深空激光通信进展及应用研究

李凉海,刘向南,李晓亮

(北京遥测技术研究所,北京100076)

摘 要:深空激光通信是实现深空高速通信的主要手段之一。对国外深空激光通信的发展现状进行了综述,总结 了深空激光通信技术发展的若干启示,给出了深空激光通信的典型应用,分析了深空激光通信涉及的主要关键技术, 以期为我国深空激光通信的发展提供一定的参考和借鉴。

关键词: 深空激光通信; 深空探测; 月地激光通信

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A 文章编号:2095-7777(2019)06-0523-07

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2019.06.002

引用格式: 李凉海,刘向南,李晓亮.深空激光通信进展及应用研究[J]. 深空探测学报,2019,6(6): 523-529.

Reference format: LI L H, LIU X N, LI X L. Progress and application research of deep space laser communication[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (6): 523-529.

引 言

深空探测是人类探索宇宙奥秘、寻求长久发展的 科学活动。从现实和长远来看,深空探测和发展具有 十分重要的科学价值和经济意义。世界各航天国家已 经相继出台了一系列新的深空探测发展战略、规划和 计划,全面展开对整个太阳系以及更远深空的探测。 我国探月工程计划的启动标志着我国深空探测的开 始,并着手启动了首次火星探测任务^[1-2]。

目前,各类深空探测活动中均以微波通信为主, 但随着深空探测任务多样化、复杂化以及深空探测器 小型化、轻量化的发展,传统的微波通信系统将难以 满足未来深空探测任务对高速数据回传以及对低功 耗、小型化、轻量化载荷的发展要求。因此,亟需发 展新型通信手段以解决深空高速通信问题。以激光为 载波的深空激光通信链路具有通信速率高、方向性 强、保密性好、组网灵活以及终端体积小、重量轻、 功耗低等特点,相比于微波通信,其传输速率和通信 距离将发生质的跃变,可满足未来深空探测活动对高 速通信、超远距离传输等需求,在未来深空探测领域 具有良好的应用前景^[3-6]。

作为深空探测活动的一个高速信息传输通道,激 光通信起着无法替代的重要作用,研究国外深空激光 通信技术的发展进程及发展特点,对我国深空激光通 信技术的发展具有借鉴意义。

1 发展现状

深空激光通信链路既有近地激光链路的特点,又 由于其应用环境的特殊性而有独特的特点。深空激光 通信链路面临信号空间衰减大、大气影响严重、强背 景光干扰等问题,使得其技术实现难度大幅增加。因 此,深空激光通信的技术难度和经费投入均比近地卫 星激光通信要大得多,使得目前只有少数国家和组织 在深空激光通信领域开展了相关研究工作。其中,美 国是最早也是目前唯一完成月地激光通信在轨演示验 证的国家^[7]。欧盟、俄罗斯、日本和中国等国家和组 织也纷纷开展了多项空间激光通信研究计划,为深空 激光通信技术的研究奠定了重要基础^[8-10]。

目前,美国已经突破深空激光链路高精度捕跟、高速脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM) 解调、高效率超导纳米线单光子接收、地面多口径光 学望远镜收发等相关关键技术,研制了月地激光通信 工程样机,并开展了月地激光通信的在轨演示验证试 验^[7]。作为美国月地激光通信在轨演示验证试验的参 与者,欧盟也在规划深空激光通信发展计划,其深空 激光通信发展路线也同样具有重要的研究价值。

1.1 美国深空激光通信进展

美国深空激光通信的发展历程可以归纳为3个阶

收稿日期: 2019-9-9 修回日期: 2019-10-12 基金项目: 民用航天基金资助项目

段: 深空激光通信系统方案论证与技术研究阶段、月 地激光通信演示验证与试验阶段和深空激光通信网络 建设与应用阶段。

1.1.1 方案论证与技术研究阶段

在深空激光通信研究初期,美国主要开展了深空 激光通信系统方案论证、原型系统试验验证、关键技 术研究以及激光终端原理样机设计研制等工作,相关 计划主要包括金星雷达测绘(Venus Radar Mapper, VRM)任务、光学收发组件项目(OPTical TRANSceiver PACkage, OPTRANSPAC)、千天文单位 (Thousand Astronomical Units, TAU)距离航天任务 和恒星际任务、X2000光通信终端项目、伽利略光学 实验 (Galileo OPtical EXperiment, GOPEX)、地一 月一地后向反射激光链路补偿试验(Compensated Earth - Moon - Earth Retroreflector Laser Link, CE-MERLL)、火星激光通信演示计划(Mars Laser Communications Demonstration, MLCD)。尽管上述部分 项目被终止, 但美国的早期研究仍取得了丰硕的成 果。如MLCD项目先后完成了系统需求分析、飞行 子系统和地面子系统的初步设计,对深空光束稳定 性、高效率光子计数探测和地面白天作业等关键技术 取得了突破,为后续月球激光通信演示验证计划的实 施奠定了重要基础[11-20]。

在深空激光通信系统论证设计方面,美国先后对 地基接收系统方案、天基接收系统方案以及空基接收 系统方案进行了论证分析,研究结果表明:与地基接 收方案相比,尽管天基系统不用考虑云层遮挡和大气 散射光的影响,但由于经费需求过大,天基接收系统 的竞争力弱于地基接收系统。基于技术可行性、寿 命、性能及风险等方面的考虑,空基接收方案并不是 最佳的选择。因此,地基接收系统方案更具优势,并 对地基接收系统总体方案进行了规划设计,给出了能 够满足全天时、全天候要求的地基接收网的布站 方案^[21-24]。

1.1.2 月地激光通信演示验证与试验阶段

实现月地之间的高速激光通信一直是科研人员追求的目标。2013年初,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 曾通过激光从戈达德航天中心向月球轨道探测器上发 送了名画《蒙娜丽莎的微笑》数码影像,实现了人类 首次利用激光在星际间进行图像数据传输^[25]。2013 年10月,月球激光通信演示验证项目(Lunar Laser Communication Demonstration, LLCD)飞行终端与 地面终端实现了622 Mbit/s的下行通信和20 Mbit/s的 上行通信,并首次完成了对月地距离的连续测量,其 测距精度优于1 cm^[7,26],如图1所示。



图 1 LLCD 激光通信链路示意图 Fig. 1 Composition of LLCD link

LLCD 是NASA 开展深空激光通信的第一步,用 以全面验证深空激光通信的可行性,该任务的成功实 施为未来深空激光通信提供了宝贵的经验积累。

1.1.3 深空激光通信网络建设与应用阶段

基于月地激光通信演示验证试验取得的成果和经验,美国未来将重点开展用于深空探测和行星探测的激光通信计划,主要包括深空光通信项目(Deep Space Optical Communication, DSOC)、用于"2020 火星车"(Mars 2020 Rover)任务的激光通信终端、射频激光一体化通信计划(integrated Radio and Optical Communications, iROC)、O20项目(Orion EM-

2 Optical Communications) 以及月球轨道网关平台 (Lunar Orbiting Platform-Gateway, LOP-G),预示着 美国已经步入深空激光通信网络建设与应用阶段。

DSOC 深空激光通信项目计划从火星回传地球的 通信速率达 250 Mbit/s,计划在"2020 火星车"探索 任务中应用。与LLCD 相比,DSOC 将面临更多难 题:增加的链路损耗(至少 60 dB)、千瓦级的地面上 行光束功率、星载光子计数探测器阵列、更高的惯性 稳定波束指向要求以及下行光束更大的提前瞄准角 度。DSOC 目前计划利用 Palomar 山的 5 m 口径的 Hale 天线来接收来自火星的高于 100 Mbit/s 的通信速 率,同时也正在论证12m口径接收天线的方案。目前,火星勘测轨道(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)飞行器利用 Ka 波段的最高通信速率仅为 6 Mbit/s,因此,DSOC的应用将使得火星至地球的 通信速率提升一个数量级^[27]。

SCaN (Space Communications and Navigation)

计划在"2020火星车"上安装激光通信终端,既可 以支持与火星轨道飞行器上搭载的激光中继终端间的 20 Mbit/s通信,也可以支持从火星表面以200 kbit/s 的速率直接对地球通信,如图2所示。与当前X频段 通信链路相比,该激光通信终端的发射天线口径仅为 5 cm,优势十分明显^[27]。



图2 "火星 2020" 巡视器激光通信终端 Fig. 2 Mars 2020 rover laser terminal

受空间搭载条件的严格限制,深空探测器对通信 载荷的一体化、集成化、多模式化的需求愈加突出。 基于此,NASA正在研究深空射频激光一体化通信系 统。射频激光一体化通信计划iROC旨在分析射频激 光混合通信在未来深空任务中应用的可行性,计划应 用于2021年的火星探测任务。iROC系统将3m口径 的射频天线和30 cm口径的光学天线进行了一体化设 计,且共用一套软件定义调制解调器。目前,iROC 系统的技术成熟度TRL仅为2~3级,但是该项目的 应用前景良好^[28]。

在地面激光通信系统方面,针对未来深空探测通 信应用需求,地面接收光学天线的口径需达到8~ 12 m。结合美国深空网当前状况,将深空网的34 m 波束波导微波天线改造升级,实现地面大口径微波激 光复合天线,是降低系统成本的有效途径。利用深空 网中的34 m微波激光混合天线,可提供8 m有效光 学天线,单接收天线支持125 Mbit/s 火星对地通信。 若该天线装配两套光学探测器,可以支持250 Mbit/s 火星对地通信^[29]。

此外,NASA计划在O2O项目中将演示验证地 月空间50万km距离下行链路80Mbit/s和上行链路 20Mbit/s的激光通信^[30]。美国在载人深空探测任务中 计划在地月空间建设月球轨道网关平台LOP-G来完 成各类链路的中继通信,其中由LOP-G汇集到的科 学数据和视频信息将通过激光通信链路下行回传至 地球^[31]。

1.2 欧盟深空激光通信进展

欧盟开展深空激光通信研究的主体是欧洲航天局(European Space Agency, ESA),其参与了美国 LLCD项目,利用光学地面站实现下行80 Mbit/s 和 上行20 Mbit/s的激光通信,积累了丰富的工程经 验。与此同时,ESA也在计划实施自己的深空激光 通信试验项目。在德国PTScientists商业航天公司的 探月项目中,该公司计划与ESA合作,将ALINA自 主导航登陆单元中的射频通信设备替换为OPTEL-µ 激光通信终端,支持对地回传10 Mbit/s 的通信 速率^[32]。

2015 年, ESA 提出了一项小行星撞击任务 (Asteroid Impact Mission, AIM)飞行器与地面站之 间开展深空激光通信的评估研究项目。计划在2022 年,在 Didymos小行星表面放置一个着陆器,同时 在飞船上发射两个或更多的立方星用于收集科学数 据,并利用激光通信链路将采集到的数据回传至 ESA 光学地面站。AIM 任务中的深空激光通信终端 是由 RUGA Space 研制的 OPTEL-D型终端,通信距 离 1.2×10⁷~7.5×10⁷ km,上行通信波长 10.6 μm, 下行通信波长 1 550.12 nm,下行调制体制为 16PPM,下行通信速率为 0.1~2.5 Mbit/s。不幸的 是,该项目没有通过批准,相应的深空任务重新调 整为计划 2024 年发射的 DOCS (Deep-space Optical Communication System)系统中。DOCS 系统旨在演 示超过 1 AU距离条件下,在 200 mm 口径的星载 终端和4m口径的地面站之间实现10 Mbit/s的下行通信速率。其下行通信波长为1550 nm、调制体制为16PPM,上行通信波长为1064 nm、1 kHz 调制^[32-33]。

2 启示与思考

2.1 激光通信是深空通信未来发展的必然选择

深空通信是进行深空探测的基础和支撑,是深空 探测活动的重要组成部分。随着深空探测活动的深 入,成像光谱仪、合成孔径雷达等高空间分辨率、 高光谱分辨率和高时间分辨率的探测器将在深空探 测中广泛应用,深空探测对高速信息传输的需求愈 加突出。传统的微波通信方式已不能满足未来深空 探测活动的应用需求,以火星和地球之间的通信为 例,射频通信速率很难达到1 Mbit/s,而激光通信 速率可达到250 Mbit/s,而且在同等通信速率情况 下,激光通信终端在重量、体积和功耗方面均具有 优势。可以预见,激光通信将是深空通信未来发展 的必然选择。

2.2 开展月地激光通信是迈向深空应用的第一步

月球探测和火星探测是21世纪空间探测的重点 领域。探月工程计划的启动是我国走向深空探测的第 一步,标志着深空探测的开始。探月工程的实施,为 月地激光通信的开展和应用提供了可能。参照国外深 空激光通信发展历程,美国也是首先开展了月地激光 通信演示验证,对深空激光通信的各项关键技术和性能指标进行了全面测试验证,在此基础上着手开展火 星以及木星等更远距离的深空激光通信应用探测。我 国应立足自身情况,将月地激光通信作为深空探测的 典型应用,为深空激光通信技术的研究奠定基础,积 累经验。

2.3 激光通信是构建行星际通信网络的重要途径

为解决深空高速、远距通信问题,喷气推进实验 室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)等机构提出了建 立星际互联网络(Interplanetary Internet, IPN)的设 想^[34]。随着激光通信技术的不断发展,空间激光通信 将成为星际互联网的重要组成部分,在星际骨干网、 外延网以及行星网中发挥重要作用。与此同时,深空 激光通信与空间激光通信组网技术的发展相辅相成, 互相促进,最终将建立起以地面站和近地轨道卫星为 基础的近地空间激光通信网,以及在此基础上的深空 激光通信网。

3 应用研究

3.1 应用模式分析

深空探测活动的多样化和复杂化使得深空激光通 信的应用场景变得复杂而又丰富^[4]。激光通信链路是 构建地球-月球-火星深空信息传输网络的重要途径, 如图3所示,在未来的探月工程和火星探测任务中具 有重要的应用。



图 3 地球-月球-火星深空信息传输网络组成 Fig. 3 Composition of Earth - Lunar and Mars deep space information network

月地激光通信是迈向深空应用的第一步。以探月 场景为例,对月地激光通信链路的应用模式进行分 析。随着月地空间信息传输系统的逐步建设实施,根 据链路的应用需求及特点,月地激光通信链路将存在 "月地直接信息传输链路"和基于"月面或环月轨道 卫星-地球中继轨道卫星-地面站"的"月地中继信息 传输链路"两种应用模式。

3.1.1 月地直接信息传输链路

月地直接信息传输链路是指利用月面或环月卫星激光终端直接与地面激光站进行高速激光通信。这种

应用模式遵循"先天后地,宽天严地"的原则,可以 充分发挥地面大口径望远镜系统或阵列望远镜系统的 高接收增益和地面功率资源充足的优势,允许采用配 备超低温制冷系统的超导纳米线单光子探测器进行单 光子信号接收,可以获得极高灵敏度的激光信号接 收。采用这种模式的优点是能够支持月地高速率信息 传输、地面激光通信系统的扩展性好、易于维护和升 级;其不足之处在于,该应用模式仍会受到大气的干 扰和影响、其链路可用度受限、需要进一步解决中等 湍流对月地激光通信链路的影响。尽管如此,美国 LLCD 仍采用了月地直接信息传输链路,并且在后续的深空任务计划中将继续采用这种模式。

3.1.2 月地中继信息传输链路

月地中继信息传输链路是指利用月面或环月卫星 激光终端与地球中继轨道卫星激光终端进行高速激光 通信,而地球中继轨道卫星与地面站之间仍采用微波 通信。这种应用模式避免了大气对激光链路的影响, 可以提高月面或环月卫星与地球中继轨道卫星之间激 光通信链路的可用度。与激光地面站相比,无法利用 与之相比拟的大口径望远镜系统,且无法采用超导纳 米线单光子探测器,因此在通信速率提升方面能力受 限。目前,国外相关研究人员也提出了月地中继信息 传输链路的概念和想法,有望后续开展深入研究。

3.2 主要关键技术

深空激光通信的主要关键技术包括:快速捕获与 稳定跟踪技术、激光终端轻小型与低功耗设计、高灵 敏度光信号接收、地面多口径望远镜阵列等技术。

3.2.1 快速捕获与稳定跟踪技术

快速捕获与稳定跟踪是建立深空激光通信链路的 前提条件。为解决超远距离传输所引起的功率损耗, 深空激光通信将采用窄束散角激光光束。因卫星存在 姿态抖动和平台振动,为了实现高可靠性的深空激光 通信,必须解决激光链路的捕获、跟踪、瞄准问题。 首先需要根据卫星姿态测量精度、轨道精度和装调误 差等因素预估捕获不确定区域的大小,进而制定相应 的捕获策略和扫描方式;然后进行扫描建链,并借助 粗精跟踪环路逐步将指向误差控制到深空激光通信所 需水平;最后在稳定通信的同时,通过提前瞄准控制 实现对卫星相对运动的补偿。

3.2.2 激光终端轻小型与低功耗设计技术

深空飞行平台(或着陆器、巡视器)的承载能力 和搭载空间十分有限,对激光终端的体积、重量、功 耗提出了非常苛刻的要求。如何在压缩激光终端体 积、降低激光终端重量和功耗的条件下,保证并提升 激光通信终端的性能是应用深空激光通信的关键。激 光终端的轻小型、低功耗设计主要包括天线轻质化设 计、机械结构轻小型化设计和激光终端低功耗设计3 项关键技术。其中,光学天线轻质化设计需根据深空 激光链路功率预算情况,确定并优化光学天线的口径 尺寸及光学天线类型;分析比较光学材料特性,选择 适用于空间环境的轻量化光学材料;对光学天线的主 镜结构进行轻量化设计。机械结构轻小型化设计需根 据激光终端的约束条件、机械结构技术指标要求以及 光学天线口径等输入条件,通过建模仿真,优化并确 定激光终端的结构方案,将光学、通信、跟瞄等相关 部件进行一体化集成设计,最大限度地减小激光终端 的重量和体积;对比分析选择机械结构材料特性,选 择满足比刚度要求的轻质化材料。激光终端低功耗设 计需重点研究激光终端的高效功率分配方案,研究二 次电源高效转换方法;优选电光转换效率高的激光 器、光放大器等光学器件和低功耗的电子学器件;设 计多功能信号处理硬件平台,提高平台的功率利 用率。

3.2.3 高灵敏度光信号接收技术

深空激光通信链路具有数据传输距离远、功率受限、太空背景光噪声影响大的显著特点,同时受大气 衰减和大气湍流的影响,接收端获得的光信号信噪比 会非常小,甚至有部分信号时隙内完全没有光子。这 种情况下探测器必须具备接收单个光子的灵敏度,而 且具备评估和补偿系统时间漂移的能力。目前,为解 决星上高灵敏度光信号接收问题,星载激光通信终端 通常采用基于盖革模式的雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD)探测器。对于深空激光通 信地面站,超导纳米线阵列是目前单光子探测技术的 研究热点。在美国LLCD月地激光通信试验中就成功 使用了此类探测器。因此,对于深空激光地面站,采 用超导纳米线阵列是实现单光子信号接收的重要 途径。

3.2.4 地面多口径望远镜阵列技术

深空激光通信中,激光光束不仅受到大气衰减还 会受到大气湍流的影响,主要表现在光束漂移、光束 扩展、光强闪烁等方面,导致系统误码率增加,直接 降低了通信质量。目前抑制大气影响的方法主要有多 口径望远镜阵列(空间分集)、自适应光学以及大口 径接收等。大口径望远镜接收需要采用自适应光学技 术,但自适应光学对光信号的能量要求较高,这对深 空通信距离远、飞行终端能量极度受限的条件下不太 适用。此外,大口径望远镜的建造和运行成本较高, 且不易扩展和维护,因此通常使用多个中小型望远镜 组成阵列来等效替代大口径望远镜。在接收端,利用 多口径阵列的空间分集接收来处理多个空间不相关的 光信号从而减轻光强闪烁; 在发射端, 采用多光束发 射,一方面能够增加发射光功率(单位面积的接收光 强),补偿远距离的光传输损耗,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。除了提高通信性能,多口径望远镜阵列还具有扩 展性,可灵活应用在不同链路中,从一定程度上降低 了地面激光站的成本。

4 结束语

目前,深空探测已成为世界航天活动的重要发展 方向之一。与此同时,深空探测航天器日益增长的信 息数据传输需求,促使通信频段从射频向光波波段发 展。在深空激光通信领域,美国已经成功开展了月地 高速激光通信演示验证,充分验证了深空激光通信的 可行性,展现了深空激光通信的优越性,为未来深空 激光通信的应用和发展注入了新的活力和动力。欧盟 也在计划实施深空激光通信项目。可以预见,未来的 深空通信将由"点对点"的链路形式发展成为星际互 联网络。基于我国空间激光通信技术的研究基础,建 议我国以探月工程和火星探测工程为背景,制定相关 深空激光通信研究以及试验验证规划,以进一步促进 我国深空激光通信技术的发展,早日实现工程化 应用。

参考文献

[1] 吴伟仁,于登云.深空探测发展与未来关键技术[J].深空探测学报,2014,1(1):5-17.

WU W R, YU D Y. Development of deep space and its key technologies [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 5-17.

- [2] 于登云,吴学英,吴伟仁. 我国探月工程技术发展综述[J]. 深空探测学报,2016,3(4):307-314.
 YU D Y, WU X Y, WU W R. Review of technology development for Chinese lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration,2016,3(4):307-314.
- [3] 姜会林,江伦,宋延嵩,等.一点对多点同时空间激光通信光学跟 瞄技术研究[J]. 中国激光,2015,42(4):159-166.
 JIANG H L, JIANG L, SONG Y S, et al. Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 159-166.
- [4] 刘向南,李英飞,向程勇,等.激光测距通信一体化技术研究及深 空应用探索[J]. 深空探测学报,2018,5(2):147-153,167.
 LIU X N, LI Y F, XIANG C Y, et al. Study on integrated technique of laser ranging and communication and its applications in deep space
 [J]. Journal of Deep Space Exploration,2018,5(2):147-153,167.
- [5] MA J, LI K, TAN L Y, et al. Performance analysis of satellite-toground downlink coherent optical communications with spatial diversity over gamma-gamma atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2015, 54(25): 7575-7585.
- [6] CAI Y G, SUN J F, LI G Y, et al. Self-homodyne free-space optical communication system based on orthogonally polarized binary phase shift keying[J]. Applied Optics, 2016, 55(17):4514-4512.
- [7] BOROSON D M, ROBINSON B S, MURPHY D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[C]//Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation. San Francisco, California, United States: SPIE, 2014.

- [8] GRIGORYEV V, KOVALEV V, SHARGORODSKIY V, et al. Highbit-rate laser space communication technology and results of onboard experiment[C]//Proceeding of International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). Kobe, Japan: ICSOS, 2014.
- [9] RIELDS R, KOZLOWSKI D, YURA H, et al. 5.625 Gbps bidirectional laser communications measurements between the n fire satellite and an optical ground station[C]//2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). Santa Monica: SPIE, 2011.
- [10] MUKAI T, INAGAWA S, SUZUKI K, et al. A study of free space laser communication experiment on the ISS Japanese experiment module for space explorations[C]//IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications(ICSOS). New Orleans, LA, USA:IEEE, 2015.
- [11] LAMBERT S G. Design and analysis study of a spacecraft optical transceiver package, JPL Contract 957061[R]. Louis: Missouri McDonnell Douglas Corp., 1985.
- [12] NOCK K T. TAU-A mission to a thousand astronomical units[C]// Proceedings of the 19th AIAA/DGLR/JSASS International Electric Propulsion Conference. Colorado:AIAA,2012.
- [13] WILSON E, SCHWARTZ J, LESH J R. GOPEX: a deep space optical communications experiment with the Galileo spacecraft[C]// Optics, Electro-Optics, and Laser Applications in Science and Engineering. Los Angeles, CA, United States: SPIE, 1991.
- [14] WILSON E, LESH J R. An overview of the Galileo Optical Experiment (GOPEX), RTOP 315-91-60-10-03[R]. United States: NASA,1993.
- [15] WILSON K. E. Overview of the compensated Earth-Moon-Earth laser link (CEMERLL) [C]//Proceedings-SPIE the International Society for Optical Engineering. [S.1]: SPIE International Society for Optical, 1994.
- [16] PAGE N A, HEMMATI H. Preliminary optomechanical design for the X2000 transceiver[C]//Proceeding of SPIE. [S.1]:SPIE, 1999.
- [17] HEMMATI H. Status of free-space optical communications program at JPL[C]//Aerospace Conference Proceedings of IEEE. Big Sky, MT,USA:IEEE,2000.
- [18] BOROSON D M, ROY S B, SCOZZAFAVA J J. Overview of high rate deep space laser communications options[C]//International Society for Optics and Photonics. San Jose, Ca, United States: SPIE, 2004.
- [19] HEMMATI H. Deep space optical communications[M]. California: John Wiley &Sons, Inc, 2005.
- [20] BISWAS A, BOROSON D M, EDWARDS B L. Mars laser communication demonstration: what it would have been[C]//Lasers and Applications in Science and Engineering. San Jose, California, United States: SPIE, 2006.
- [21] SHAIK K, WONICA D, WILHELM M. Optical subnet concepts for the deep space network[R]. Pasadena, CA, United States: JPL, 1993.
- [22] WILSON K E, WRIGHT M, CESARONE R, et al. Cost and performance comparison of an Earth-orbiting optical communication relay transceiver and a ground-based optical receiver subnet, IPN progress report 42-153[R]. Pasadena, United States: JPL, 2003,
- [23] BADESHA S S. SPARCL: a high altitude tethered balloon-based optical space-to-ground communication system[C]//International

Society for Optics and Photonics. Seattle, WA, United States: SPIE, 2002.

- [24] MEHRLE G S, AKLE W, STARKUS C, et al. Direct detection optical relay satellite for deep-space communication[C]//Proceeding of SPIE. Los Angeles, CA, United States, 1994.
- [25] SUN X L, SKILLMAN D R, HOFFMAN E D, et al. Free space laser communication experiments from earth to the lunar reconnaissance orbiter in lunar orbit[J]. Optics Express, 2013(21):1865-1871.
- [26] CAPLAN D O, CARNEY J J, LAFON R E, et al. Design of a 40 Watt 1.55 μm uplink transmitter for lunar laser communications[C]// SPIE Lase. San Francisco, California, United States: SPIE, 2012.
- [27] DONALD C M. NASA's optical communications program for 2015 and beyond[C]//SPIE Photonics West. San Francisco, CA: SPIE, 2017.
- [28] FIELHAUER K B, BOONE B G, RAIBLE D E. Concurrent system engineering and risk reduction for dual-band (RF/optical) spacecraft communications[C]//2012 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2012.
- [29] DEUTSCH J L, LICHTEN M S, HOPPE J D, et al. Toward a NASA deep space optical communications system[C]//2018 Space Ops Conferences. NewYork: NASA, 2018.
- [30] ISRAEL J D, SHAW H. Next-generation NASA Earth-orbiting relay satellites: fusing optical and microwave communications[C]//2018 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2018.
- [31] BURNS O J, MELLINKOFF B, SPYDELL M, et al. Science on the lunar surface facilitated by low latency telerobotics from a lunar orbiting platform-gateway[J]. Acta Astronautica, 2019 (154) :

195-203.

- [32] SODNIK Z, HEESE C, ARAPOGLOU P D, et al. European deepspace optical communication program[C]//SPIE LASE. San Francisco, California, United States: SPIE, 2018.
- [33] SODNIK Z, HEESE C, CARNELLI I, et al. Multi-purpose laser communication system for the asteroid impact mission (AIM) [C]// 2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). San Francisco, California, United States: IEEE,2015.
- [34] MUKHERJEE J, RAMAMURTHY B. Communication technologies and architectures for space network and interplanetary internet[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2):881-897.

作者简介: **李凉海**(1965-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向:航天测控 通信与遥感。 通讯地址:北京市9200信箱74分箱(100076) 电话:(010)68382591 **刘向南**(1985-),男,高级工程师,主要研究方向:空间激光通信 技术。 通讯地址:北京市海淀区丰滢东路一号(100094) 电话:(010)88105605 E-mail:18310224565@163.com **李晓亮**(1979-),男,研究员,主要研究方向:航天测控通信技术。 通讯地址:北京市海淀区丰滢东路一号(100094) 电话:(010)88105486 E-mail:lix79@163.com

Progress and Application Research of Deep Space Laser Communication

LI Lianghai, LIU Xiangnan, LI Xiaoliang

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Deep space laser communication is a key approach to achieve high-speed communication in deep space. In this paper, the development of foreign deep space laser communication is summarized, while some inspirations of deep space laser communication technology development are obtained. Then applications of deep space laser communication are proposed. Finally, key technologies involved are analyzed for promoting the development of China's deep space laser communication.

Keywords: deep space laser communication; deep space exploration; Lunar-Earth laser communication

Highlights:

- The current status of deep space laser communication is reviewed.
- Key technologies of deep space laser communication are analyzed.
- Future applications of deep space laser communication are expected.

[责任编辑:杨晓燕,英文审校:朱恬]