

俄月球-全球等探测任务中的无线电科学试验

Alexander Sergeevich KOSOV, Vladimir Michailovich GOTLIB,
Vriiy Alexandrovich KOROGOD, Uriiy Alexandrovich NEMLIHER,
Dmitriy Petrovich SKULACHEV

(俄罗斯科学院 空间研究所, 莫斯科 117997)

摘要:俄罗斯航天局正在规划和推进新的月球探测计划,包括月球-资源和月球-全球探测任务,它们搭载了3个无线电科学载荷:2个无线电信标机分别安装在2个着陆器上,1个Ka波段接收机安装在月球-全球轨道器上。信标机发射频率为8.4 GHz和32 GHz。8.4 GHz的微波信号将被发回地球,利用地面VLBI监测网对信号进行测量,其结果可用于精密的天体力学观测及导航,还能用于月球天平动研究;32 GHz信号将用于定轨和月球重力场研究。Ka波段信号天线轴指向着陆区天顶方向,信号由轨道器接收。本文基于对Ka波段信号多普勒频移的精确测量,通过研究着陆区附近重力场的微小变化(约3~5 mGal精度),探讨月球重力场的不均匀性,其测量数据的空间分辨率约为20 km。

关键词: 空间研究; 无线电科学; 相干应答器; 同波束试验

中图分类号: P228 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2014)03-0181-06

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2014.03.003

Radio Science Experiments in Russian “Luna-Recourse” “Luna-Glob” Projects

Alexander Sergeevich KOSOV, Vladimir Michailovich GOTLIB,
Vriiy Alexandrovich KOROGOD, Uriiy Alexandrovich NEMLIHER,
Dmitriy Petrovich SKULACHEV

(Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow 117997, Russia)

Abstract: These years, the Russia Space Agency is planning a couple of new lunar orbiting and landing explorations, the luna-resource and luna-glob projects. Three kinds of radio scientific payloads will be installed on them: two radio beacons, installed on Luna-Resource and Luna-Glob Landers separately, and a Ka-band receiver installed on Luna-Glob orbiter. The beacons will irradiate signals at two radio frequency bands of 8.4 GHz and 32 GHz. The 8.4 GHz signals will be transmitted to the Earth, where the VLBI ground based network will be used for celestial mechanics experiments and as a navigation tool. It will be possible to measure the beacon's positions with accuracy about 1 cm and to register Moon's libration. The 32 GHz band will be used as a kind of orbiter navigation tool and for lunar gravity field investigation. The Ka band signal will be directed to local zenith and will be received by orbiter's receiver. Investigation of non-uniformity of lunar gravity field (experiment INGL) will be performed in vicinity of landing regions with accuracy 3~5 mGal. The spatial resolution will be about 20 km. The experiment is based on precise Doppler shift measurement.

Key words: space research; radio science; coherent transponder; same beam experiment

0 引言

截止 2020 年,俄罗斯有 3 个计划中的月球探测任务:2017 年发射的月球-全球着陆器,如图 1;2018 年发射的月球-全球轨道器,如图 2;2019 年发射的月球-资源着陆器。

月球-全球及月球-资源任务中有两个不同的无线电科学载荷,分别是着陆器的无线电信标和轨道器的接收机。着陆器的无线电信标将包括一个 X 波段接收机、一个 X 波段发射器和一个 Ka 波段发射器。无线电信标有自主工作和相干应答 2 种工作模式。自主工作模式中信标辐射信号的稳定度取决于内部参考源的稳定度。在相干应答工作模式中发射机信号锁相于地球发出的参考信号。轨道器的接收机工作在 Ka 波段(32 GHz),将从月球着陆器的无线电信标或者地球的发射机接收信号,见图 1 和图 2。利用着陆器的无线电信标机和轨道器的接收机能够进行很多有价值的导航和天体力学试验。



图 1 月球-全球着陆器
Fig. 1 Luna-Glob lander



图 2 月球-全球轨道器
Fig. 2 Luna-Glob orbiter

1 着陆器的无线电信标机

1.1 着陆器的无线电信标机原型

着陆器的无线电信标机原型是为福布斯-土壤任务开发的 USO 和为月球-资源任务开发的非相

干无线电信标机,两者的仪器模型如图 3 所示^[3]。



图 3 USO 及月球无线电信标的合格模型图
Fig. 3 Photo of the qualified models of USO and Luna's radio beacon instruments

1.2 相干无线电信标机

新的相干无线电信标机结构如图 4 所示。相干无线电信标机是一个重约 2 kg、体积约为 2 L 的盒子。其中有 3 个天线:X 波段频率为 7.2 GHz 的接收机微带天线,X 波段频率为 8.4 GHz 的发射机微带天线和 Ka 波段频率为 32 GHz 的波导天线。X 波段天线主波束指向地球方向,Ka 波段天线主波束指向天顶方向。接收机 7.2 GHz 的参考信号被相干转换为 8.4 GHz 和 32 GHz 的发射信号。此类转换可以利用可指定比率的频率转换前置 PLL 电路实现。因此内置信号参考源的波动将不会影响到发射信号的频率。此载荷在每个频段的辐射功率可达 0.5 W。天线为右旋圆极化天线,增益为 5~7 dB。此载荷在自主工作模式下不需要地面提供参考信号。在此种模式下,接收机被关闭,PLL3 和 PLL5 分别调制在 8.4 GHz 和 32 GHz 上,此时信号的频率稳定度取决于内置参考晶振。月球无线电信标机的通用参数见表 1 所示。

表 1 无线电信标机通用参数表

Table 1 Specification of the radio beacon

参数名称	参数值	备注
频带	X and Ka	相干
尺寸/mm	190×150×125	
质量/kg	1.7	
功耗/W	7	对每一个通道
发射功率/W	0.3	对每一个通道
极化	右旋圆极化	对每一个通道
能量源	太阳能及核电	
自主工作模式下频率稳定性(阿兰方差)	8×10^{-14} (3~30 s)	OEXO BVA8607
	1×10^{-13} (1~300 s)	OEXO BVA8607
	1×10^{-12} (0.1~1 000 s)	OEXO BVA8607
	5×10^{-12} (24 h)	OEXO BVA8607
	2×10^{-9} (1 a)	OEXO BVA8607

内置参考频率振荡源是仪器最重要的一部分,用以保持自主工作模式下的频率稳定性,以及相干工作模式下的信号相位噪声水平。内置参考源计划采用瑞士 Osciloquartz 公司生产的 OCXO BVA8607 晶振。该参考晶振具有优异的频率稳定性,如表 1 所示;并且在带宽为 1 Hz 的情况下,其相

位噪声控制在非常低的水平,具体数值为:1)频率为 1 Hz 时,对应相位噪声为 -130 dBc;2)频率为 10 Hz,对应相位噪声为 -145 dBc;3)频率为 100 Hz,对应相位噪声为 -153 dBc;4)频率为 1 kHz,对应相位噪声为 -156 dBc;5)频率为 10 kHz,对应相位噪声为 -156 dBc。

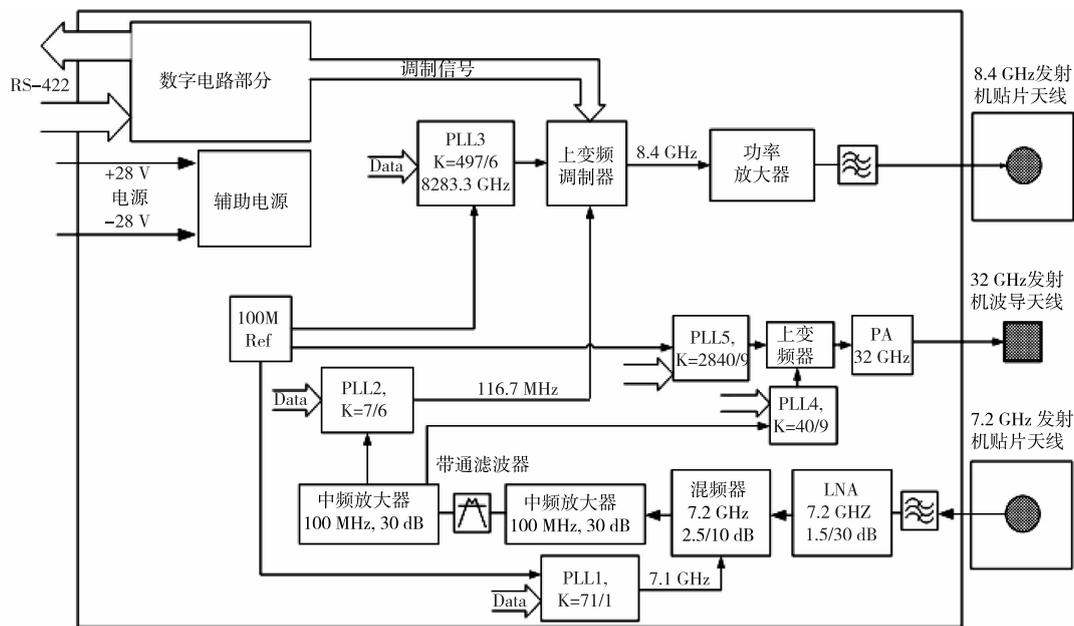


图 4 相干无线电信标机结构图
Fig. 4 Structure of the coherent radio beacon

OCXO BVA8607 晶振优异的性能及其低质量使得它成为空间频标的最佳选择。图 5 给出了该参考晶体振荡器的频率稳定特性,可以看出在积分时间小于 30 s 的情况下可以达到 7×10^{-13} 稳定度。可供选择的另一款晶振 PH-Maser 的稳定特性与 OCXO BVA8607 可比拟,而且在积分时间大于 30 s 时表现比 OCXO BVA8607 更好。但是由于月球无线电信标机的质量限制,无法将 PH-Maser 用作参考源。在相干工作模式下,发射信号与地面发射的参考信号同步。相干工作模式用于测量地面接收机和月球无线电信标机之间的相对速度引起多普勒频移。信号在地月之间往返的时间约 3 s,在测量中首先要保持的是信号的短期稳定度。因此 OCXO BVA8607 也是地面参考晶振的最佳选择。

无线电信标机有 2 个发射机(X 和 Ka 波段)和 1 个接收机(X 波段),它们的详细信息如下。

1)信标机 X 波段发射机的详细参数为,中心频率:8.4 GHz;辐射功率:0.3 W;波束宽度 ($G = 0$ dB): 120° ;极化类型:右旋圆极化;调制类型:

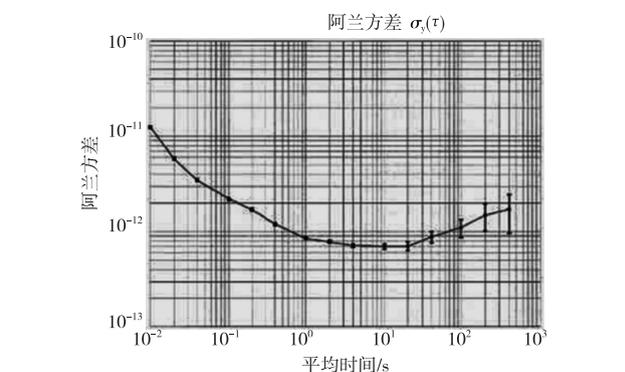


图 5 OCXO BVA8607 晶振的频率稳定特性
Fig. 5 Frequency stability comparison for OCXO standards

QPSK, different Fm; 频率稳定度: OCXO BVA8607;载波(副载波)谱宽度:0.01 Hz;自主工作模式相干时间:100 s。

2)Ka 波段发射机的详细参数为,中心频率:32 GHz;辐射功率:0.3 W;波束宽度 ($G = 0$ dB): 120° ;极化类型:右旋圆极化;调制类型:无调制;频率稳定度:OCXO BVA8607;载波谱宽度:0.04 Hz;自主工作模式相干时间:25 s。

3) X 波段发射机的详细参数为,中心频率:7.2 GHz;噪声范围:1.5 dB;主波束方向:地球;波束宽度($G=0$ dB): 120° ;极化类型:右旋圆极化。

4)月球无线电信标机多种工作模式为,32 GHz 信号,单一载波;8.4 GHz 信号,单一载波;8.4 GHz 信号,载波及 ± 3 MHz 副载波;8.4 GHz 信号,载波及 ± 20 MHz 副载波;8.4 GHz 信号,载波及 ± 50 MHz 副载波。

当信标机采用核电时,进行内部循环作业;对地信息传输:对地面 30 m 天线传输速度可达 0.1 M/s。

无线电信标能在 X 波段进行扩频。此种类型的信号包括主载波和副载波,其频谱需要利用 VLBI 观测网络来计算不确定度。图 6 给出了含 20 MHz 频率调制的信号频谱。

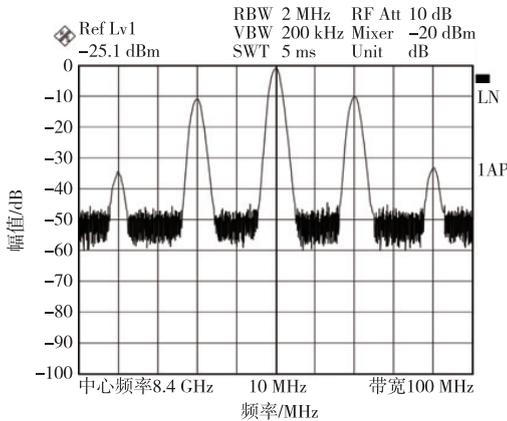


图 6 8.4 GHz 信号频谱 (20 MHz 频率调制,日期:2010-05-26 22:00:52)

Fig. 6 The 8.4 GHz signal spectrum (20 MHz modulation frequency, date:2010-05-26 22:00:52)

如前所述,当有地面提供的参考信号时,无线电信标机可以工作在相干模式下。如果没有地面提供信号时,无线电信标机将工作在自主模式下。

无线电信标机有两种天线:X 波段发射机的贴片天线和 Ka 波段发射机的波导天线。图 7 给出了贴片天线示意图及其波束方向图。Ka 波段天线示意图及其波束方向图见图 8。

1) X 波段天线的详细信息为,频率:8.4/7.2 GHz;增益:7.1 dB;波束宽度($G=-3$ dB): 82° ;极化信息:右旋圆极化。

2)ka 波段天线的详细信息频率:3.2 GHz;增益:9.6 dB;波束宽度($G=-3$ dB): 60° ;极化信息:右旋圆极化。

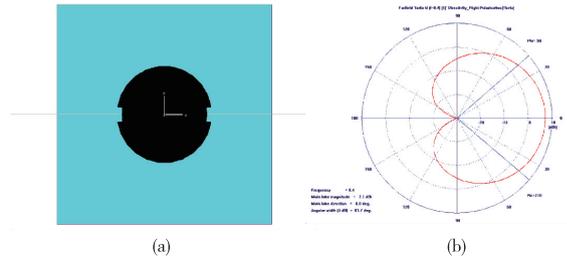


图 7 X 波段微带天线(a)及其波束方向图(b)
Fig. 7 X-band antenna (a) and its beam pattern (b)

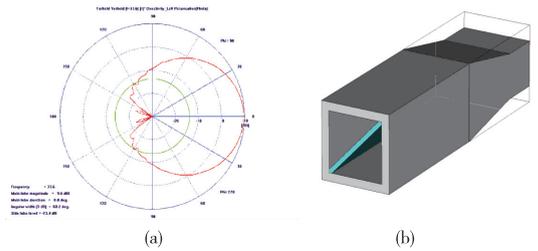


图 8 波段贴片天线(a)及其波束方向图(b)
Fig. 8 Ka-band antenna (a) and its beam pattern (b)

1.3 月球-全球轨道器和 Ka 波段接收机

Ka 波段接收机是月球-全球轨道器的科学载荷之一。轨道器结构图和 Ka 波段接收机如图 9 所示。

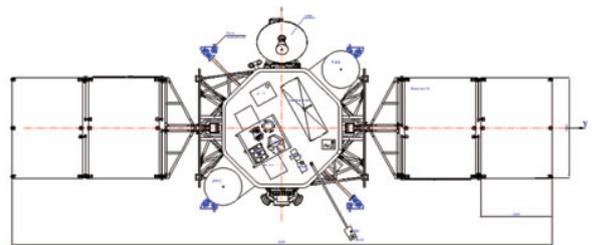


图 9 月球-全球轨道器和 Ka 波段接收机
Fig. 9 The Luna-Glob orbiter and Ka-band receiver

Ka 波段接收机设计用来接收月球信标机信号并精确测量多普勒频移和相对速度。图 10 给出了测量多普勒频移的经过。输入的 32 GHz 信号经过降频和数字化后计算频率漂移。

Ka 波段接收机由 OCXO BVA8607 参考晶振、波导天线、低噪声放大器、频率转换器、数字单元和供能单元组成。详细信息为:中心频率:32 GHz;噪声温度: ≤ 150 K;波束宽度: 120° ;极化类型:右旋圆极化;带宽:0.5 MHz;信噪比($PTX=5$ W, 1 Hz, 500 km):40 dB;速度变化量的测量精度:3 mGal。

本地晶振(OCXO BVA8607)的频率稳定度为:1)积分时间为 3~30 s 时,对应阿兰方差为 8×10^{-14} ;2)积分时间为 1~300 s 时,对应阿兰方差为

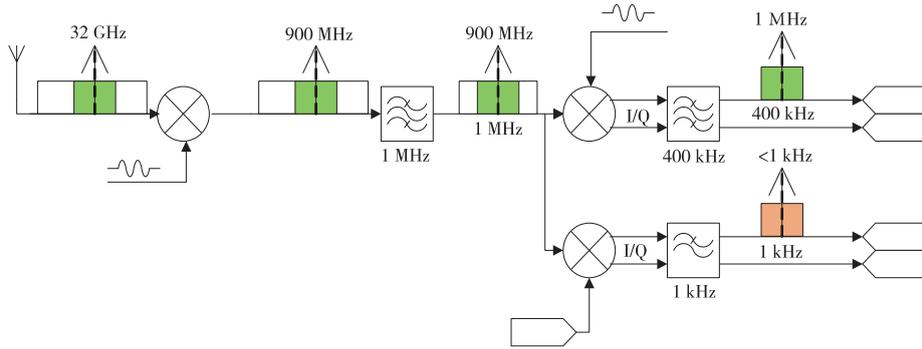


图 10 多普勒测量图示
Fig. 10 The chart of Doppler shift measurement

1×10^{-13} ; 3) 积分时间为 1~10 000 s 时, 对应阿兰方差为 1×10^{-12} ; 4) 积分时间为 24 h 时, 对应阿兰方差为 5×10^{-12} ; 5) 积分时间为 1 a 时, 对应阿兰方差为 2×10^{-9} 。

2 利用着陆器和轨道器进行无线电科学试验

利用着陆器信标机和轨道器接收机可以进行很多有价值的无线电科学试验。第 1 组是导航任务。通过接收地面 VLBI 网的 X 波段信号, 可以开展着陆器精确位置测定工作(精度可达 10 cm)。图 11 给出了同波束定位导航试验的示意图。

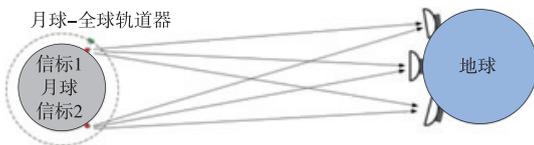


图 11 利用月球无线电信标开展同波束导航试验
Fig. 11 Chart of navigation experiments with Luna's radio beacons

另一个导航任务是精确测量月球-全球轨道器的轨道参数。在此任务中, 将会使用无线电信标机 Ka 波段信号和轨道器接收机的数据。该任务的示意图见图 12。

第 2 组是科学试验。轨道器 Ka 波段接收机能够对其加速度做高精度测量。而轨道器的加速度变化与月球重力场变化相关。月球的非均匀重力场研究(investigation of non-uniformity of gravity field of luna, INGL)试验的目的是测量着陆器附近的月球重力场变化。此测量的精度与 GRAIL 数据精度是可比拟的。表 2 对 GRAIL 和 INGL 进行了对比。

第 3 种科学试验是同波束干涉测量(same beam interferometer, SBI)试验。在此试验中, 月面的几个无线电信标机应当同时工作, 信号被地面

同一个站接收。SBI 的位置测量精度可达 0.1 mm。误差源及误差值的实验估计值如表 3 所示^[1]。

表 2 GRAIL 和 INGL 特性对比
Table 2 INGL features in comparison with GRAIL

参数	INGL	GRAIL
阿兰方差	$\leq 1 \times 10^{-13}$ (1 s)	$\leq 3 \times 10^{-13}$ (1 s)
	$\leq 8 \times 10^{-14}$ (10 s)	$\leq 3 \times 10^{-13}$ (10 s)
	$\leq 1 \times 10^{-13}$ (100 s)	$\leq 3 \times 10^{-13}$ (100 s)
精度/mGal	3~5	5~10
分辨率/km	5~10	10~20
研究区域	信标机周围 ±1 000 km	全月球
地面观测网	无	有

表 3 SBI 实验误差源及估计值
Table 3 Sources and values on SBI measurement errors

误差源	SBI 实验误差	
地面台站噪声	<0.028 mm	<1.0°
KaT 接收机噪声	<0.006 mm	<0.2°
KaT 校验后的残差	<0.014 mm	<0.5°
相位不稳定性	<0.056 mm	<2.0°
校准后残余的对流层差分延迟	<0.050 mm	<1.8°
电离层差分延迟	<0.005 mm	<0.2°
总误差	<0.090 mm	<3.0°

3 结束语

俄罗斯月球-资源和月球-全球探测任务中的月球无线电科学试验, 将搭载 OCXO BVA8607 超稳定晶振为无线电发射机提供频率参考。利用这两个探测计划在 X 波段和 Ka 波段开展的无线电科学试验。实验将使用地面 VLBI 监测网对信号进行测量, 其结果可用于精密的天体力学观测及导航, 还能用于月球天平动研究。着陆器无线电信标机和轨道器接收机还将用于卫星导航和通讯。进一步利用无线电科学方法可以在以下可能的科学方向上有所建树:

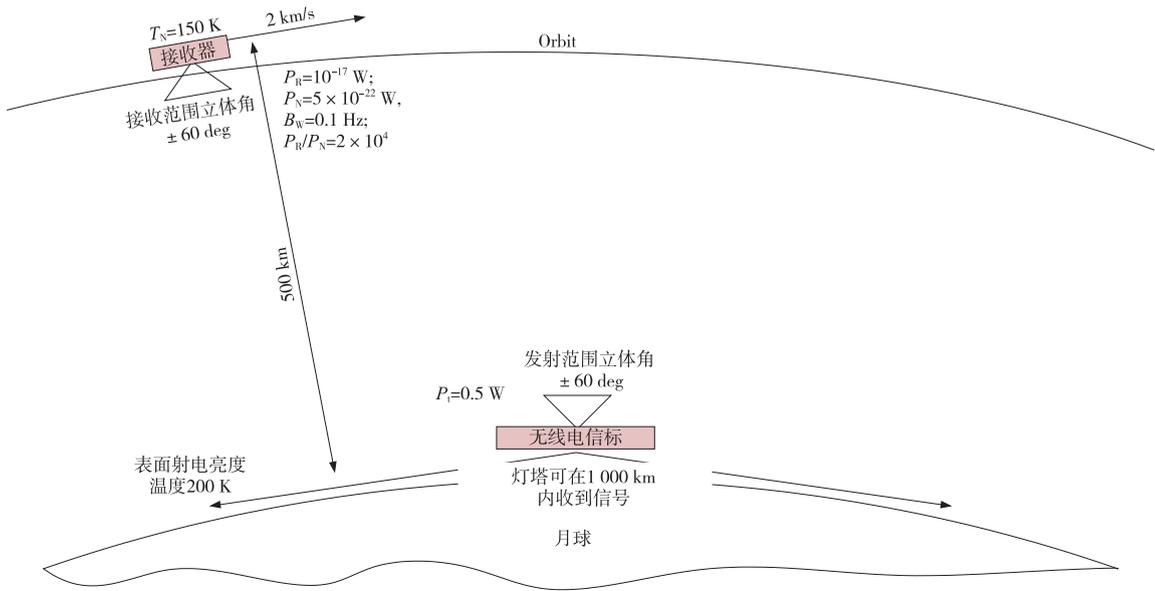


图 12 轨道参数测量示意图
Fig. 12 Chart of orbit parameters measurements

1) 地球参考架的改进。

2) 月球内部动力学机制, 特别通过确定月球转动惯量、月核扁率、月球自转的自由和受迫天体运动、潮汐及其耗散, 更好地确定核半径及内核的可能组成, 对月球演化理论给出约束。

3) 更好地确定广义相对论的参数, 通过 PPN 参数值测量或者测试背离广义相对论的现象来寻找更普适的引力理论。

4) 进一步优化月球自转动力学、月球轨道、月球历表及更多的牛顿力学变化量的观测。

这两个探测计划中无线电科学实验的成功实施将扩展我们对月球内部、轨道动力学、重力场结构、广义相对论以及月球历史等的认识。

致谢

作者感谢中科院国家天文台王明远博士将本文由英文翻译成中文。

参 考 文 献

[1] Gregnanin M, Bertotti B, Chersich M, et al. Same beam

interferometry as a tool for the investigation of the lunar interior[J]. Planetary and Space Science, 2012(74):194-201.

[2] Dehant V, Oberst J, Nadalini R, et al. 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.

[3] Kosov A S, Gotlib V M, Vald-Perlov V M, et al. Ultra stable millimeter wave oscillator intended for space project Phobos-Grunt[C]//Global Symposium on Millimeter Waves Proceeding. Nanjing, China, 21-24 April 2008.

作者简介:

Alexander Sergeevich KOSOV (1949—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 卫星无线电通信, 卫星空间探测技术。

通信地址: 俄罗斯科学院空间研究所, 莫斯科(117997)

电话: +7(495) 333-52-12

E-mail: akosov@iki.rssi.ru

[责任编辑: 高莎]