

美国月球激光通信演示验证——实验设计和后续发展

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 针对2013年9月6日美国宇航局(NASA)发射的月球大气与尘埃环境探测器飞船上进行的月球激光通信演示验证(LLCD),从实验设计和后续发展方面进行综述。实验中,飞船上的LLCD太空终端与主要的月球激光通信地面终端或与欧洲空间局的月球激光通信地面系统完成双向通信,而与美国喷气推进实验室的月球激光通信“光通信望远镜实验室”(OCTL)终端仅进行下行链路通信。LLCD系统还进行了优于厘米精度测距的双向飞行时间测量。未来NASA的激光通信中继演示验证任务将基于LLCD系统的相关设计。最后对LLCD的启示进行了讨论。

关键词 光通信;月球激光通信演示验证;激光通信;飞行时间测量;激光通信中继验证

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.040004

Experiment Design and Development of the Lunar Laser Communication Demonstration in USA

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 We review the experiment design and development of the lunar laser communication demonstration (LLCD) on the Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer spacecraft launched by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) of USA on September 6th, 2013. When the space terminal is in orbit, bidirectional communications are performed with the main lunar laser communication ground terminal or with the European Space Agency's lunar laser communication optical ground system, but only downlink communications are performed with the Jet Propulsion Laboratory's lunar laser communication optical communications telescope laboratory (OCTL) terminal. Besides laser communication, bidirectional time-of-flight measurements are performed by LLCD system with sub-centimeter ranging accuracy. The future NASA laser communication relay demonstration will be developed on the basis of LLCD system. Finally we discuss the knowledge learned from LLCD.

Key words optical communications; lunar laser communication demonstration; laser communication; time-of-flight measurement; laser communication relay demonstration

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 010.0280; 280.3420

1 引言

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,其上安装的月球激光通信终端正与地球进行月球激光通信演示验证(LLCD)。LLCD主要完成飞船上太空终端与地球上地面终端之间的双向激光通信,可提供高达622 Mb/s数据率的下行链路和高达20 Mb/s数据率的上行链路。除了激光通信,LLCD系统还可对上下行数字数据时钟进行锁相,同时完成通信和高于厘米精度测距的飞行时间测量,其中测距数据作为通信时钟数据恢复的副产物^[1]。

收稿日期: 2013-10-12; 收到修改稿日期: 2013-12-05; 网络出版日期: 2014-03-25

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

LLCD 仅在 LADEE 的在轨调试阶段进行操作^[2]。由于时间有限,因此仅简单验证了月地激光通信的主要功能及它对未来深空任务的潜在优势。未来将改进基于 LLCD 系统的太空终端和地面终端结构,用于长期太空激光通信^[3]。

本文将详细介绍 LLCD 的实验设计和后续发展,并讨论 LLCD 的启示。

2 LLCD 的系统组成概述

LLCD 系统最初包括一个月球激光通信太空终端(LLST)、一个主要的月球激光通信地面终端(LLGT)以及月球激光通信运行中心(LLOC)。LLGT 可移动,但在 LLCD 任务进行时已置于新墨西哥州的 White Sands。

2011~2012 年间,考虑到 LLGT 通信时的天气因素,基于全球已有的光学地面站条件,增加了两个备用地面终端。一个备用终端位于加利福尼亚州 Table Mountain Facility 的美国喷气推进实验室(JPL)光通信望远镜实验室(OCTL)处,称为月球激光通信 OCTL 终端(LLOT);另一个位于加纳利群岛 Tenerife 的欧洲空间局(ESA)光学地面站(OGS)处,称为月球激光通信光学地面系统(LLOGS)。这两个地点的天气均与 LLGT 独立,能够在 LLGT 天气不符合通信要求时“切换”地面终端。这种地面终端的“切换”以及与 LLCD 相关的协调工作均由坐落在麻省理工学院材肯实验室(MIT/LL)的 LLOC 完成^[1]。

下面就介绍以上 LLCD 系统从立项到最终演示验证结束的发展过程和实验设计。

3 LLCD 的发展过程和实验设计

3.1 飞船发射前 LLCD 的主要发展过程

2008 年 6 月中旬,NASA 决定在 LADEE 上安装 LLCD。同年 7 月,确定 MIT/LL 作为 LLCD 系统的设计和制造部门。2009 年 6 月,LLCD 进行初步设计评审,并在 2010 年 7 月完成关键设计评审,开始制造^[4]。由于 LLCD 不是飞船的关键任务,因此 LLCD 终端的交付时间必须与飞船的安装主进度计划一致。2011 年 9 月前,MIT/LL 完成 LLST 鉴定件和飞行件中光学模块的装配及飞行件中调制解调器模块的装配,并测试鉴定件^[5]。2012 年 8 月,LLCD 工程模型/控制器电子学模块及两个科学载荷飞行件安装到飞船上,同时 LLST 飞行件仍在进行性能测试^[6]。当所有科学载荷飞行件均安装到飞船上、且飞船整体完成电磁干扰测试和机械测试后,2013 年 1 月起,LLST 飞行件的光学模块和调制解调器模块安装到飞船上,并从 3 月起进行飞船整体的热真空测试^[7]。

当飞船的所有环境测试和性能测试结束后,安装有 LLST 的飞船在 2013 年 6 月到达维吉尼亚州的发射地点 Wallops Island 做最后准备^[8]。2013 年 9 月 6 日,LADEE 如期发射^[9]。

3.2 飞船发射后、到达月球轨道前的 LLCD 发展过程

飞船发射后,需要经过若干次轨道转移才到达月球轨道^[9]。自 2013 年 9 月 13 日开始的首次近地点机动中,所有科学仪器均在上电后成功完成发射后的状态和功能测试。其中在 2013 年 9 月 16 日,LLST 成功完成首次电学测试。这些测试并不包括与地球进行的光学传输,但该测试对所有 LLST 系统进行了检查,确保它们在飞船发射后状态良好,为后续实验做准备^[10]。需说明的是,考虑到燃烧和排气造成的污染,所有仪器在测试时均保持孔径覆盖,但仍能进行通电测试^[2]。2013 年 9 月 27 日,LLST 在上电后移除了孔径覆盖,并进行了 LADEE 飞船信号的早期捕获校准测试^[11-12]。

3.3 飞船在轨后 LLCD 的实验设计

在飞船进入月球轨道的过程中,经过 2013 年 10 月 6 日~10 月 12 日的三次月球轨道导入(LOI)机动后,飞船到达距月球表面 235~250 km(月地距离约 3.8×10^5 km)、轨道周期为 2 h 的调试轨道^[12],开始为期 40 d 的调试阶段^[13]。此阶段会有 30 d 进行 LLCD 任务^[11]。LLCD 任务计划在白天/夜间、满月/新月、高海拔/低海拔(从地面终端的角度观察,具有不同的瞄准位置)以及各种大气条件下进行操作,从而在不同条件下验证激光通信技术的可行性。此阶段结束后,飞船会转移到更低的科学轨道(约 50 km),进行约 100 d 的主要科学载荷任务。

在 2013 年 10 月 17 日深夜,开始进行 LLCD 任务的首次尝试^[14]。由于飞船在飞往月球途中已经过瞄准(捕获)校准,当 10 月 18 日凌晨飞船首次成功过顶时,几乎在飞船上激光开启的同时 LLGT 就立即锁定了信

号,完成了激光通过程中的重要一步^[15],随后飞船与 LLGT 完成数据率为 622 Mb/s 的下行链路^[11]。在接下来的 3 d,飞船还分别与 LLGT 完成了数据率为 20 Mb/s 的无差错上行链路以及与 LLOT 的下行链路,并在这些首次激光通信验证中,提供了对月地距离的连续测量,测量精度优于 1 cm。ESA 也从 2013 年 10 月 26 日起开始与 LLST 进行数据率为 40 Mb/s 的下行链路和 20 Mb/s 的上行链路,并精确测量月地距离以及监测激光通过大气的传输情况。这些首次通信结果大大超出了预期^[14-16]。下面详细介绍 LLCD 和双向飞行时间测距的具体实验过程。

LLCD 进行时,飞船会围绕月球赤道以约 2 h 周期(122~132 min)飞行。飞船必须以非常高的精度(误差差小于 1°)瞄准 LLGT^[2]。由于 LLGT 必须在可进行激光通信的视野内,因此每天可提供 3~5 次通信轨道机会^[17]。当月球在 LLGT 视野内时,每次轨道周期约有 65 min 的窗口使飞船在 LLGT 视野内,但飞船上的功率和热学因素限制了 LLST 在这个窗口内仅有 15~30 min 的实际操作时间。在 LLST 短暂的操作周期内,两终端彼此空间捕获,并进行上下行链路以及飞行时间测量^[1],若干地面设施也会参与 LLCD 的管理、协调和控制^[17],如图 1 所示。在 LLST 的连续轨道之间,飞船会调整方向,使其具有最佳输出功率和热稳定性。

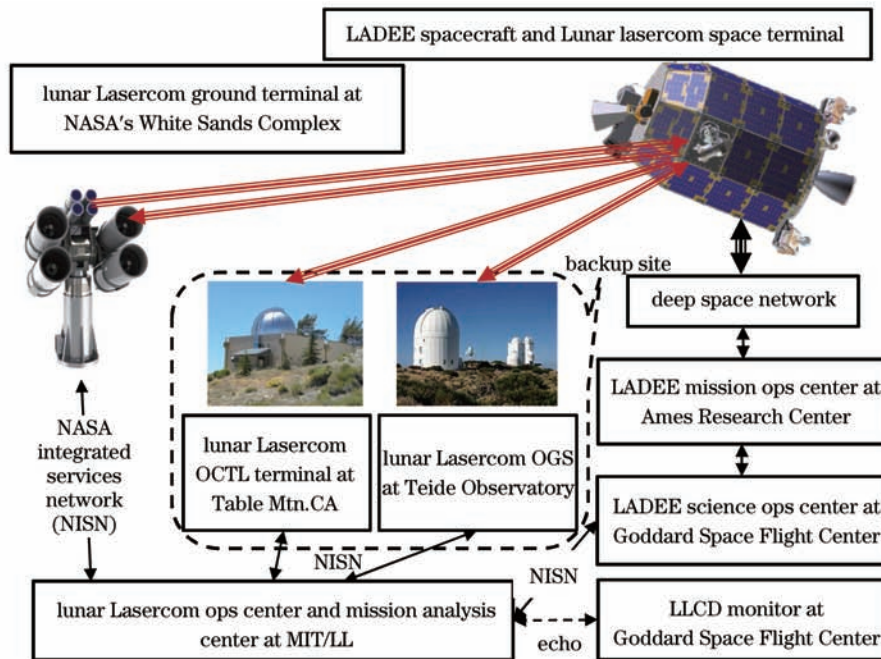


图 1 LLCD 的工作系统

Fig.1 LLCD working system

1) 空间捕获和跟踪:通信开始前,LLST 和 LLGT 的瞄准和位置不确定性很大,需要空间捕获。捕获时,在 LLGT 瞄准的不确定区域上,LLST 扫描约 $45 \mu\text{rad}$ 的散焦信标光。每次扫描时 LLGT 存在足够长时间,使 LLST 探测到上行链路光束,接着 LLST 的万向架和磁流体动力惯性参考单元(MIRU)驱动器把光束置于四象限探测器中心,瞄准 LLGT 返回下行链路光束。由于终端之间有相对运动,在 LLST 的上下行链路信号之间需要提前瞄准。使用 LLST 光学模块中发送光纤上的压电驱动器实现提前瞄准。

LLGT 通过焦平面阵列探测器探测到下行链路光束。虽然所有望远镜的粗瞄准由 LLGT 的万向架提供,但精瞄准校正(校正万向架上望远镜之间的相对瞄准偏差)由每个望远镜的快速控制反射镜提供,该校正通过跟踪每个焦平面阵列探测器的下行链路信号进行。下行链路跟踪开始时,上行链路光束聚焦在约 $10 \mu\text{rad}$,可发送足够大的功率,从而通过 LLST 接收光纤上的章动跟踪器产生低频(小于 5 Hz)跟踪误差信号,开始上行链路精跟踪。

两个备用地面终端的工作情况类似,它们的瞄准、捕获和跟踪(PAT)顺序与 LLGT 一致^[17-18]。

2) 下行链路通信:LLST 调制解调器模块产生下行链路信号。不同数据源在下行链路中多路复用,包括高速 LLST 遥测数据(约 5 Mb/s)、高速飞船数据(内部连接到飞船的缓冲器^[19],高达 40 Mb/s)和上行链路信号回路(高达 20 Mb/s)。在多路复用数据中加入伪随机二进制序列(PN 码),能产生数据率高达 622 Mb/s 的信

号。在现场可编程门阵列(FPGA)中,使用火星激光通信验证(MLCD)曾用的1/2码率串行级联Turbo码对数据源组帧并编码;通过深度存储器缓冲区(1~2 s)对已编码的数据进行交织,能提供时间分集,减轻大气湍流对下行链路的影响。编码和交织后,使用16时隙脉冲位置调制(16-PPM)把数据调制到光载波上。使用外部调制器改变从5 GHz降至311 MHz的PPM时隙频率,选择下行链路数据率。最后,被调制的信号通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大到平均0.5 W,并通过单模光纤耦合到LLST望远镜进行传输。望远镜可产生约15 μrad 的下行链路信号。

对于LLGT,下行链路信号由4个望远镜孔径接收并聚焦。为了在大气湍流下在望远镜中获得高耦合效率,同时保持下行链路信号的偏振,定制的多模保偏光纤使每个接收信号耦合至聚焦透镜,传输至控制室的其中一个四元素超导纳米线阵列探测器中。使用高速数字电子设备对每个探测器的输出进行数字化并求和。对合成的高速数字信号进行反序列化并输入至基于FPGA的数字接收机,用于同步、解调、解码和分析^[17]。电子设备还比较上下行链路的定时,由此推测高精度往返时间^[20]。

对于LLOT,光电信增管(PMT)PPM接收机以39 Mb/s数据率接收下行链路信号。接收机首先记录接收信号,并对信号做部分并行处理,确保信号正在被记录。接收机在同步和解码接收密钥后再对信号做后处理。通过并行处理和从本地监控参数提取出的链路诊断会接近实时地返回LLOC。而接收到的解密密钥经过1~2 d后返回。接收机具有非实时性^[22]。

3) 上行链路通信:对于LLGT,上行链路可在10 Mb/s和20 Mb/s两种数据率下工作,发送对LLST的指令(高达80 kb/s)和用于回路的高速率用户数据(高达20 Mb/s)。在LLGT数字电子设备中对数据源组帧并多路复用。使用与下行链路相同的串行级联Turbo码和交织器对数据编码和交织。接着,4个光发送机分别使用具有311 MHz时隙的4时隙PPM(4-PPM)把数据调制到光载波上。发送符号之间的死区在12或28个时隙中选择,可产生两种上行链路数据率。每个发送机的波长以约1 GHz失谐,使各波长能在LLST接收机处进行非相干合束且功率损失低。调制后,每个发送机通过EDFA将信号放大到10 W,并通过单模光纤耦合到收发机望远镜中。望远镜产生约10 μrad 的聚焦发送光^[1]。4个发送孔径可提供空间分集,减轻大气湍流的影响,同时也能使用商用放大器产生40 W的上行链路总功率。

上行链路信号通过LLST望远镜接收并聚焦到光纤中,用于LLST调制解调器模块后处理。接收信号通过低噪声EDFA前置放大,并通过10 GHz光纤布拉格光栅滤波器滤波,然后直接探测。通过一个接近最优的硬决策PPM解调器解调信号,并通过FPGA对该信号解码、解交织和进一步处理。接收到的LLST指令会中继到控制器电子设备中执行。这些指令及接收到的高速用户数据也会送回至光下行链路。

在上下行链路通信中,需注意地面终端之间的协调问题。目前的计划是:若LLST天气晴朗,LLOC协调LLST与LLGT的链路;反之,则协调LLST与LLOT或LLOGS的链路。如果各地面终端的天气都晴朗,系统可能尝试从其中一个终端到另一个终端的“移交”(采取先断后连方式)^[17]。

4) 双向飞行时间测量:LLCD还演示验证了使用双向光信号测量双向飞行时间的技术。通过连接LLST内的上下行链路时钟并比较LLGT处上下行链路帧时钟相位完成测量。LLST接收机中使用5 GHz压控振荡器产生已恢复的311 MHz时隙时钟。使用同一压控振荡器产生下行链路的5 GHz时隙时钟,确保上下行链路时隙时钟在LLST处锁相。为了测量飞行时间,上下行链路帧时钟也必须同步。在LLST捕获上行链路信号后,这种同步通过指令进行。时钟同步后,LLCD系统可测量LLST与LLGT之间约2.5 s的双向飞行时间,在20 kHz更新速度时具有小于200 ps的即时精度。即使系统距离以最高数每秒千米变化,这种性能也可提供高于厘米精度的测距^[17-18]。

4 LLCD的后续发展

LLCD任务是NASA的一项短期的、迄今为止距离最长的双向太空激光通信任务^[15]。与此同时,NASA相关机构还积极发展更短距离的太空光通信任务,并进一步发展可在近地和深空距离上演示验证的长期光通信任务。2009年,JPL开始计划利用国际空间站(ISS)进行为期90 d的“用于激光通信科学的光学载荷”(OPALS)任务。ISS上的激光终端是首个美国激光终端,计划于2013年12月搭载在SpaceX龙飞船上发射,而地面终端基于JPL的OCTL。该任务将以30~50 Mb/s相对中速的数据率演示验证太空平台和地面终端之

间的光通信技术,目标在于为低轨与地面之间的光通信演示验证做准备^[22]。2011年,作为LLCD的后续任务,基于LLCD长距离通信任务的系统设计并结合OPALS短距离通信任务的目标,NASA的Goddard太空飞行中心(LLCD的管理部门)再次联合JPL和MIT/LL,开始进行激光通信中继演示验证(LCRD)任务。这将是NASA首次演示验证近地和深空距离的长期光通信任务,任务周期为2~5年^[15]。2012年,LCRD成功完成任务概念评审,其太空终端将搭载在一个Loral商用地球轨道卫星上,计划于2017年发射^[15,23-24]。

LCRD系统能够演示验证:1)地球与地球同步轨道(GEO)的高速双向通信;2)从地面终端1通过GEO飞船到地面终端2的实时光中继;3)PPM调制适用于深空通信或其他功率受限用户,如小型近地任务;4)差分相移键控(DPSK)调制适用于近地高数据率通信;5)通过在地面终端处进行飞船仿真,演示各种任务情况;6)使用在轨测试平台的光链路进行编码、链路层和网络层协议的性能测试和演示验证^[9]。基于这些任务,LCRD系统设计了两个太空终端(均安装在一个Loral卫星上)和两个地面终端,这些终端将在LLCD各终端上继承和发展^[25-26]。

对于两个太空终端,每个终端包括一个光学模块、一个调制解调器和一个光学模块控制器。光学模块的设计基于LLST光学模块。调制解调器模块支持PPM和DPSK。其中,光子计数PPM适用于深空或近地通信,它的设计基于LLST调制解调器,最高数据率为622 Mb/s;DPSK适用于近地通信,它的设计基于MIT/LL开发的多速率DPSK调制器,最高非编码数据率为2.88 Gb/s。

在两个太空终端之间,为了演示验证光中继,高速电子设备连接两个终端的光学模块以及飞船主体,进行数据处理并完成多种实时中继操作。此外,当上行链路可用而下行链路不可用时,具有大容量数据存储单元的高速电子设备可演示验证存储和转发中继服务。高速电子设备还支持容迟网络协议,进行所需的解码和解交织。

对于两个地面终端,地面站#1的设计基于LLOT,但增加了自适应光学系统、DPSK调制解调相关设备、大气监控系统、LCRD用户服务通道、监控和控制(M&C)系统等,且M&C系统与地面站#2有接口。地面站#2的设计基于LLGT,但上行链路望远镜仅有一个。地面站#2还增加了自适应光学系统,主要用于支持DPSK系统。地面站#2的调制解调器与地面站#1相同,但增加接口模块,用于传输同步和门限信息到超导探测器后续电子设备。此外,地面站#2将进一步发展单光子探测器的光学封装、布线和读出电子设备,用于支持PPM信号。

LCRD是基于LLCD和OPALS的后续任务,将解决近地光通信应用的遗留问题,演示并验证一种用于近地和深空系统的可靠、低成本的光通信技术,促进近地和深空光通信网络任务的概念成熟和技术发展。LCRD将是NASA下一代跟踪和数据中继卫星上使用光通信的基础。

5 分析与讨论

LLCD是NASA使用激光进行太空通信的第一步,用以证明太空光通信的可行性。尽管该任务为短期任务,还不能提供足够的操作经验来支持未来太空光通信任务,但该任务的关键技术和性能仍可为未来太空激光通信作参考,下面就对此做进一步分析与讨论。

表1总结出了LLCD的相关参数,可作为今后设计激光通信太空终端的参考。从表1也可看出,与目前通往月球的最好的无线电终端相比,LLCD终端具有更小的尺寸、质量和功率(SWAP)和更高的数据率。这主要是由激光的波长和性质决定的。以LLST和LLGT之间的链路为例,LLST的质量是无线电系统的一半,功率是无线电系统的75%,一方面,LLST以无线电速率的6倍(622 Mb/s)从月球轨道发送下行链路数据^[14,23]。例如,若使用S波段的无线电通信,飞船需要639 h下载一个谱通长度的高清视频。而使用高数据率的LLCD,下载时间少于8 min^[30]。另一方面,上行链路数据率最高可达20 Mb/s,这是通往月球最好的无线电系统上行链路速率的5000倍^[14]。

而与表2所示的近几年太空光通信的太空终端^[31-33]相比,虽然LLCD的通信距离远大于前几项任务,但LLST的SWAP仍可与前几个终端相比拟甚至在一定程度上优于前几个终端。基于LLST的设计,可开发安装在近地飞船上的小SWAP终端,将大大减少飞船负担。

表1 LLCD的相关参数
Table 1 LLCD parameters

Parameter	LLST	LLGT
	Terminal	
Relevant size ^[20,27]	Modem module: 315 mm×261 mm× 185 mm	About 4.57 m (LLGT and its enclosure)
Weight ^[17,27]	About 30 kg	7 tons in total
Power ^[17]	Maxium 140 W	--
Lunar distance ^[28]	362570~405410 km	
Uplink irradiance ^[28]	At LADEE spacecraft: 36~63 nW/m ²	
Downlink irradiance ^[28]	At border of atmosphere: 0.17~1.7 nW/m ²	
	Transmitter	
Telescope aperture ^[17]	10 cm	15 cm
Transmit power ^[29]	0.5 W	40 W in total
Communication wavelength ^[28]	(1550.12±0.1) nm	(1558.17±0.02) nm
Beam divergence ^[11]	About 15 μrad	About 10 μrad
Beacon wavelength ^[28]	--	(1567.95±0.1) nm
Pointing divergence ^[18]	--	45 μrad
Pointing accuracy ^[2]	Better than 1°	--
Modulation ^[28]	16-PPM	4-PPM
Data rate ^[29]	38~622 Mb/s	10 Mb/s or 20 Mb/s
	Receiver	
Telescope aperture ^[17]	10 cm	40 cm

表2 其他太空终端与LLST的质量和功率比较

Table 2 Comparison between LLST and other space terminals on the weight and power

Timeline	Mission	Transmit wavelength /nm	Terminal weight /kg	Terminal power /W
2001	GEO: ARTEMIS	819	160	180
2005	LEO: OICETS	847	146	Comm. 226 (common)
2007	LEO: TerraSAR-X	1064	35	120 (maximum)
2013	GEO: Alphasat	1064	50	160 (maximum)
2013	Lunar: LLCD	1550	30	140 (maximum)

对LLST结构而言,光学组件(望远镜和光学器件)利用MIRU平台保持惯性稳定的方法独具特色。此方法继承了MLCD任务的设计。从MLCD任务可知,经过大气的上行链路,尤其是深空链路,惯性稳定的望远镜能提供更低功率的输入信号,从而支持更低带宽的跟踪^[34]。进行LLCD时,MIRU能测量和补偿LADEE飞船上的振动,提供高于5Hz的惯性稳定参考。MIRU与用万向架完全固定的望远镜一起,使PAT既稳定准确、范围又大。此方法具有可扩展性,LCRD太空终端即继承了此方法。

对LLGT结构而言,关键技术之一就是多孔径望远镜阵列。由于长距离光通信的大孔径望远镜建造和运行成本较高,且不易扩展和维护,使用多个中小型望远镜组成阵列再加上高速电子设备,可等效替代大孔径望远镜^[35]。在接收端,多孔径阵列提供了大孔径和空间分集,能有效抑制大气湍流导致的接收机处光强起伏,其中大孔径接收是利用孔径平均效应减轻光强起伏,而空间分集接收是在接收机处处理多个空间不相关(路径不同)的信号减轻光强起伏。在发送端,采用了多光束发送,一方面可增加发送功率,增加单位面积的接收光强,补偿长距离的光传输损耗,另一方面,多光束经过不同路径传输到同一接收机时,利用光束之间的非相干性进行合束,可以抑制闪烁起伏,减轻光束漂移,并降低下行链路误码率。除了提高通信性能,这种望远镜阵列还具有扩展性,可灵活应用在不同链路中(如LCRD),从一定程度上降低了地面终端的成本。

基于超导纳米线光子计数的PPM接收机是LLGT的另一项关键技术。一方面,光子计数非常接近量子极限,且能与脉冲调制很好地匹配,此外还不需要非常高的光谱或空间纯度,这使得采用光子计数的PPM具有极高的光子效率^[25],非常适于长距离太空通信。另一方面,超导纳米线单光子探测器与普通半导体单光子

探测器相比,更适宜提供高数据率下行链路所需的高探测效率及快速探测响应等,且地面站设备可提供低温条件,不受限于太空终端的SWAP等要求。这种高数据率和高效率减少了用户负担(质量和功率),LCRD即应用了此设计。但需注意的是,由于缺少适于太空终端的光子计数探测器,该技术在太空中的高速应用中存在问题。例如,LLCD下行链路数据率最高可达622 Mb/s,但上行链路数据率最高只有20 Mb/s。

对于3个地面终端组成的地面终端网络,从中选择具有晴朗天气的地面终端进行“移交”和通信,可大大提高LLCD任务的可用激光通信时间,积累更多用于未来光通信任务的资料。两个备用地面终端的选址考虑了与LLGT天气独立的地理位置、适于激光通信的季节性天气统计、激光通信基础设施的支持、飞机避开激光的复杂性、运输和操作成本等,最终选择的备用地面终端在两个已成熟的光学地面站处,可充分利用地面站的资源和环境条件。

最后需要说明的是,虽然LLCD的一些关键技术可扩展应用到其他近地或深空任务,但深空和近地任务的激光通信存在一些差异。深空和近地任务的距离和数据率截然不同,深空激光通信链路的困难性随着链路距离的平方而增加^[24]。因此需要根据情况改进LLCD的相关技术。例如,与LLGT的四个上行链路望远镜相比,LCRD的近地应用中地面终端仅需一个上行链路望远镜即可,这是因为与月球距离相比,LCRD的距离仅1/10,且相应的衍射损失减少99%(不考虑湍流引起的光束展宽和漂移),从而不需要多光束发送。

6 结束语

由于激光通信与无线电通信相比,具有非常明显的优势,能够在更小SWAP的空载终端和地面终端之间完成更高数据率的通信,因此美国宇航局和欧洲空间局等航天研究机构都把激光通信作为发展未来太空通信的主要手段。本文和另一篇介绍LLCD终端设计的文章即对现阶段美国进行的月球激光通信演示验证进行了全面总结。该演示验证不仅证明了长距离太空激光通信的可行性,任务中的一些关键技术和操作过程也对今后世界范围内激光通信任务的研制工作具有重要的指导和参考意义。

参考文献

- 1 D M Boroson, B S Robinson. Status of the lunar laser communication demonstration [C]. SPIE, 2013, 8610: 861002.
- 2 B Hine, S Spremo, M Turner, *et al.*. The lunar atmosphere and dust environment explorer mission[C]. 2010 IEEE Aerospace Conference, 2010.
- 3 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.
- 4 Lunar Laser Communications Demonstration CDR. Critical Design Review [R]. Burlington, 2010-07-12.
- 5 Lincoln Laboratory. Engineering Accomplishments: Principal Accomplishments [EB/OL]. [2013-11-10]http://www.ll.mit.edu/mission/engineering/engineeringaccomplishments.html.
- 6 R C Elphic, G T Delory, E J Grayzeck, *et al.*. The lunar atmosphere and dust environment explorer (LADEE): T-minus one year and counting [C]. LPI Contributions, 2012. 3033.
- 7 NASA/GSFC. LLCD Images- Space Terminal [EB/OL]. [2013-11-10] http://esc.gsfc.nasa.gov/267/278/291/Images/LLCD-Images.html.
- 8 HINE B. LADEE Project Manager Update: LADEE Ready for Launch [EB/OL]. (2013-08-31) [2013-11-10]http://www.nasa.gov/content/ladee-project-manager-update-ladee-ready-for-launch/.
- 9 NASA. LADEE Mission Overview [EB/OL]. [2013-11-10]http://www.nasa.gov/mission_pages/ladee/mission-overview/index.html.
- 10 NASA. Previous LADEE Status Updates [EB/OL]. [2013-11-10]http://www.nasa.gov/content/previous-ladee-status-updates/#.UkO4PdJTS6E.
- 11 NASA/GSFC. LLCD [EB/OL]. [2013-11-10]http://esc.gsfc.nasa.gov/267/271.html.
- 12 Hine B. LADEE Project Manager Update: LADEE at the Moon [EB/OL]. (2013-10-21) [2013-11-10]http://www.nasa.gov/content/ladee-project-manager-update-ladee-at-the-moon/.
- 13 NASA. Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer (LADEE) Launch [EB/OL]. [2013-11-10]http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/LADEE-Press-Kit-08292013.pdf.
- 14 NASA/GSFC. Lunar Laser Communication Demonstration on LADEE Achieves World-Record Data Download Speeds

- from the Moon [EB/OL]. [2013-11-10] <http://esc.gsfc.nasa.gov/267/278/279/486.html>.
- 15 Washington D. Historic Demonstration Proves Laser Communication Possible [EB/OL]. (2013-10-28)[2013-11-10]<http://www.nasa.gov/content/goddard/historic-demonstration-proves-laser-communication-possible/#.UnB6z3maIWg>.
- 16 ESA. Moon Mission Beams Laser Data to ESA Station [EB/OL]. [2013-11-10]http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Moon_mission_beams_laser_data_to_ESA_station.
- 17 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.
- 18 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.
- 19 J Love. NASA Tests Optical Links From Space [EB/OL]. (2013-09-12) [2013-11-10]<http://www.edn.com/electronics-blogs/catching-waves/4420968/NASA-tests-optical-links-from-space>.
- 20 NASA/GSFC. Ground Segment of the LLCD [EB/OL]. [2013-11-10]<http://esc.gsfc.nasa.gov/267/271/Ground-Segment.html>.
- 21 A Biswas, J M Kovalik. The Lunar Laser OCTL Terminal (LLOT) [C]. SPIE, 2013, 8610: 861000.
- 22 JPL. Optical Payload for Lasercomm Science (OPALS). [EB/OL]. [2013-11-10]<http://phaeton.jpl.nasa.gov/external/projects/optical.cfm>.
- 23 NASA. Space Laser to Prove Increased Broadband Possible [EB/OL]. (2013-08-28) [2013-11-10]<http://www.nasa.gov/content/space-laser-to-prove-increased-broadband-possible/#.UjUXfenyEXE>.
- 24 NASA. NASA Laser Communications Mission Passes Major Review Milestone [EB/OL]. (2012-09-18)[2013-11-10]<http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/releases/2012/12-074.html>.
- 25 B L Edwards. Overview of NASA's laser communications relay demonstration [C]. CCSDS 2012 Spring Meetings, 2012.
- 26 B L Edwards, D Israel, K Wilson, *et al.*. The laser communications relay demonstration [C]. Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2012. 1-1.
- 27 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.
- 28 M Sans, Z Sodnik, I Zayer, *et al.*. Design of the ESA Optical Ground Station for participation in LLCD [C]. Proc. International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2012. 3-1.
- 29 R T Schulein, R E Lafon, M B Taylor, *et al.*. Nonlinearity mitigation of a 40-watt 1.55-micron uplink transmitter for lunar laser communications [C]. SPIE, 2013, 8610: 86100F.
- 30 NASA. Lunar Laser Communication Demonstration: NASA's First Space Laser Communication System Demonstration [R]. Greenbelt, 2013-05-26.
- 31 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.
- 32 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.
- 33 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.
- 34 D M Boroson, A Biswas, B L Edwards. MLCD: overview of NASA's Mars laser communications demonstration system [C]. SPIE, 2004, 5338: 16-28.
- 35 Leng Jiaofeng, Hao Shiqi, Qu Fuqi, *et al.*. Combination of spatial diversity coherent receivers for wireless optical communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 010602.
冷蛟锋, 郝士琦, 瞿福琪, 等. 无线相干光通信空间分集接收合并技术[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 010602.