

美国月球激光通信演示验证——终端设计

宋婷婷 马晶 谭立英 于思源 冉启文

哈尔滨工业大学空间光通信技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 2013年9月6日,美国宇航局(NASA)发射了月球大气与尘埃环境探测器(LADEE)飞船。针对 LADEE 上进行的月球激光通信演示验证(LLCD),从终端设计方面进行综述。LLCD 系统主要包括一个安装在 LADEE 上的太空终端、三个地面终端以及一个协调该演示验证的地面运行中心,其中太空终端主要与一个多孔径望远镜阵列地面终端完成最高数据率为 622 Mb/s 的下行链路以及最高数据率为 20 Mb/s 的上行链路。考虑到该地面终端所在地的天气因素,又选择了两个备用地面终端,用来提供地理多样性,支持该演示验证。

关键词 光通信;月球激光通信演示验证;惯性稳定;多孔径光子计数接收机

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.050003

Lunar Laser Communication Demonstration in USA: Terminal Design

Song Tingting Ma Jing Tan Liying Yu Siyuan Ran Qiwen

*Free Space Optical Communication Technology Research Center, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150080, China*

Abstract The US National Aeronautics and Space Administration (NASA) has launched the Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE) spacecraft on September 6th, 2013. We review the terminal design of the lunar laser communication demonstration (LLCD) on LADEE, while the experiment design and development of the LLCD will be reviewed in another paper. LLCD system mainly includes one space terminal onboard, three earth-based terminals and one earth-based operation center for coordination, where bidirectional laser communications are mainly performed between the space terminal and the multi-aperture telescope array earth-based terminal at downlink data rates up to 622 Mb/s and uplink up to 20 Mb/s. When the weather is considered, two additional earth-based terminals, as back-ups for support, provide geographic diversity.

Key words optical communications; lunar laser communication demonstration; inertial stabilization; multi-aperture photon counting receiver

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 010.0280; 280.3420

1 引言

与无线电通信相比,激光通信具有很大优势,能够在更小尺寸、质量和功率(SWAP)的空载终端和地面终端之间完成更高数据率的通信。近几年来,世界上已多次完成近地卫星之间、近地卫星与单/多个地面站之间的单/双向激光通信^[1-5]。

美国宇航局(NASA)也大力发展激光通信。2003年起,NASA开始发展火星激光通信演示验证(MLCD)任务。MLCD的太空终端安装在火星轨道飞行器(MTO)上,由麻省理工学院林肯实验室(MIT/LL)研发。遗憾的是,由于MTO在2005年取消,NASA被迫终止MLCD任务。2008年起,NASA开始发展月球大气与尘埃环境探测器(LADEE)任务。安装在该无人绕月探测飞船上的太空终端和地球上的一个主要地面终端仍然由MIT/LL设计、制造、测试和运行,其中一些终端设计继承了MLCD。考虑到天气因素,NASA随后又增加了两个备用地面终端。2011~2012年间,NASA成功进行从激光测距地面站到月球勘测轨道器的单向同时

收稿日期: 2013-11-20; 收到修改稿日期: 2013-12-17; 网络出版日期: 2014-04-10

作者简介: 宋婷婷(1987—),女,博士研究生,主要从事星地激光通信系统方面的研究。E-mail: hit.tingtingsong@gmail.com

导师简介: 马晶(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事空间光通信方面的研究。E-mail: majing@hit.edu.cn

激光通信和测距,进一步为 LLCD 任务的激光通信和测距做准备^[6]。

LLCD 是世界上首次月地距离的激光通信任务,也是 NASA 首次太空高速双向激光通信任务。NASA 已确定把激光通信作为未来太空通信的一项重要技术,LLCD 终端系统将作为今后激光终端的设计基础^[7-8]。本文将详细阐述 LLCD 系统的太空终端和地面终端的设计。

2 LLCD 的太空激光终端

LLCD 系统包括一个太空激光终端、三个地面激光终端以及协调各激光终端的运行中心。本节先介绍安装在 LADEE 飞船上的太空激光终端——月球激光通信太空终端(LLST)。

LLST 包括三个模块:光学模块、调制解调器模块和控制器电子学模块。这三个模块在 LADEE 飞船的载荷组件中,如图 1 所示^[9],较大的光学模块位于载荷组件的外表面,用来平衡重心并可使激光束准确指向地球,其他两个模块位于飞船内部^[10]。LLST 载荷重约 30 kg,在最大约 140 W 的平均功率下操作,与太空中的无线电通信终端相比,LLST 具有更小的 SWAP^[9]。

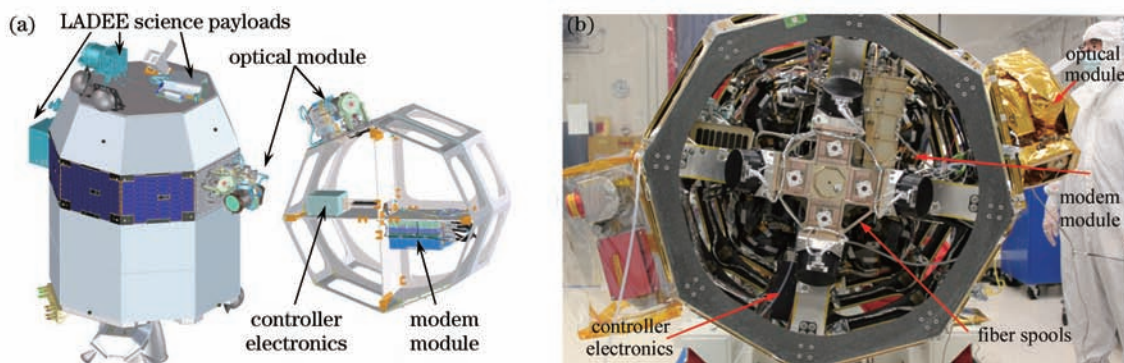


图 1 LLST 中各模块在 LADEE 飞船上的分布。(a) LADEE 外表面和 LLST;(b) LLST 安装到 LADEE 上的状态

Fig.1 LLST payload module configuration on the LADEE spacecraft. (a) LADEE external surface and LLST; (b) LLST integration onto LADEE

光学模块主要包括商用两轴万向架、商用磁流体动力惯性参考单元(MIRU)、已开发的 10 cm 反射式 Cassegrain 望远镜、空间捕获探测器以及光纤器件等,如图 2 所示^[11-12]。望远镜通过 MIRU 安装在万向架上,保证光链路在宽范围的飞船方位内操作(如粗瞄准)^[7,13]。MIRU 继承 MLCD 终端的设计,当 MIRU 中角速率传感器检测到角扰动时,使用音圈驱动器抑制角扰动,使望远镜和后端光学器件保持惯性稳定^[11]。In-GaAs 四象限探测器的宽视场(约 2 mrad)对上行链路信号进行空间捕获和粗跟踪。光学模块在发射时由保护盖和一次性发射锁进行位置锁定和保护。光学模块(望远镜)通过单模光纤耦合至调制解调器模块的电光板中。

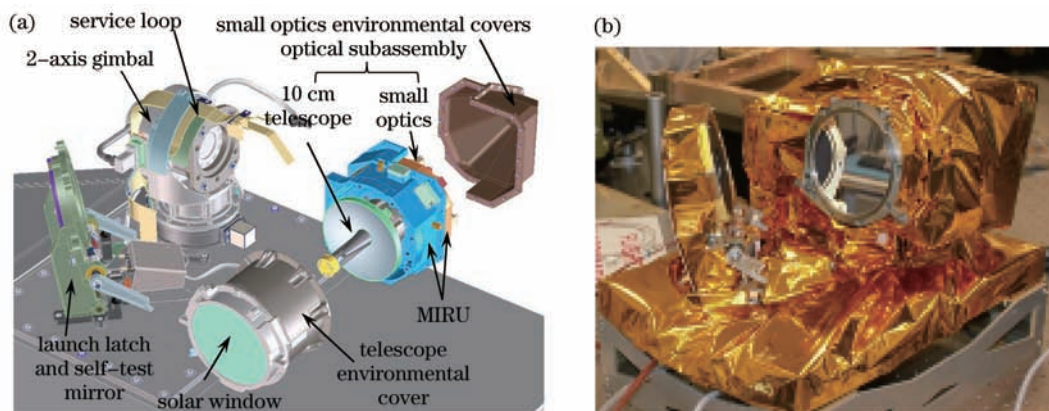


图 2 光学模块示意图。(a)光学模块的主要构造;(b)光学模块的整体结构

Fig.2 Schematic of the optical module. (a) Optical module configuration; (b) optical module integration

调制解调器可产生高达 622 Mb/s 的下行链路信号并处理上行链路接收信号。它采用模块化设计,主要包括四片纵向叠放的薄板,如图 3 所示。电光(E/O)板包括 0.5 W 主振荡功率放大器(MOPA)、前置放大器和探测器以及电光器件等,用于产生和放大下行链路信号以及接收和解调上行链路信号。模拟板在接收和解调上行链路信号时用于对模拟信号进行处理。功率板对一些主要功能进行功率调节。数字板包括高速数字器件。四片板均与外部电缆连接。除上述四片板外,调制解调器还提供与 LADEE 飞船连接的高速数据接口板,用于飞船遥测数据和仪器科学数据的下行链路传输。这种模块化设计的优点是每片板能够并行设计和测试,减少了安装和测试时间,并可根据需求灵活设计^[14-15]。图中 FPGA 为现场可编程门阵列。

控制器电子学模块是一个定制的、基于单板计算机的航天电子学模块,如图 4 所示。该模块与光学模块和调制解调器模块均相连,并与飞船相连。该模块具有与光学模块中所有传感器和执行器的输入/输出接口^[11],提供了光学模块中各种执行器的闭环控制算法,使光学模块及其光束稳定。它还配置及传输到达调制解调器模块的指令,控制调制解调器模块。此外,该模块还提供了对飞船上 LLST 载荷的指令和遥测接口,用来传输接收的上行链路指令、下行链路的遥测数据以及从飞船中得到的其他信息如时间和飞船姿态等^[11,14]。

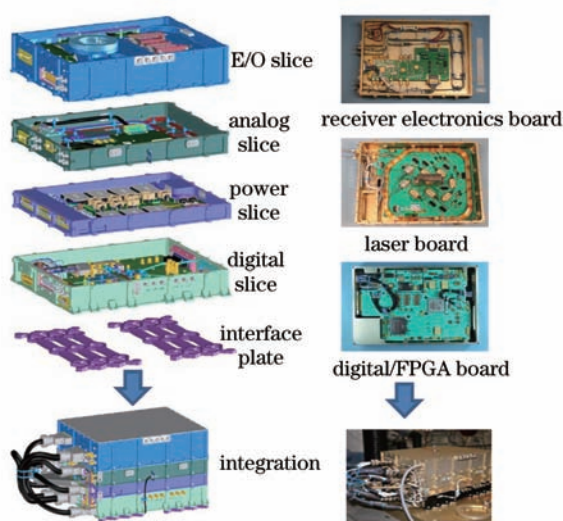


图3 调制解调器模块示意图

Fig.3 Schematic of the modem module



图4 飞行件控制器电子学模块

Fig.4 Flight controller electronics

3 LLCD 的地面激光终端和运行中心

最初 LLCD 系统的地面设施包括可移动的月球激光通信地面终端(LLGT)和月球激光通信运行中心(LLOC)。后来考虑到 LLGT 所处的天气条件,增加了两个与 LLGT 天气独立的备用地面终端,分别为在美国喷气推进实验室(JPL)光通信望远镜实验室(OCTL)的月球激光通信 OCTL 终端(LLOT)以及在欧洲空间局(ESA)光学地面站的月球激光通信光学地面系统(LLOGS)。各地面终端和太空终端的协调均由 LLOC 完成^[7]。下面对这些地面设施进行阐述。

3.1 LLGT

LLGT 是 LLCD 的主要地面终端。具有温控外壳的 LLGT 高约 4.5 m,总质量约 7 t,与目前的无线电通信地面天线相比,尺寸和质量减少约 75%^[16]。LLCD 的目标之一是演示验证把多个中小型尺寸孔径集成为一个等效大孔径进行光信号收发技术^[7]。因此,LLGT 包括一个由八组收发机和接收机望远镜组成的阵列以及一个控制室,如图 5 所示^[9]。

望远镜阵列中,上行链路的发送采用四组自制的 15 cm 折射式收发机望远镜,下行链路的接收采用四组商用的 40 cm 反射式接收机望远镜,如图 6(a)所示。这种等效大孔径望远镜阵列可扩展,能节约成本^[10],此外还提供了空间分集,有助于减轻大气湍流对光上下行链路信号的不利影响^[17]。八组望远镜全部安装在一个单独的俯仰轴-方位轴万向架上,万向架提供对望远镜阵列接近半球覆盖的粗瞄准,如图 6(b)所示。在光链路所需

的瞄准范围内,单一万向架简化了对发送和接收波形的时间校正过程^[15]。每个望远镜的后端光学器件包括宽视场焦平面阵列探测器和快速控制反射镜,如图6(c)所示。望远镜阵列安装在玻璃纤维温控外壳中,维持合适的工作环境。在未使用LLGT时,望远镜置于滑动的纤维钢盖内防护降水和大风天气,如图5(a)所示。后续发展中,望远镜置于蛤壳式圆顶内防护天气,图5(b)为在选定通信地点 White Sands 处的 LLGT^[7,9]。

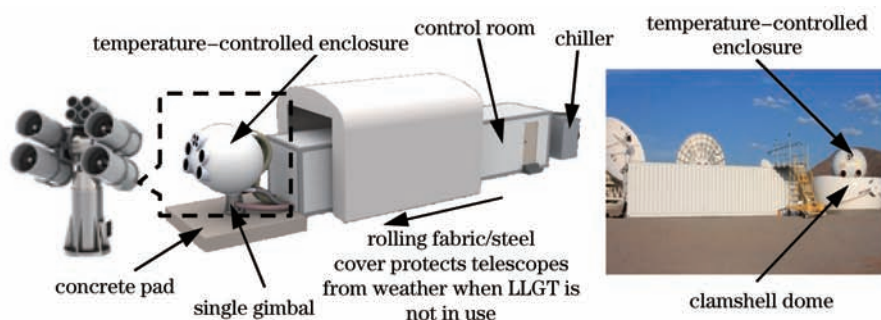


图5 LLGT示意图。(a)望远镜阵列和滑动钢盖防护的LLGT;(b)蛤壳式圆顶防护的LLGT

Fig.5 Schematic of the LLGT. (a) Telescope array and rolling fabric/steel cover protected LLGT; (b) clamshell dome protected LLGT

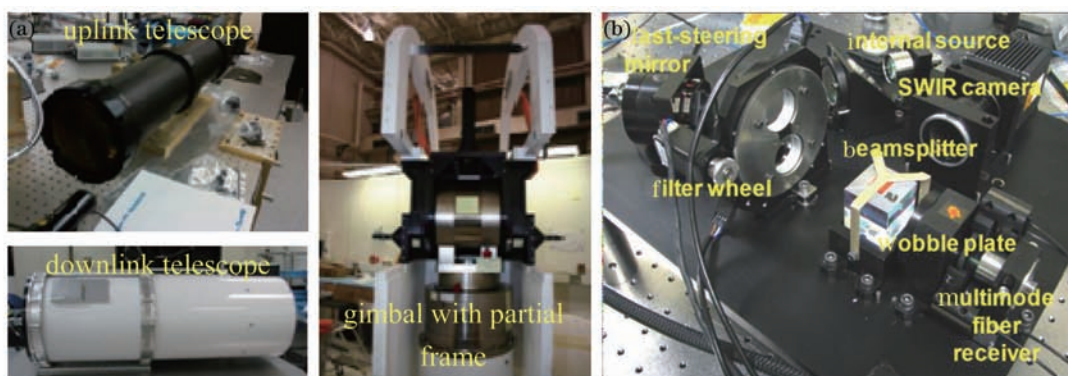


图6 LLGT的光学器件和结构。(a)上/下行链路望远镜;(b)具有部分框架结构的万向架;(c)后端光学器件

Fig.6 LLGT optics and structure. (a) Uplink/downlink telescope; (b) gimbal with partial frame; (c) back-end optics

望远镜阵列的全部望远镜均通过光纤耦合至控制室。如图5(a)所示,控制室置于改装的长约12 m的标准化海运集装箱内^[7]。控制室内放置着光发送机的低功率部分、光接收机、系统的所有电子设备、控制和监控装置、空气处理器和办公室。控制室旁的冷却装置提供对望远镜、He压缩机和控制室的降温^[9,16]。

接收机系统基于光子计数超导纳米线阵列^[18],如图7(a)所示。这些单光子探测器在低温机架中工作,如图7(b)所示,提供高数据率下行链路所需的高探测效率(大于50%)、低抖动(半峰全宽约60 ps)、低噪音(小于50 kHz的暗计数率)以及快速的探测器响应(约15 ns的重启时间)^[19-20]。另一机架安装有高速电子设备,具有与各种数据源和目标的接口,如图7(c)所示^[9],可对纳米线阵列的输出进行处理,并可比较上下行链路的定时来推导出高精度的往返链路时间^[16]。

发送机系统中,四个基于掺铒光纤放大器(EDFA)的10 W光发送机发送PPM信号。初始设计时,每个发送机通过保偏(PM)单模光纤(SMF)耦合至其中一个收发机望远镜中^[21]。后来,为了简化发送机设计,并提供一种进入望远镜的稳定偏振发射状态,在最终系统中使用了具有 $125 \mu\text{m}^2$ 有效纤芯截面积的超大截面单模光纤(比SMF-28和1550 nm PM-PANDA这两种光纤约 $80 \mu\text{m}^2$ 的标准截面大56%),可以减轻高功率信号通过单模光纤耦合到望远镜时的光学非线性^[22]。望远镜通过高速电子设备,以高达20 Mb/s的数据率发送上行链路信标和通信数据,其中两者的功率比可变。

可移动LLGT的选址受天气因素影响。最初计划把LLGT置于新墨西哥州的White Sands^[11]。后来考虑到White Sands的夏季暴雨天气及云层覆盖会影响通信链路,曾打算为LLGT另选通信地点^[9]。最终,确定LLGT仍放置在White Sands,但增加两个与LLGT天气独立的备用地面终端^[7]。当LLGT天气异常时,LLST可在LLOC的协调下与备用终端通信。LLGT已于2013年5月运至White Sands。

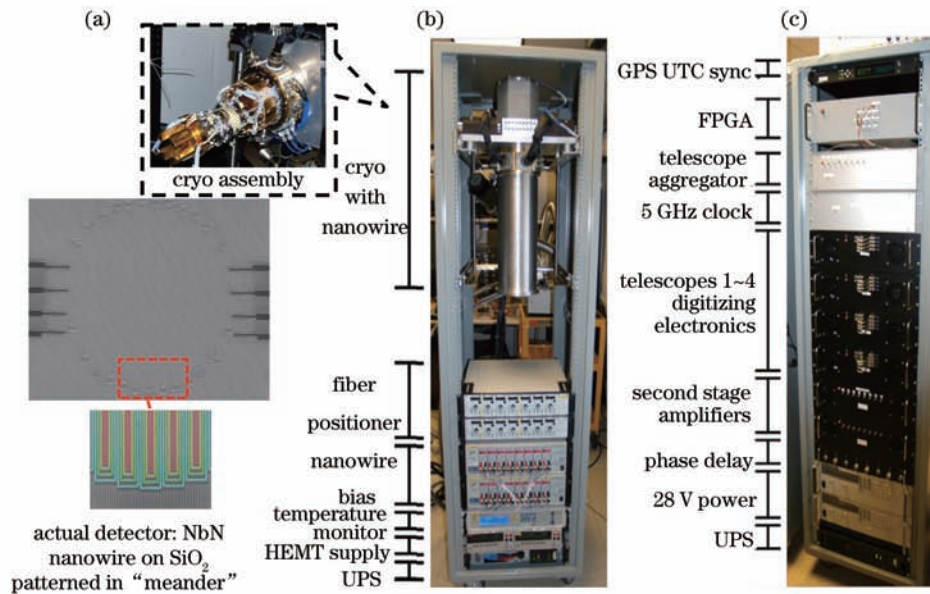


图7 LLGT超导纳米线阵列子系统。(a)探测器中相互缠绕的四纳米线;(b)低温机架;(c)高速电子设备机架

Fig.7 LLGT superconducting nanowire subsystems. (a) Detector with 4 intertwined nanowires; (b) cryo in rack; (c) high speed electronics in rack

3.2 LLOT

OCTL坐落在加利福尼亚州JPL的Table Mountain Facility上,该处的天气与LLST独立,且适于进行激光通信,因此JPL设计的LLOT选择了该OCTL。如图8(a)、(b)所示,OCTL基于一个封装在永久圆顶结构中、由万向架固定的1 m直径 $F/76$ 大焦比望远镜,该望远镜配备有宽角度的光子计数光电倍增管(PMT)接收机和多细光束上行链路^[9,16]。

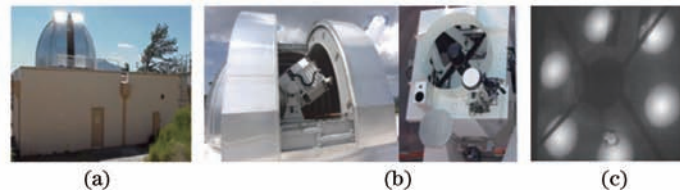


图8 LLOT及其光学系统。(a) OCTL;(b) OCTL望远镜;(c)多光束信标在主镜上形成六边形图案

Fig.8 LLOT and its optical systems. (a) OCTL; (b) OCTL telescope; (c) multi-beam beacon forming a hexagonal pattern on the primary mirror

LLOT仅有接收功能,但可提供上行链路信标。为了达到信标光的高亮度以及在LLST处信标光所需的通量连续性,LLOT光学系统通过六个1568 nm光纤发送机,从1 m主望远镜的不同子孔径同时发送六束独立控制的信标光,如图8(c)所示。LLOT的信标光具有缩放系统,可从最初的宽信标缩放到LLST捕获后的窄信标。LLOT的这种多光束信标和信标缩放功能独具特色^[23-24]。

通信时,使用同一望远镜接收下行链路信号,望远镜孔径能观察到双向信号的结合。LLOT计划以39 Mb/s数据率接收下行链路数据及发送上行链路信标,比LLGT最高下行链路数据率622 Mb/s小得多。需注意,由于OCTL不能完成上行链路所需的时钟锁定,在下行链路接收时使用一个不同步的LLST时钟。接收机在同步和解码接收密钥后再对信号做后处理^[24]。LLOT的后处理接收机可提供有限的实时链路诊断,确保LLCD信号接收和记录。作为备用地面终端,LLOT接收机的这种非实时性可节约成本^[25]。

3.3 LLOGS

坐落在西班牙Tenerife岛上的ESA光学地面站(OGS)被选为另一个备用地面终端地点,如图9(a)所示,即前文中的LLOGS。类似于LLOT,OGS也基于一个封装在永久圆顶结构中、由万向架固定的1 m直径望远镜,如图9(b)所示^[16]。由于月球通信链路需要非常严格的光学隔离,因此LLOGS的发送机和接收机系统需要几何分离,为此还设计了相应的对准方案。

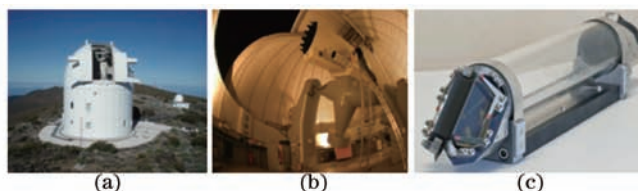


图9 LLOGS及其光学系统。(a)ESA的OGS外景;(b)开放圆顶OGS望远镜;(c)角锥棱镜后向反射器

Fig.9 LLOGS and its optical systems. (a) General view of OGS; (b) OGS telescope in the open dome; (c) corner-cube retro-reflector

由于LLST的信号强度很弱,光接收机需要使损耗最小,因此LLOGS安装在卡塞格林望远镜的Ritchey-Chretien系统中,此处需要最少的光学器件(两个反射面)。接收机系统主要包括数据接收机、增强型光探测器(IPD)、位于望远镜主焦点处的捕获和跟踪相机(ATC)以及一些附加器件如可控的1/4波片等等。旋转1/4波片可调整到达ATC及到达IPD和数据接收机的光功率比。由于数据接收机的视场能覆盖所有可能的到达角起伏,因此该设计不包括快速倾斜补偿回路。

考虑到光学隔离,光发送机的两个4 cm望远镜作为悬臂梁置于1 m主望远镜上,每个望远镜发送20 W信标信号。为了对准发送机和接收机的光轴,每个发送光束前放置一个高精度角锥棱镜后向反射器,后向反射光可进入望远镜孔径,如图9(c)所示。当各光束置于ATC的同一位置时,校准完成^[26]。

2013年7月,LLOGS使用新的探测器和解码系统,在实验室中测试了NASA激光终端仿真器和ESA设备的硬件兼容性,并建立上行链路、下行链路和实现测距。这种跨机构的光学兼容性测试尚属首次^[27]。

3.4 LLOC

LLOC由MIT/LL建立,并位于MIT/LL。它协调整个LLCD系统的工作(如LLST与各地面终端之间的链路)^[11],并与LADEE科学运行中心及LADEE任务运行中心合作,共同协调LADEE飞船中有关LLCD的活动^[9]。

4 结 论

本文针对NASA首次月地距离的高速双向激光通信,从终端设计方面进行综述。安装在LADEE飞船上的LLCD太空终端已于2013年10月17日开始与LLGT和LLOT进行激光通信,并于2013年10月26日开始与LLOGS进行通信。除了激光通信外,该演示验证还以优于1 cm的测距精度连续进行了月地距离测量^[28-29]。这些具体的LLCD实验设计及LLCD的后续发展将另文详细综述。

参 考 文 献

- Zhao Shanghong, Wu Jili, Li Yongjun, *et al.*. Present status and developing trends of satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(9): 092801.
赵尚弘, 吴继礼, 李勇军, 等. 卫星激光通信现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(9): 092801.
- Yan Aimin, Zhou Yu, Sun Jianfeng, *et al.*. Technology and progress of compound-axis pointing in satellite laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(4): 040601.
闫爱民, 周煜, 孙建锋, 等. 卫星激光通信复合轴光跟踪技术及发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(4): 040601.
- Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *et al.*. Research of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706017.
马小平, 孙建锋, 职亚楠, 等. DPSK调制/自差动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706017.
- Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.*. Optical principle research of space laser communication network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1006003.
姜会林, 胡源, 丁莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1006003.
- Liu Liren. Laser communications in space I: optical link and terminal technology [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(1): 3-20.
刘立人. 卫星激光通信 I: 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, 34(1): 3-20.
- X Sun, D R Skillman, E D Hoffman, *et al.*. Free space laser communication experiments from Earth to the Lunar Reconnaissance Orbiter in lunar orbit [J]. *Opt Express*, 2013, 21(2): 1865-1871.

- 7 D M Boroson, B S Robinson. Status of the Lunar Laser Communication demonstration [C]. SPIE, 2013, 8610: 861002.
- 8 B L Edwards, D Israel, K Wilson, *et al.*. Overview of the laser communications relay demonstration project [C]. Proceedings of Space Ops, 2012. 11–15.
- 9 D M Boroson, B S Robinson, D A Burianek, *et al.*. Overview and status of the Lunar Laser Communications Demonstration [C]. SPIE, 2012, 8246: 82460C.
- 10 B Hine, S Spremo, M Turner, *et al.*. The Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer mission [C]. 2010 IEEE Aerospace Conference, 2010.
- 11 D M Boroson, J J Scozzafava, D V Murphy, *et al.*. The lunar laser communications demonstration (LLCD) [C]. Third IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, 2009. 23–28.
- 12 B L Edwards. Overview of NASA's Laser Communications Relay Demonstration [C]. CCSDS 2012 Spring Meetings, 2012.
- 13 J W Burnside, S D Conrad, A D Pillsbury, *et al.*. Design of an inertially stabilized telescope for the LLCD [C]. SPIE, 2011, 7923: 79230L.
- 14 NASA/GSFC. Space Terminal of the LLCD [EB/OL]. <http://esc.gsfc.nasa.gov/267/271/Space-Terminal.html>. [2013-11-10].
- 15 S Constantine, L E Elgin, M L Stevens, *et al.*. Design of a high-speed space modem for the Lunar Laser Communications Demonstration [C]. SPIE, 2011, 7923: 792308.
- 16 NASA/GSFC. Ground Segment of the LLCD [EB/OL]. <http://esc.gsfc.nasa.gov/267/271/Ground-Segment.html>. [2013-11-10]
- 17 B S Robinson, D M Boroson, D A Burianek, *et al.*. The Lunar Laser Communications Demonstration [C]. 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2011. 54–57.
- 18 E A Dauler, B S Robinson, A J Kerman, *et al.*. Multi-element superconducting nanowire single-photon detector [J]. IEEE Trans Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 279–284.
- 19 M E Grein, A J Kerman, E A Dauler, *et al.*. Design of a ground-based optical receiver for the Lunar Laser Communications Demonstration [C]. 2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2011. 78–82.
- 20 M Willis, A J Kerman, M E Grein, *et al.*. Performance of a multimode photon-counting optical receiver for the NASA Lunar Laser Communications Demonstration [C]. 2012 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2012. 4–3.
- 21 D O Caplan, J J Carneya, R E Lafonb, *et al.*. Design of a 40 watt 1.55 μm uplink transmitter for lunar laser communications [C]. SPIE, 2012, 8246: 82460M.
- 22 Schulein R T, Lafon R E, Taylor M B, *et al.*. Nonlinearity mitigation of a 40-watt 1.55-micron uplink transmitter for lunar laser communications [C]. SPIE, 2013, 8610: 86100F.
- 23 A Biswas, J M Kovalik. The Lunar Laser OCTL Terminal (LLOT) [C]. SPIE, 2013, 8610: 86100O.
- 24 W T Roberts, M W Wright. The Lunar laser OCTL terminal (LLOT) optical systems [C]. SPIE, 2013, 8610: 86100P.
- 25 M Srinivasan, K Birnbaum, M Cheng, *et al.*. A post-processing receiver for the lunar laser communications demonstration project [C]. SPIE, 2013, 8610: 86100Q.
- 26 M Sans, Z Sodnik, I Zayer, *et al.*. Design of the ESA Optical Ground Station for participation in LLCD [C]. 2012 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2012. 3–1.
- 27 ESA. Laser Communications Set for Moon Mission [EB/OL]. http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Laser_communications_set_for_Moon_mission. [2013-11-10].
- 28 NASA/GSFC. Lunar Laser Communication Demonstration on LADEE Achieves World-Record Data Download Speeds from the Moon [EB/OL]. <http://esc.gsfc.nasa.gov/267/278/279/486.html>. [2013-11-10].
- 29 ESA. Moon Mission Beams Laser Data to ESA Station [EB/OL]. http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Moon_mission_beams_laser_data_to_ESA_station. [2013-11-10].