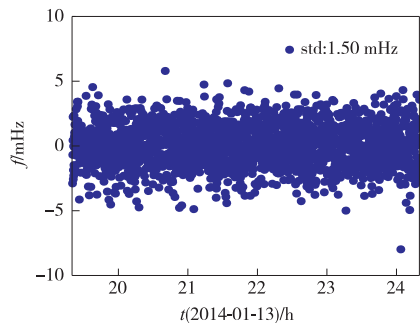
(b) SBI随机误差0.134 ps

图 2 SBI 测量结果分析

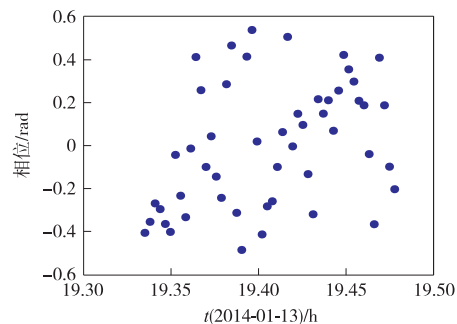
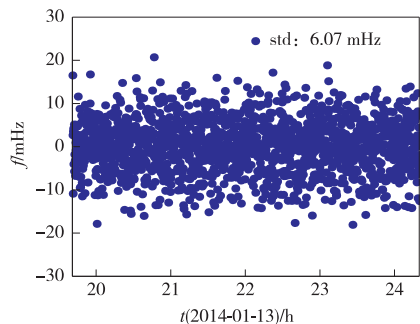
Fig. 2 Analysis of SBI measure result



(a) KSH 35 m天线(双程)



(b) JMS 66 m天线(3程)



(c) 12 m天线(3程)

图 3 多普勒以及载波相位测量结果

Fig. 3 Measure result of Doppler and DOR

### 3 科学目标

通过 CE-3 着陆器的无线电测量技术,我们可以获取到高精度和更多采样点的地一月测量数据。基于该技术,通过 CE-3 项目有望进一步增强对地球与月球行星科学的认识。

为分析月球无线电测量数据,北京航天飞行控制中心开发了用于地月运动分析的软件系统(MEKAS)。该软件包括一系列基本模块,使用 FORTRAN 语言编码。MEKAS 的 4 个主要基本功能包括:模拟观测数据、观测偏导数计算、待估参数的解算与协方差分析。软件可处理的观测数据类型包括双程/三程测距、多普勒测速、VLBI 时延与时延率、激光测月数据等。可解算分析的参数包括着陆器的位置,站址坐标,地球自转参数,观测数据系统差,月球勒夫数等。参数的选取与设置非常灵活,MEKAS 的输入设置为一个名为“mmekas.dat”的输入文件。在输入文件中,可以设置以下项:1)月球着陆器或是月球激光反射阵的位置与不确定度;2)定位计算所使用的观测数据与权重设置;3)定位计算中需解算的参数设置;4)一个或多个观测数据文件。

利用 MEKAS,我们进行了协方差分析。利用中国深空网与中国 VLBI 网对“嫦娥 3 号”着陆器测量数据进行定位分析,表 1 给出了可能的定位精度。

表 1 着陆器定位精度

Table 1 The positioning accuracy of the lunar lander

跟踪弧段 天 持续时间/h	Case 1			Case 2			
	$\sigma_x/m$	$\sigma_y/m$	$\sigma_z/m$	$\sigma_x/m$	$\sigma_y/m$	$\sigma_z/m$	
1	1	19.89	0.94	0.95	28.21	9.38	9.59
	2	19.77	0.69	0.97	29.86	7.96	9.46
	3	19.47	0.56	0.93	40.81	6.95	9.72
	4	18.85	0.47	0.86	57.53	6.29	10.31
2	1	17.61	0.74	0.64	42.34	11.59	8.14
	2	14.72	0.44	1.56	49.93	9.83	7.16
	3	12.05	0.30	1.29	43.20	8.46	6.37
	4	9.98	0.22	1.07	32.80	7.50	5.55
5	1	6.67	0.53	0.73	46.98	5.93	13.71
	3	3.82	0.18	0.38	23.61	7.26	6.87
	4	2.18	0.18	0.32	15.34	6.23	4.33

注:Case 1 中仅考虑了观测数据的随机误差,Case 2 不仅考虑了随机误差,还考虑了站址的不确定。

在定位计算中,测距数据的系统性偏差是影响制约定位精度的主要误差源,而且该偏差不易解算,因而在分析中考虑了高程方向约 10 m 的先验不确定度。如表 1 所示,如果不考虑站址误差,定位精度

将随着测量数据的增加而提高,当跟踪数据达到 5 天后,结果表明可以实现米级的定位精度。如果考虑 15 cm 的站址误差,精度将会下降至 10 m 量级。

如果南半球的 VLBI 测站能够参与对“嫦娥 3 号”着陆器的跟踪测量,使用 CDSN、CVN、IVS 的测量数据进行了仿真分析,表 2 给出了 IVS 站参与跟踪的前提下可能的定位精度。

表 2 着陆器定位精度(IVS 站参与跟踪测量)

Table 2 The positioning accuracy of the lunar lander (IVS involved in the measurement)

跟踪弧段 天 持续时间/h	Case 1			Case 2			
	$\sigma_x/m$	$\sigma_y/m$	$\sigma_z/m$	$\sigma_x/m$	$\sigma_y/m$	$\sigma_z/m$	
1	1	30.92	0.65	3.36	37.00	0.80	4.06
	2	20.90	0.43	2.28	27.43	0.60	3.04
	3	15.789 6	0.316 1	1.733 9	21.509 6	0.449 33	2.400 5
	4	12.62	0.22	1.38	17.79	0.31	1.98
2	1	7.02	0.15	0.79	7.31	0.20	0.84
	2	5.05	0.11	0.57	5.46	0.19	0.63
	3	4.05	0.09	0.46	4.50	0.18	0.52
	4	3.35	0.08	0.38	3.74	0.16	0.44
3	1	3.60	0.15	0.41	3.82	0.20	0.44
	2	2.64	0.11	0.30	3.00	0.18	0.34
	3	2.17	0.09	0.25	2.58	0.16	0.29
	4	1.84	0.07	0.21	2.22	0.15	0.25
4	1	2.30	0.14	0.26	2.55	0.19	0.29
	2	1.71	0.11	0.19	2.10	0.17	0.23
	3	1.430 4	0.092 2	0.162 6	1.902 8	0.166 97	0.209 4
	4	1.23	0.07	0.14	1.70	0.15	0.18
10	1	0.65	0.08	0.06	0.94	0.14	0.10
	2	0.48	0.06	0.04	0.89	0.13	0.09
	3	0.41	0.05	0.03	0.89	0.14	0.09
	4	0.36	0.05	0.03	0.89	0.13	0.08

注:Case 1 与 Case 2 同表 1。

LLR 激光反射阵在主轴坐标系下的坐标在行星历表建立的过程中同时解算。比较 DE421 与 DE430,反射阵在  $x$  方向的坐标分量约有 1 m 的偏移。这表明着陆器的精度有可能达到与激光反射阵同等的精度水平,因而着陆器可以作为一个月球的基本控制点。

通常地球自转参数在 IERS 组织同组合估值的方式以时间序列的形式给出,并在公告中延迟 30 天发布。其发布的地球自转参数中极移的精度大约为 0.1 mas,UT1 精度为 0.02 ms。精确确定了着陆器的位置,则能获取与 IERS 发布的相同精度的 EOP 参数。表 3 给出了考虑 1 m 不确定度的着陆器的位置误差解算的 EOP 参数精度。

在 DE430 的构建中,勒夫数  $h_2$  是固定的,而  $k_2$  设置为 GRAIL 确定的值。比较 DE421 与 DE430 的  $h_2$  值,其偏差大约为 0.01。使用长期的着陆器跟踪数据,可以进行月球勒夫数的解算。表 4 为基于协方差分析给出的勒夫数估计精度。当跟踪数据达到 30 天, $h_2$  解算精度可达 0.005 3,  $l_2$  可达 0.002 3。

表 3 利用着陆器测量解算 EOP 参数的精度

Table 3 The uncertainty of EOP estimation with lunar lander

跟踪弧 长/h	Case 1			Case 2		
	$\sigma_{xp}/\text{mas}$	$\sigma_{yp}/\text{mas}$	$\sigma_{\text{UTI-UTC}}/\text{ms}$	$\sigma_{xp}/\text{mas}$	$\sigma_{yp}/\text{mas}$	$\sigma_{\text{UTI-UTC}}/\text{ms}$
1	0.22	0.28	0.05	0.38	0.41	0.22
2	0.17	0.19	0.03	0.37	0.28	0.20
3	0.17	0.16	0.03	0.36	0.20	0.15
4	0.16	0.13	0.02	0.35	0.18	0.09

注:Case 1 仅考虑观测噪声,Case 2 考虑了观测噪声与着陆器坐标 1 m 的不确定度。

表 4 月球勒夫数解算精度

Table 4 The uncertainty of lunar love numbers estimation

tracking arc/d	Lunar love numbers	
	$\sigma_{k_2}$	$\sigma_{l_2}$
1	4.157 6	5.714 2
7	0.035 5	0.008 0
15	0.012 3	0.005 3
30	0.005 3	0.002 3

## 4 结束语

CE-3 着陆器以及巡视器定点于月球表面并发射下行无线电信号,信标定位精度提升至亚米级可以有效支持地月科学研究。MEKAS 软件分析结果表明,在观测弧段足够长的情况下,CE-3 信标定位精度可达到 1 m。利用 IVS 测站天线以及 12 m 口径天线能够接收 CE-3 下行信号,相对 LLR 技术而言具有极高的性价比,在地月科学领域具有广阔的应用前景。

VLBI 测量技术对射电源进行时延与时延率测量,可以用于高精度天球参考架的建立,EOP 参数

的解算。通过无线电测月技术不仅可以获取时延、时延率数据,还可获取测距、测速数据,如果结合激光测月计算,有望在地球与月球行星科学方面取得更多进展。包括月球历表,月球物理天平台,内部结构,不同参考架以及地球定向参数等等。

## 参 考 文 献

- [1] Dickey J O. Lunar laser ranging: a continuing legacy of the Apollo program[J]. Science, 1994(265):482-490.
- [2] Murphy T W. Laser ranging to the lost Lunokhod 1 reflector[J]. Icarus, 2011(2):1103-1108.
- [3] Dehant V. Geodesy instrument package on the Moon for improving our knowledge of the Moon and the realization of reference frames[J]. Planetary and Space Science, 2012(68):94-104.
- [4] Adelberger E G. Eötvös experiments, lunar ranging and the strong equivalence principle[J]. Nature, 1990(347):261-263.
- [5] Rambaux N, Williams J G. The Moon's physical librations and determination of their free modes[J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2011(109):85-100.
- [6] Bender P L. The Lunar laser ranging experiment[J]. Science, 1973(182):229-238.
- [7] Murphy T W. APOLLO: millimeter lunar laser ranging[R]. [S. l.]: Classical and Quantum Gravity (IOP Publishing), 2012.
- [8] Martini M. MoonLIGHT: a USA-Italy lunar laser ranging retroreflector array for the 21st century[J]. Planetary and Space Science, 2012(74):276-282.
- [9] Deller A T, Tingay S J, Bailes M. DiFX: a software correlator for very long baseline interferometry using multiprocessor computing environments[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2007(119):318-336.

作者简介:

唐歌实(1969—),男,研究员,主要研究方向:航天测控技术。

通信地址:北京市北清路 26 号院(100094)

电话:(010)66365934

E-mail: tanggeshi@bacc.org.cn

[责任编辑:宋宏]