

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.S.008

面向全月球探测的天基中继测控系统设计

张 燕, 王 鹏, 张立华

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 中继测控是月球探测任务中必须解决的关键问题,特别是月球背面和两极地区的着陆和巡视探测任务以及载人登月任务。本文首先对国内外月球中继测控卫星的研究和发展情况进行了调研,分析了未来全月球探测对中继测控的需求。在此基础上,重点给出了面向全月球探测任务的天基中继测控系统设计方案,并仿真分析了该方案的中继测控性能。最后给出了简要的卫星设计方案。

关键词: 全月球探测任务; 中继测控; 性能

中图分类号: V474.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2021)S-0051-06

Design of Lunar Relay Communication Satellite System

ZHANG Yan, WANG Peng, ZHANG Lihua

(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: The relay communication is a key problem for lunar exploration missions, especially for the landing and cruising on the lunar far side and polar areas, and for the manned lunar exploration missions. The research and development status about lunar relay communication satellite system throughout the world are analyzed. Based on the analysis on the requirements for lunar relay communication missions, the implementation approach is analyzed for relay communication system scheme, orbit selections, etc. The characters of relay communication system are analyzed to support generating the development strategy. Finally, the satellite design scheme is illustrated.

Key words: lunar exploration mission; relay communication satellite; characters

地月空间已成为各航天大国竞争的焦点。美国、俄罗斯、欧空局都规划了多个无人、载人登月探测任务^[1]。作为发展中的航天大国,中国也把地月空间的开发列为未来航天发展的着力点之一,而月球探测则是未来很长一段时间内的竞争重点。

月球背面的南极区域有太阳系中最大最深的撞击盆地——“艾托肯”(Aitken)盆地;月球南北极还存在水冰;月球两极和背面可能蕴含丰富的资源。因此,月球背面以及两极区域具有更大的探测价值,是未来月球探测任务的重点关注区域。

然而,由于潮汐锁定的缘故,月球总是一面朝

着地球,即月球的背面一直对地不可见。即使月球公转中存在天秤动现象,通过长期的累计观测,可以使地基设施观测到全月面积约 59%,但是对于月球着陆探测来说,这些可见区域的边界区域,既无法保证对地可见的时效,也无法保证在对地可见时段内通信测控的有效性。研究表明,这些区域的通信测控无法由传统的地球附近轨道上的中继卫星系统解决,必须研制专用的中继测控卫星^[2-3]。

对于载人探月任务,各个阶段都需要地面站能够与载人飞船和宇航员进行实时的测控通信,由于月球的遮挡,地面测控站以及地球轨道的中

基金项目: 国家自然科学基金(11773004)资助项目。

收稿日期: 2021-05-10; **修订日期:** 2021-06-25

通信作者: 张燕,女,高工, E-mail: zhangyanhit@126.com。

引用格式: 张燕,王鹏,张立华. 面向全月球探测的天基中继测控系统设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S): 51-56. ZHANG Yan, WANG Peng, ZHANG Lihua. Design of lunar relay communication satellite system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S): 51-56.

继卫星系统都无法对载人月球探测器进行连续无缝隙的实时覆盖,也有对月球中继测控卫星的需求。

月球中继测控的想法和相关的研究论证工作由来已久。早在1950年,阿瑟·克拉克在《行星际飞行》一书中就描述了利用地月L2平动点实现向月球背面殖民地广播和电视转播的理想^[4]。此后,在20世纪60至70年代,伴随着月球探测任务的兴起和Apollo登月计划的实施,掀起了月球中继测控卫星研究的第一轮热潮。美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)^[5]、美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)戈达德飞行中心^[6]、美国的Farquhar^[7]分别在不同方面完善了基于地月L2点轨道的月球中继测控卫星的研究论证;美国TRW公司则论证了环月轨道的月球中继卫星系统^[8]。

然而,受当时航天技术能力发展的限制以及缺乏大规模探测工程的迫切需求,这一阶段的研究论证工作还停留在设想和概念阶段,主要集中在轨道和中继测控覆盖特性分析等方面。

20世纪90年代以来,随着美国和欧洲在第2轮月球探测高潮中提出了多个针对月球背面和两极的着陆探测任务,中继测控卫星成为论证的重点。美国的休斯公司^[9]、科罗拉多大学和MicroSat公司^[10]、欧洲航空航天局(European Space Agency, ESA)^[11]、德国的OHB公司和斯图加特大学^[12]等分别详细论证了基于地月L2、L4、L5点的中继测控卫星方案。而NASA的Glenn研究中心^[13]针对月球南极探测任务,提出了绕月球大椭圆极地冻结轨道运行的中继测控和导航服务卫星方案。约翰·霍普金斯大学(The Johns Hopkins University, JHU)提出由3颗月球极轨卫星、3颗赤道轨道卫星和1颗地月L2平动点Halo轨道卫星组成月球中继测控和导航定位系统的方案。NASA的Goddard空间中心提出地月L2点Halo轨道卫星与GPS(Global positioning system)系统相结合的中继测控与导航系统方案。

中国的“嫦娥4号”的中继星——“鹊桥”(2018年5月21日发射,进入绕地月L2平动点的Halo轨道运行),是世界上首颗月球中继卫星,为“嫦娥4号”任务——人类历史上首个在月球背面开展着陆和巡视勘察的探测任务,提供月球背面的着陆和巡视勘察探测的中继测控服务。

可以预见,未来的月球探测任务将向着高频次、全月化、常态化以及业务化的方向发展,这对中国中继测控网提出了更高要求。如何构建全月覆盖、连续测控以及高性价比的地月空间测控

网将是未来月球任务实施必须要考虑的关键问题。

本文针对未来典型任务对中继测控的需求,重点针对全月探测需求提出中继测控星座设计方案,并给出星座性能的数学仿真分析。

1 全月面探测的中继测控需求分析

1.1 月球中继测控卫星的能力需求

月球中继测控卫星重点是解决月球背面和两极等对地不可见区域的探测任务以及载人航天器在绕月过程中的对地不可见时段的对地中继测控需求,月球中继测控卫星需要提供的任务支持能力主要包括以下几点。

(1) 支持完成对月球探测器的测控任务:实现地面上行遥控指令和注入数据的转发,兼顾无人探测和有人探测的需求,码速率要达到20 Mbit/s。

(2) 支持对月球探测器的高速数据传输任务:返向接收月球探测器不小于100 Mbit/s码速率的数据,将月球探测器获取的探测记录、科学数据及宇航员的声音、视频等传到中继测控卫星。

(3) 支持对地高速数据传输任务:要求提供不小于100 Mbit/s码速率的对地数据传输能力,将月球探测器得到的探测记录、科学数据及宇航员的声音、视频等传回地面站。

(4) 实时性要求:中继测控转发的时延要小,特别是月面遥操作和与宇航员的语音通信,不考虑信号传输距离带来的时延,中继测控前返向链路的转发时延都要控制在500 ms以下。

全月面探测任务对月球中继测控卫星的能力需求概括为:高覆盖率、高码速率、高可靠性、强实时性。不同的月球探测任务对中继测控的需求不同,因此月球中继测控卫星系统要根据具体的任务特点来选择最合适的解决方案。

1.2 全月面探测任务对中继测控系统的能力需求

图1为中国深空测控站对月球及其附近探测器的覆盖特性。

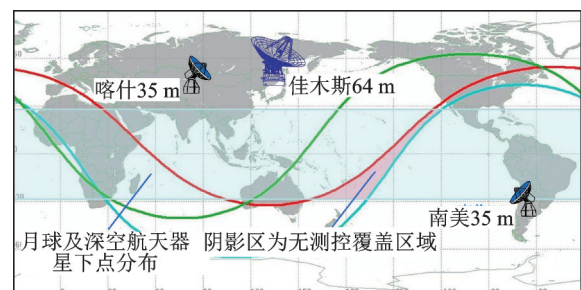


图1 中国深空站对月球及其附近探测器的覆盖情况图
Fig.1 Map of the coverage of China's deep space stations for the moon and its nearby probes

由此可见,目前中国深空站的几何分布,还不能保证月球正面及其附近探测器的实时对地通信,仍存在较小的漏缝。载人月球探测等有连续、实时通信要求任务需要补充天基中继测控设施。

月球天基测控系统需要提供的服务能力主要为:(1) 弥补地球自转导致的测控盲区;(2) 弥补由于潮汐锁定导致的月背测控盲区;(3) 弥补由于月球表面形状带来的正反交界线测控盲区。

全月面探测任务对中继测控系统将为任意月球轨道上的探测器和月面任意位置的着陆器和巡航器提供连续、实时的测控通信保障,并以高码速率将中继测控数据在星-地之间传输。

1.3 月球中继测控系统设计原则

可以预见,未来的月球探测任务的数传与测控仍将以地基深空测控网为主要手段,天基测控系统将是地基测控网的有益补充。

同时,天基测控系统的发展仍需将提升效费比作为系统优化设计与部署策略的首要衡量标准。即以优化月球星座架构设计作为提升效费比的主要手段;以开发可进化、可灵活调整的天基测控系统作为可行途径;以发展天基测控系统的自主维护能力作为终极目标。

2 面向月球探测的天基中继测控系统

2.1 月背与两极探测的天基中继测控系统

月球探测的典型任务主要可分为:月球背面探测任务、月球南极区探测任务以及全月面探测任务。

对于月球背面探测任务,譬如嫦娥4号、嫦娥5号等,可以利用一颗部署于地月L2点轨道上的中继卫星来实现天基中继测控(图2);对于月球南极/北极探测任务,可以将两颗卫星共轭部署于月球冻结大椭圆轨道上,实现对极区的连续的中继测控(图3)。

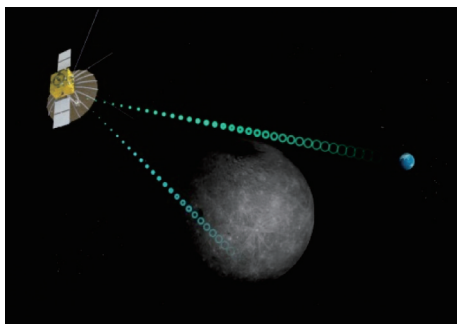


图2 月背任务的的天基中继测控示意图

Fig.2 Schematic diagram of space based relay TT & C for lunar mission

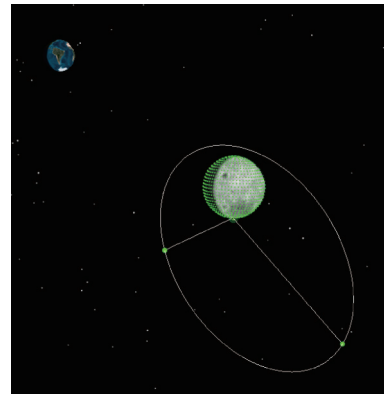


图3 极区任务的的天基中继测控示意图

Fig.3 Schematic diagram of space based relay telemetry, track and command for polar mission

2.2 全月探测的天基中继测控系统

图4为全月探测任务的的天基中继测控系统。为全月探测任务提供中继测控服务的的天基系统设计的需要满足:终极实现全月连续测控,部署策略兼顾任务分阶段实施的需求。

以卫星轨道类型、轨道面分布、轨道高度、星间相对相位为打靶优化设计参数,对全月探测天基中继测控系统进行优化设计。最终选择3颗近月球赤道圆轨道(EMO)卫星与3颗近极月球圆轨道(PMO)卫星组成星座系统的配置方式;卫星运行轨道为高度4 500 km,3颗PMO在一个极轨面内均匀分布,3颗EMO在月球赤道轨道面内均匀分布。

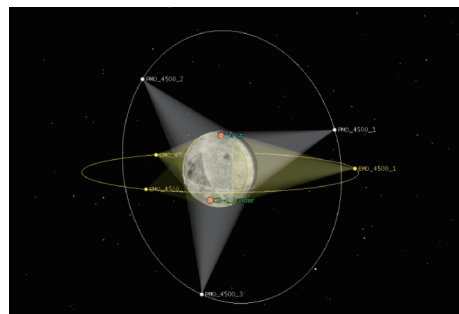


图4 全月探测任务的的天基中继测控系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of space based relay telemetry, track and command system for full moon exploration mission

6星组成的全月球探测的天基中继测控系统具备以下两个特点:

(1) 快速能力提升,即以解决急需和重点不可见区域的连续测控通信为目标,形成局部最优天基测控系统;

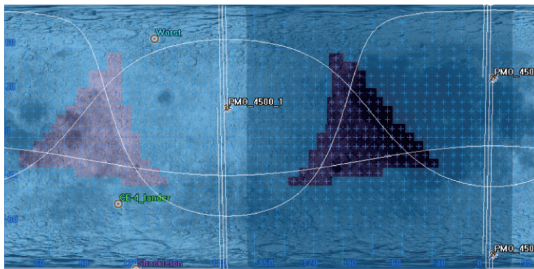
(2) 持续能力提升,即以建立全月空间连续测控通信为目标,分阶段逐步完成面向全月的天基测控系统。

3 全月探测的天基中继测控系统性能分析

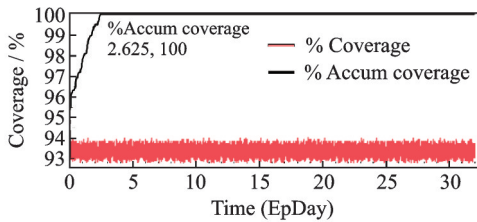
3.1 实时中继测控的能力

考虑到月球表面多环形山的地貌特征,在仿真分析中,将最低仰角设定为 10° ,分别对3颗PMO、3颗EMO、3颗EMO+3颗PMO的部署情况进行了中继测控服务可覆盖区域的分析,如图5~7所示。

由上述仿真结果可见:3颗PMO可满足纬度 57° 以上极区的连续中继测控任务需求;3颗EMO可满足南北纬 33° 之间区域的连续中继测控任务需求;3EMO+3PMO组成的6星系统可满足全月面



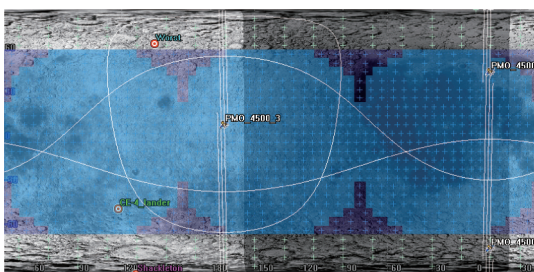
(a) Instantaneous coverage area at a certain time



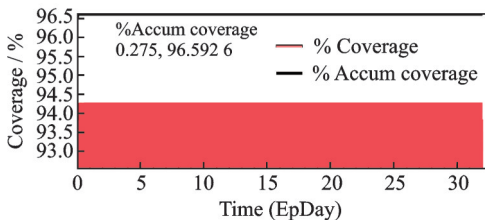
(b) Change history of instantaneous coverage and coverage

图5 3颗PMO对全月探测任务支持的范围

Fig.5 Support of three PMOs for the whole month exploration mission



(a) Instantaneous coverage area at a certain time



(b) Change history of instantaneous coverage and coverage

图6 3颗EMO对全月探测任务支持的范围

Fig.6 Support of three EMOs for the whole month exploration mission

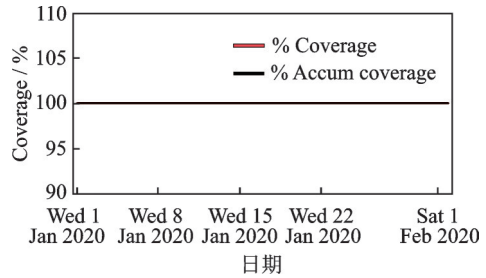


图7 6星系统对全月面的覆盖情况

Fig.7 Coverage of the whole moon by six-satellite system

的连续中继测控任务需求。

这一仿真结果可作为随未来月球探测任务不同部署而调整中继测控系统部署的依据。

3.2 对中纬度区域的中继测控的能力

鉴于月球自传周期与公转周期相同的特点,以嫦娥四号落月点(南纬 45.5°)为例,说明在分阶段部署过程中,连续覆盖区域以外的服务中断情况(图8,9)。

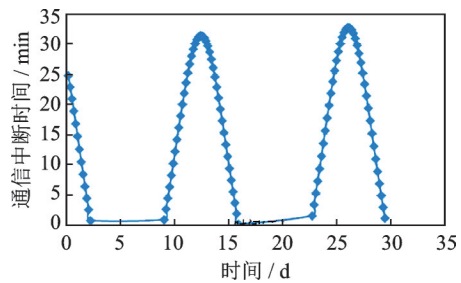


图8 3颗PMO对CE-4落月点通信中断时长的变化历程

Fig.8 Change history of communication interruption duration of three PMOs to CE-4 lunar landing area

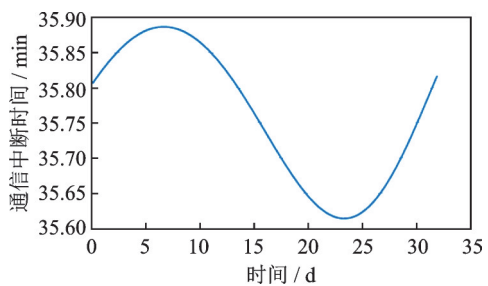


图9 3颗EMO对CE-4落月点通信中断时长的变化历程

Fig.9 Communication interruption duration of three EMOs to CE-4 lunar landing area

由此可见:对于嫦娥4号落月点这类在两类轨道连续覆盖区域之外的中纬度位置,单部署PMO或EMO的分布部署过程中,不可避免地存在服务中断时间,最长约36 min。

3.3 对南极 Shackleton 坑的中继测控的能力

Shackleton坑位于月球南极区,对坑底的探测需要的最低仰角为 22° 。显然部署EMO无法对撞击坑探测器提供中继测控服务;3颗PMO对撞击坑探测

器提供中继测控服务存在时间中断,如图10所示。

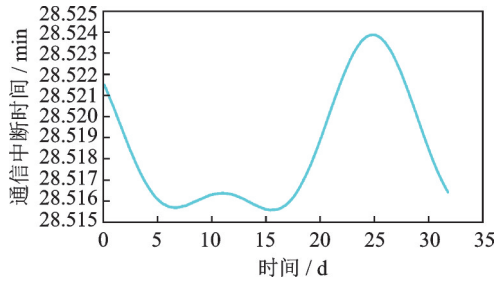


图10 3颗PMO对Shackleton坑通信中断时长的变化历程
Fig.10 Communication interruption duration of three EMOs to Shackleton

由此可见,3颗PMO,即6星系统每天有5~6次的通信中断,每次中断时间约28.5 min。

3.4 对地球GEO上中继卫星的中继能力

基于中国深空站的分布特点,分析了6星组成的全月球探测的天基中继测控系统对地面站(最低仰角8°)的建链时间,如图11所示。

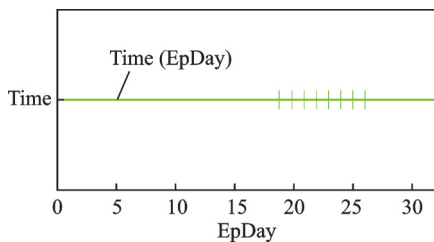


图11 6星系统对中国深空站的建链时间
Fig.11 Access between six-satellite system and deep space stations in China

6星系统对中国深空地面站的接力通信仍存在中断的情况,最长中断时间25 min。

因此,紧急时刻需要全月球探测的天基中继测控系统通过位于GEO上的中继卫星建立通信测控链路。

6星系统对中国3颗地球天链卫星具备实时建链的条件,可以满足紧急时刻的中继测控需求(图12)。

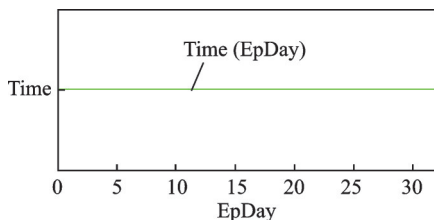


图12 6星系统对中国中继卫星的建链时间
Fig.12 Access between six-satellite system and Chinese relay satellites

4 卫星方案

卫星配置了1.5 m对月球天线、0.4 m的对地

及GEO中继卫星的天线以及0.1 m口径的6星系统间星间激光通信装置,如图13所示。

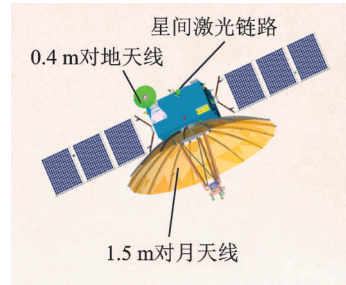


图13 卫星构型与天线配置
Fig.13 Satellite configuration and antenna configuration

载荷的配置使得卫星具备如下通信能力:对月面60 Mbit/s(反向);768 bit/s(前向);星间:~1 Gb@10 000 km;对地:2 kbit/s(上行);80 Mbit/s(下行)。

卫星采用由火箭之间送入地月转移轨道的方式入轨,携带的燃料可提供700 m/s的速度冲量,整星的质量预算见表1。

表1 卫星质量预算
Table 1 Satellite quality budget

序号	项目	质量/kg
1	结构与机构	20
2	热控	5
3	GNC(含推进系统)	21
4	电源(含电缆网)	13
5	星管理	1
6	0.4 m天线(带同服)	10
7	1.5 m天线(园定)	6
8	天线终端	5
9	星间激光踏载	20
10	总装直满件及配	3
11	推进剂	45
12	设计余量	1
总计		150

5 结 论

本文针对全月球探测的中继测控需求,给出了中继测控系统优化设计结果,该系统可分步部署:57°以上极区的探测在前,可先部署PMO卫星;33°以内低纬度区域的探测在前,可先部署EMO卫星;6星系统可满足除特殊点以外的全月球探测的连续中继测控的任务需求。6星系统借助GEO中继卫星可以满足连续、实时中继测控的需求。最后给出了简要的卫星设计方案,该方案中的数据传输速率可根据实际任务需求,通过调整载荷来调整。

参考文献:

- [1] 张立华,吴伟仁.月球中继通信卫星系统发展综述与展望[J].深空探测学报,2018,5(6): 497-505.
ZHANG Lihua, WU Weiren. The development overview and prospect of lunar relay communication satellite system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018,5(6): 497-505.
- [2] 吴伟仁,王琼,唐玉华,等.“嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计[J].深空探测学报,2017,4(2): 111-117.
WU Weiren, WANG Qiong, TANG Yuhua, et al. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 111-117.
- [3] 王家胜.中国数据中继卫星系统及其应用拓展[J].航天器工程,2013,11(1): 1-6.
WANG Jiasheng. China's data relay satellite system and its application prospect[J]. Spacecraft Engineering, 2013,11(1): 1-6.
- [4] CLARK A C. Interplanetary flight[M]. London: Temple Press Books Ltd.,1950: 111-112.
- [5] KLIORE A. The utility of libration point satellites: JPL TM NO.33-154[R]. USA:JPL,1963.
- [6] NEUNER G E. Lunar communication satellites[C]//Proceedings of AIAA Communications Satellite Systems Conference. Washington, D C, USA: AIAA, 1966.
- [7] FARQUHAR R W. The utilization of Halo orbits in advanced lunar operations[R]. USA:AIAA,1971.
- [8] VONBUN O F. A hummingbird for the L2 lunar libration point: NASA TM X-55778[R]. USA: AIAA,1967.
- [9] MELTON G R, THOMPSON C R, STARCHVILLE F T, et al. Project ECHO electronic communications from Halo orbit: NASA-CR-197190[R]. USA: NASA,1995.
- [10] HAMERA K, MOSHER T, GEFREH M, et al. An evolvable lunar communication and navigation constellation concept[C]//Proceedings of 2008 IEEE Aerospace Conference, 26th International Communications Satellite Systems Conference 2008. San Diego, USA:AIAA,2008.
- [11] MIMOUN D, WIECZOREK A M, ALKALAI L, et al. Farside explorer: Unique science from a mission to the farside of the Moon[J]. Experimental Astronomy, 2012,33(2/3): 529-585.
- [12] ANDREAS H, HOMEISTER M. TYCHO: Demonstrator and operational satellite mission to Earth-Moon-libration point EML-4 for communication relay provision as a service[J]. Acta Astronautica, 2015(108): 156-170.
- [13] OLESON S R, MCGUIRE M L. COMPASS final report: Lunar relay satellite (LRS) ; NASA/TM—2012-217140[R]. Cleveland, USA: Glenn Research Center,2012.

(编辑:张蓓)