

激光与光电子学进展

深空激光通信研究进展及发展方向(特邀)

刘超^{1,2,3,4*}, 李学莹^{1,2,3}, 张开河^{1,2,3}, 兰斌^{1,2,3}, 代天君^{1,2,3}, 鲜浩^{1,2,3,4}¹自适应光学全国重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;³中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 随着人类对太空的探索日益加深,传统射频通信愈发不能满足高速深空通信的需求,各航天国家先后对深空激光通信技术开展研究。激光通信是实现空间通信的一种重要手段,相比于传统射频通信,激光通信具有通信速率高、终端载荷小、抗干扰能力强等优点,更适用于超远距离的深空通信。目前,美国进行的研究最多,且已成功实施了两次深空激光通信演示验证。本文针对已有的深空激光通信研究与演示结果进行综述,分析了实现深空激光通信的关键技术,对深空激光通信的发展历程与未来发展进行了探讨。

关键词 深空激光通信; 激光通信; 深空探测; 星际激光通信

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240902

Research Progress and Future Directions in Deep Space Optical Communication (Invited)

Liu Chao^{1,2,3,4*}, Li Xueying^{1,2,3}, Zhang Kaihe^{1,2,3}, Lan Bin^{1,2,3}, Dai Tianjun^{1,2,3}, Xian Hao^{1,2,3,4}¹National Laboratory on Adaptive Optics, Chengdu 610209, Sichuan, China;²Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract With the deepening exploration of space by humans, traditional radio frequency (RF) communication increasingly fails to meet the demands of high-speed deep space communication. Various spacefaring nations have undertaken research on deep space optical communication technology. Optical communication is a crucial means of achieving space communication. Compared to traditional RF communication, optical communication offers advantages such as high communication speed, small terminal payload, strong anti-interference capabilities and so on, making it more suitable for ultra-long-distance deep space communication. Currently, the United States leads in research and has successfully conducted two deep space optical communication demonstrations. This paper provides a comprehensive review of existing research plans and demonstration results in deep space optical communication. It analyzes the key technologies for implementing deep space optical communication, reflects on the developmental history, and contemplates the future prospects of deep space optical communication.

Key words deep space optical communication; laser communication; deep space exploration; interstellar laser communication

1 引言

随着人类对宇宙的探索不断加深,从深空探测器返回的数据量预计每十年增加一个数量级。为了满足

未来深空探测任务的需求,提升通信速率和通信容量是非常必要的。

深空探测主流通信手段为射频通信,尽管射频通信已经通过增加使用频带(S、X和Ka)扩展了容量,但

收稿日期: 2024-01-04; 修回日期: 2024-01-26; 录用日期: 2024-02-05; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家基础加强计划重点基金(Z23J0301)

通信作者: liuchao@ioe.ac.cn

在频带固有的波束宽度和频谱分配限制下,其性能仍难以满足深空探测不断增长的通信容量需求。因此,在继续提升射频通信能力的同时,需要引入新的通信手段,空间激光通信就是其中一种。

空间激光通信系统的主要优势来自更高频段的激光载波。相比射频通信,空间激光通信能够以更小的尺寸、质量和功耗提供高出 10~100 倍的通信速率。此外,由射频(数百 MHz)扩展到激光(数十 THz)后,可用带宽将扩展几个数量级,频谱几乎不受限制。因此,空间激光通信的应用将使深空探测通信能力实现质的飞跃。

在未来的深空探测任务中,深空激光通信作为一种高速通信手段将不可或缺。当前国际社会在深空激光通信领域已取得较丰富的成果,而我国仍处于起步阶段。因此,研究并借鉴国外先进的经验与技术,对于我国深空探测技术的发展具有重要意义。

2 国内外研究现状

自 20 世纪 60 年代早期激光器的发明以来,空间激光通信就广受关注。目前,国际上已经成功实施了大量的空间-地面激光通信演示。然而,绝大部分空间激光通信都是与近地卫星终端实现的。深空通常指的是月球距离以外的空间,深空激光通信相比于近地激光通信面临着更大的挑战。

2.1 国外研究现状

2.1.1 方案研究与技术论证

目前,国际上深空激光通信的研究与演示主要由美国主导。自 20 世纪 80 年代初以来,喷气推进实验室(JPL)一直在深空激光通信领域进行着研究。该实验室进行了一系列关于空间激光通信信道容量的理论研究与实验演示,从而确立了空间激光通信在未来深空通信中的重要地位^[1]。

1983 年,美国计划在金星雷达测绘(VRM)任务中采用激光通信传回金星表面测绘数据,然而由于星上通信终端设计不成熟,该计划未能实现^[2]。1984 年的光收发组件项目(OPTRANSPAC)首次研究了星上终端系统的设计,该通信系统设计搭载于土星探测卫星上,地面采用直径 10 m 的望远镜进行接收,土星处的下行通信速率可达 100 kb/s。尽管由于通信系统设计过重而未能实施该项目,但其研究成果后来被用于集成光通信测试平台(IOCTB)^[3]。1987 年的千天文单位(TAU)任务中,所设计的航天器采用激光通信,将距离地球 1000 AU 处采集到的科学数据传回地球,下行激光功率为 10 W,地面接收口径为 10 m,通信速率可达 20 kb/s^[4]。1992 年,JPL 在伽利略光学实验(GOPEX)项目中成功演示了激光束由两个位置不同的地面站指向远至 600 万 km 的伽利略航天器^[5]。在始于 1997 年的 X2000 计划中,JPL 计划开发一种深空光通信星上终端,该终端在木卫二处与地球可实现白

天超过 100 kb/s、夜间接近 400 kb/s 的通信速率^[6],然而,由于预算原因,尽管星上终端结构设计完成,但计划后续并未实施。

2003 年,麻省理工学院林肯实验室(MIT-LL)、JPL 和戈达德航天飞行中心(GSFC)共同启动了火星激光通信演示(MLCD)项目,旨在开发火星静止轨道上的第一个端到端激光通信链路^[7]。该项目完成了初步的系统设计,当火星与地球最接近(0.7 AU)时,可实现 30 Mb/s 的下行通信速率。尽管该项目最终被取消,但其中开发的关键技术为后续深空激光通信项目的成功实施提供了重要支撑。2005 年,GSFC 成功地在距离地球 2400 万 km 的信使飞船上使用水星激光高度计(MLA)将激光束指向地球^[8]。

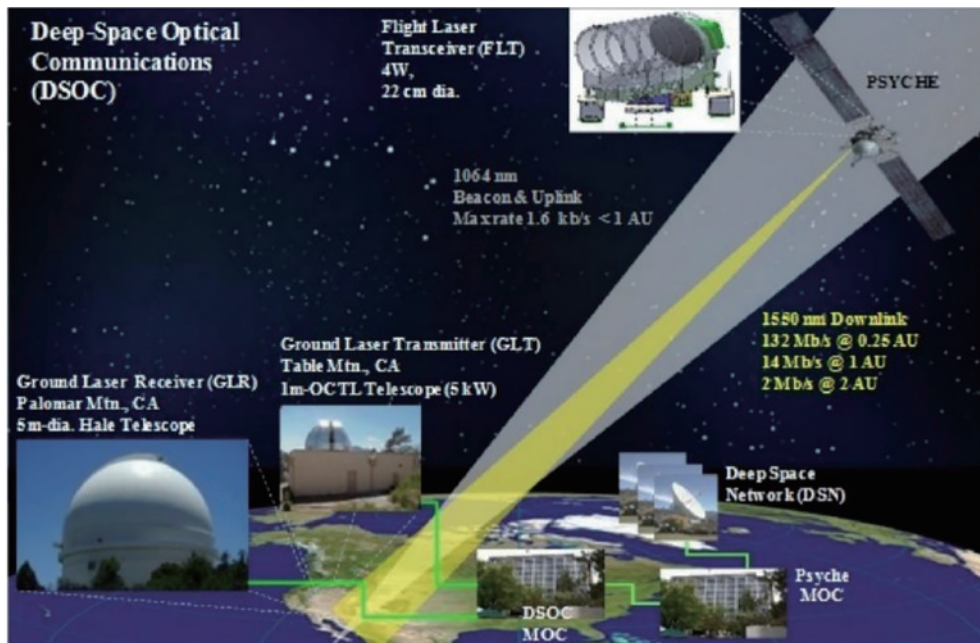
2.1.2 演示成果

2013 年,美国航空航天局(NASA)的月球激光通信演示(LLCD)首次成功演示了月球轨道卫星与地球地面站之间的双工激光通信^[9]。为提升可用性,该系统在主地面站(LLGT)之外还布置了两个备用地面站,分别位于美国桌山空间激光通信实验室(LLOT)和西班牙特内里费岛泰德天文台(LLOGS)。在此次演示中,LLGT 站点实现了地月间 622 Mb/s 的下行通信速率和 20 Mb/s 的上行通信速率。这标志着人类首次实现了星际激光通信,并且在当时打破了激光通信链路距离与月地通信速率的记录。LLOGS 站点由欧洲航天局(ESA)设计和管理,在演示中同样实现了 80 Mb/s 的下行通信速率和 20 Mb/s 的上行通信速率。

2023 年,NASA 的深空激光通信演示(DSOC)项目成功实施,再次突破了空间激光通信的链路距离极限,其架构如图 1 所示。搭载星上通信终端的飞船“Psyche”于 2023 年 10 月升空,在 2023 年 11 月,地面站第一次接收到了飞船发回地球的激光信号,此时飞船距离地球 1600 万 km^[10]。2023 年 12 月 11 日,飞船在距地球 3100 万 km 处通过激光通信成功传回了超高清视频,传输速率达到系统最大速率 267 Mb/s,彰显了激光通信在深空中传输高带宽视频和其他数据的卓越能力^[11]。同时,射频/激光混合天线的能力也得到了验证。从 2023 年 11 月起,直径为 34 m 的射频/激光混合天线“DSS-13”开始跟踪“Psyche”号传回的下行激光和射频信号,这首次展示了同步射频和激光深空通信的成功。到 2023 年底,混合天线通过空间激光通信以 15.63 Mb/s 的速率成功从距离 3200 万 km 的飞船处接收数据,相较于飞船上的射频通信速度提升了近 40 倍^[12]。

2.1.3 未来研究计划

2025 年,NASA 的“阿尔忒弥斯 2 号”(Artemis II)任务将发射“猎户座”(Orion)航天器,携带四名宇航员绕月飞行。猎户座阿尔忒弥斯 2 号空间激光通信(O2O)演示将展示从 Orion 航天器到地球地面站的高达 260 Mb/s 下行通信,以及从地面到航天器的高达

图 1 DSOC 运行架构与 4 个基本节点^[13]Fig. 1 Planned DSOC operational architecture and the four primary nodes^[13]

20 Mb/s 的上行通信^[14]。

为了未来火星探测系统的建立, NASA 计划在 DSOC 项目后建设火星轨道通信设施, 其关键是位于火星静止轨道上的中继卫星。中继卫星一方面可以为火星表面和火星轨道上的用户提供高速的数据访问, 另一方面可以通过激光与射频同地球进行通信。经过初步分析, 采用 10 cm 口径的发射望远镜与 2 W 的发射功率时, 下行通信速率可达 50 Mb/s^[15]。

此外, ESA 也正在推进深空激光通信项目计划。ESA 计划在卫星上安装深空光通信系统 (DOCS), 于 2024 年发射, 并将从拉格朗日点 L5 监测空间天气。地面将通过一个口径为 4 m 的望远镜接收数据, 预计下行通信速率将达到 10 Mb/s^[16]。

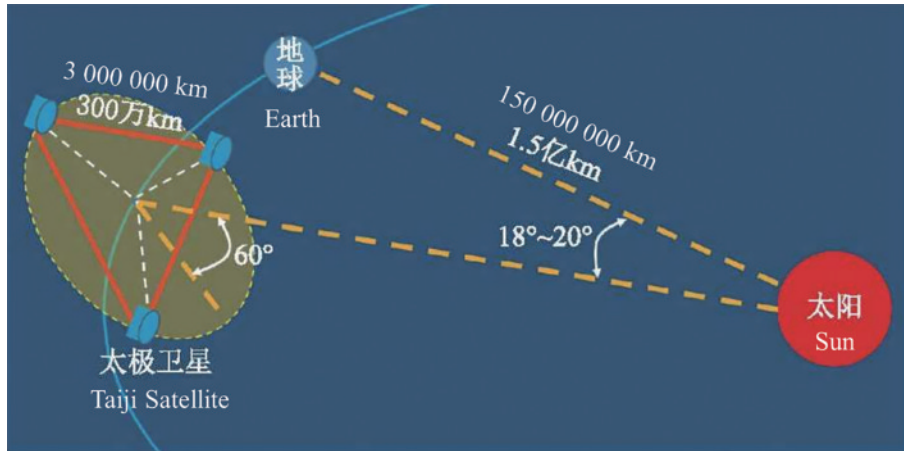
2.2 国内研究现状

国内空间激光通信研究起步较晚, 于 20 世纪 70 年代开始空间激光通信的研究。2011 年, 哈尔滨工业大学研制的激光通信载荷在“海洋二号”卫星上进行了星地激光通信实验, 轨道高度约为 970 km, 通信速率为 504 Mb/s^[17]。2016 年至 2017 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所研制的高速相干激光通信载荷搭载于量子卫星“墨子号”上发射升空并进行了在轨测试, 在 1000 km 的链路距离下实现了 5.12 Gb/s 的通信速率^[18]。2017 年, 哈尔滨工业大学研制的激光通信载荷搭载于“实践十三号”卫星升空, 在 40000 km 的轨道高度下实现了 5 Gb/s 的下行通信速率^[19]。2019 年, 中国航天科技集团五院研制的激光通信终端搭载“实践二十号”发射升空, 并于 2020 年与中国科学院光电技术研究所研制的 $\Phi 1.8$ m 自适应光学激光通信地面站——丽江站建立了国际首次正交相移键控 (QPSK)

相干星地激光通信链路, 在 36000 km 的轨道高度下实现了 10 Gb/s 的下行通信速率^[20]。2023 年 6 月, 由中国科学院空天信息创新研究院牵头, 低轨卫星“吉林一号”MF02A04 与中国科学院光电技术研究所研制的 $\Phi 500$ mm 自适应光学常态化激光通信地面站进行了 10 Gb/s 星地激光通信实验, 单次通信时长达 100 s 以上, 标志着我国星地激光高速通信工程应用的实现^[21]。

目前, 我国空间激光通信的研究主要集中在近地高速激光通信方面, 对于深空激光通信系统的研究较少。2012 年, 我国提出了中国空间引力波探测计划, 采用间距为 300 万 km 的正三角形卫星编队, 以太阳为中心落后 (或超前) 地球约 20° 进行绕转, 如图 2^[22]所示。由于卫星通过激光干涉测距系统获取引力波信号^[23], 为了实现卫星间的信息交互, 设计在星间干涉链路中加入激光通信。张艺斌等^[24]对太极计划星间激光通信的链路建立控制系统进行了研究, 提出了高捕获精度与高指向抖动控制精度的双向建链方案并进行了地面模拟实验, 获得了 $0.07 \mu\text{rad}$ 的捕获精度与 $9.7 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的指向控制精度。邓汝杰等^[25]基于相位计系统设计了星间激光通信的通信方案与光学验证系统, 测试得出, 通信系统在 19.5 kb/s 的通信速率下误码率优于 10^{-6} 。目前, 卫星编队中的第一颗卫星“太极一号”已于 2019 年成功发射, 剩余两颗卫星“太极二号”“太极三号”分别计划于 2024 年、2032 年发射。“太极二号”卫星到达指定轨道后, 将可开展星间激光捕获跟踪等技术的在轨验证。

此外, 其余相关研究多为用于深空激光通信的探测器、调制方式、跟踪瞄准等方面的技术研究, 暂未有相关技术的验证计划。

图 2 空间引力波探测太极计划三星编队图^[22]Fig. 2 Orbit and constellation of Taiji satellites^[22]

3 主要关键技术

深空激光通信实现的关键技术主要包括:超远距离稳定跟瞄技术、地面大口径光学天线技术、超高灵敏度探测技术、高效率调制与编码纠错技术等。

3.1 超远距离稳定跟瞄技术

确保星地链路的稳定建立是实现深空激光通信的首个关键步骤。深空激光通信链路的建立需要星上终端和地面终端进行稳定准确的双向跟踪与瞄准。与近地激光通信相比,深空激光通信距离的大幅增加导致上行信标光衰减加剧,星上终端难以精确跟踪信标光。随着距离的增大,振动对指向的影响也显著增加。因此,深空激光通信的捕获、跟踪和瞄准技术需要在近地跟瞄的基础上进行优化改进。

深空激光通信跟瞄的误差主要来源于直流瞄准偏移量和动态非弹性振动,因此解决问题的关键在于建立可靠的参考并抑制系统的振动。

由于上行信标激光强度不足,星上终端缺乏稳定可靠的指向参考,同时难以进行高频的跟踪控制。为解决这一问题,MIT/LL 在 MLCD 项目中提出了一种复合跟瞄方法,采用信标光和星载惯性系统作为共同参考^[26]。星载惯性系统选择了磁流体动力稳定惯性参考装置(MIRU),这在当时已经是成熟的技术。此外,还提出了对上行信标光进行调制,以抑制背景杂散光的影响。

针对振动问题,MIT/LL 提出了主动和被动混合抑制振动的方式。主动抑制通过测量望远镜指向与参考之间的抖动量,再控制驱动器对光束或光学系统施加力或扭矩实现。系统的中低频振动,均通过主动方法抑制。低频振动以上行信标光为参考,通过焦平面探测器监测发射信号光与其的光轴偏差,反馈至超前瞄准镜(PAM)进行抑制,同时控制发射光瞄准指定超前角方向;中频振动以 MIRU 上安装的激光器为参考,通过高读出频率的四象限探测器监测上行信标光与其

的光轴偏差,反馈至快速反射镜(FSM)进行抑制,同时控制上行信标光在探测器视场。由于高频振动要求传感器具有高读出频率与驱动器具有高校正频率,采用主动抑制的方案并不现实,因此高频振动采用“被动抑制”的方案。在太空环境中,系统的干扰主要来源于航天器运作产生的振动,因此可以采用振动隔离装置(如弹簧支架)将光学系统与航天器进行机械解耦,以隔离高频振动。主动和被动抑制结合,就可以抑制较宽范围的振动。

随后,JPL 提出采用可抑制角扰动的音圈驱动器驱动光学平台整体的方案,降低光学平台与航天器机械耦合的同时,还可以通过线性位置传感器监测并调节望远镜的整体指向,这不仅增大了望远镜的接收视场,也简化了光学系统^[27]。在 LLCD 项目中,就沿用了 MLCD 提出的混合扰动抑制方式,光学组件安装在 MIRU 平台上,MIRU 测出的角扰动信息反馈至万向架上的音圈驱动器,由音圈驱动器抑制中频振动并调整望远镜的粗指向^[28]。低频振动由 InGaAs 四象限探测器检测,通过压电驱动发射光纤与接收耦合光纤进行抑制,该设计省去了 PAM 与 FSM 的设计,在最大程度上对系统进行了简化。高频振动则可通过音圈驱动器本身的低耦合特性与光学组件隔离。

在 DSOC 项目中,由于通信距离进一步增大,望远镜的口径增大,抖动对系统的影响更大,同时探测信标时的噪声也更大。相比于之前的演示,DSOC 项目中对已有的 MIRU 传感器进行了改进,降低了其噪声^[29]。光学平台通过音圈驱动器与传感器组成的隔振组件与航天器连接,在隔离高频振动的同时调节望远镜的整体指向。DSOC 系统采用单光子探测器阵列对上行信号光进行接收与光轴监测,同时监测下行信号光光轴,光轴偏差信息反馈至音圈驱动器调节光学组件整体指向,并通过 PAM 调节超前角。

3.2 地面大口径光学天线技术

目前,激光通信演示所使用的地面天线主要是改

造后的天文望远镜。在 MLCD 项目中,计划采用口径为 5 m 的 Hale 望远镜。在 LLCD 项目中,主地面站则是专为光通信设计的多口径合成望远镜,备用地面站分别是 1 m 口径的光通信望远镜和改造后的 1 m 天文望远镜。DSOC 项目中,通信距离相比 LLCD 大幅提升,地面接收同样选择了 Hale 望远镜。

由于天文望远镜和光通信望远镜在设计上存在差异,未来随着激光通信项目的增加以及通信距离的进一步增加,势必需要建设更多专用于光通信的地面站。为了应对这一挑战,JPL 已经对用于深空光通信的多种地面站接收天线方案开展了研究。

3.2.1 大口径望远镜

在 20 世纪 90 年代,JPL 提出了深空激光通信研究计划,其中地面站建设计划包含了一个 10 m 口径的光通信望远镜和一个 1 m 口径的光通信实验望远镜^[30]。

10 m 大口径望远镜设计采用直接探测,对接收信号光波前畸变不敏感。只要保证聚焦光斑落在探测器范围内,就可以不采用大气湍流校正手段。因此,望远镜设计主要考虑在保证系统光学透过率的情况下,实现背景光和杂散光的最大化抑制。在考虑工程性和经济性的前提下,JPL 对主焦点和卡塞格林两种望远镜配置进行了分析。主焦点配置对杂散光的抑制效果好,但探测器不易安装,系统复杂性高;卡塞格林配置探测器接口便于接入,且易于放置滤光片^[31]。然而,这两种设计都包含非球面镜面,制造难度较大,迄今尚未建成。

1 m 望远镜于 2001 年在南加州圣贝纳迪诺山脉的桌山光通信望远镜实验室(OCTL)建成。该望远镜支持高功率激光传输(峰值功率密度 $>10 \text{ MW/cm}^2$,平均功率 $>100 \text{ W}$),可在接近太阳 30° 时工作,跟踪范围可从航天飞机到深空航天器^[32]。在 MLCD 项目中,计划采用 OCTL 望远镜作为地面发射终端。虽然 MLCD 未实施,但在 LLCD 项目中,OCTL 望远镜作为备用地面收发终端,成功与星上终端进行了通信。在 DSOC 项目中,OCTL 望远镜也作为地面发射终端成功进行了演示。

3.2.2 望远镜阵列

由于大口径望远镜制造困难、成本高,使用不够灵活,MIT/LL 于 2004 年提出了一种采用小口径望远镜阵列替代大口径望远镜作为激光通信地面接收天线的方案^[33]。小口径望远镜阵列除了成本低、制造简单外,还具备扩展性,可在一定范围内通过增加望远镜数量扩大阵列等效口径,适应更高的通信要求;单个望远镜检修维护时,也不会影响其余望远镜的工作。由于面积小、易于搬运,望远镜阵列适合在不同站点灵活布置。

相比于大口径望远镜,小口径望远镜阵列的挑战主要在于信号的探测与合并。由于每个望远镜都配备一个单独的探测器阵列,因此望远镜阵列要求探测器

具有较高的灵敏度和极低的噪声,以保证合并后信号的信噪比。在当时,MIT/LL 选择了雪崩光电二极管(APD)阵列作为接收探测器,在红外波段具有接近 50% 的光子探测效率,可以满足要求。

在 MLCD 项目中,计划采用一个 $4 \times 0.8 \text{ m}$ 的望远镜阵列作为备用地面接收天线,配备盖革模式 APD 阵列作为探测器。在 LLCD 项目中,主地面站采用 $4 \times 0.4 \text{ m}$ 的望远镜阵列作为接收天线,实现了最高 622 Mb/s 的下行通信速率,如图 3^[34]所示。



图 3 LLGT 地面终端望远镜具有 4 个 10 cm 口径的发射天线和 4 个 40 cm 口径的接收天线,共同安装于一个带有温控玻璃纤维外壳的万向架上^[34]

Fig. 3 LLGT ground terminal telescopes with four 10 cm apertures for the uplink and four 40 cm apertures for the downlink co-located on a common gimbal with a temperature-controlled fiberglass enclosure^[34]

3.2.3 射频/激光混合天线

尽管激光通信相比射频通信具有更高的速率、更小的质量与体积,但射频通信仍然具有一些激光通信不具备的优势,可在云雨天气等情况下可以作为激光通信的备用方案,因此未来的高速空间通信必然是由激光通信与射频通信组成的无线通信网络。为了降低建设成本,提高系统集成度,JPL 于 2011 年提出了将现有 34 m 口径射频天线 DSS-13 改造为射频/激光混合天线的方案^[35]。方案经过分析后确定,采用分区接收方式,在现有射频天线中心布置由 4 组可调节的六边形镜组成的光学天线主镜。次镜处布置球差校正器(SAC)以校正球差并最大限度去除射频信号,如图 4 所示。考虑分辨率与 SAC 安装空间等因素后,最终光学主镜区域直径可达 10.8 m。混合天线可在白天工作,最小太阳-地球-探测器角度(SEP)可达 10° ,在较大 SEP 下等效口径可达 8 m。

在 2023 年 11 月,NASA 用 DSS-13 混合天线成功接收了来自 1600 万 km 以外的 Psyche 号下发的射频和激光信号,并对比了两种通信方式的通信速率,这表明混合天线在实际通信中取得了显著的成功。

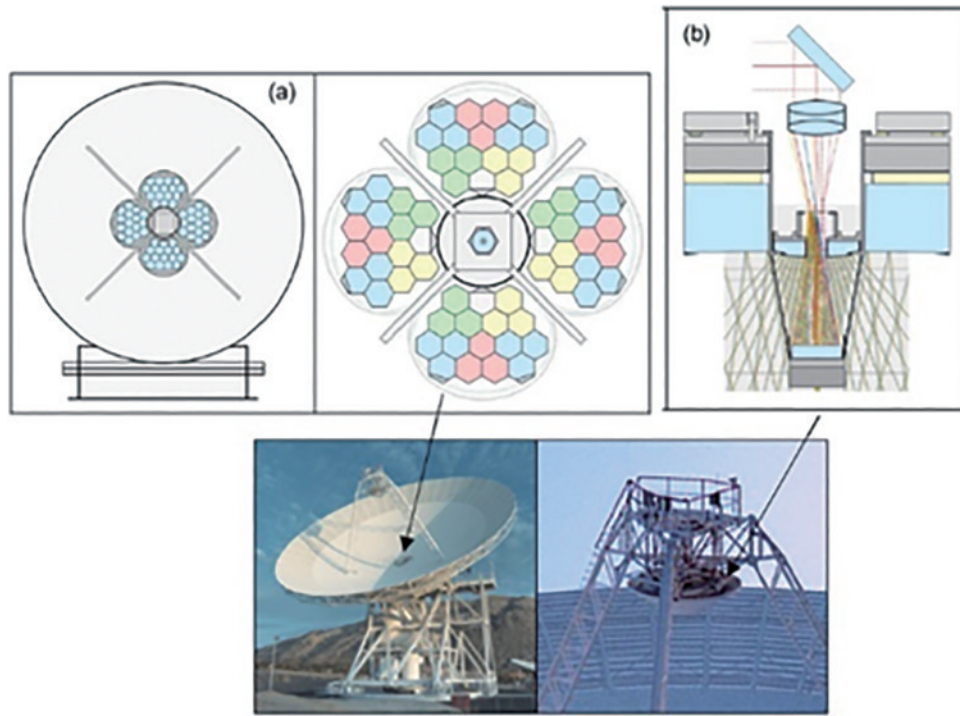


图 4 射频/激光混合天线^[13]。(a)在现有直径 34 m 的深空网络天线上改造光学表面的概念设计;(b)像差校正器与次镜或射频天线共存

Fig. 4 RF/laser hybrid antenna^[13]. (a) Concept for retrofitting an optical surface to the inner portion of existing 34 m diameter deep space network antennae; (b) secondary aberration corrector co-located with the secondary or the RF antenna

3.3 超高灵敏度探测技术

为了提升深空激光通信下行速率,除了提升星上发射激光功率与地面接收天线口径外,还可以提升地面探测器的灵敏度。

目前的深空激光通信方案均采用了单光子探测器,其接近量子极限的探测效率使每个接收光子能够实现多个比特的数据传输。超导纳米线单光子探测器(SNSPD)由莫斯科国立教育大学和罗切斯特大学于2000年首次展示,具有高光子检测效率、低定时抖动和快速重置时间等优势^[36]。SNSPD由一条横截面积非常小的超导纳米线实现,在吸收光子后可以产生局部激发,输出偏置电流,吸收的能量耗散后,纳米线重新回到超导状态,探测器不再输出电流,并自动复位。由于SNSPD的超小尺寸与简单的结构,SNSPD非常适合制成多单元探测器阵列,而不会引入额外的光学损失。此外,光子探测器对信号光波前畸变并不敏感,因此不需要对大气湍流造成的波前畸变进行校正,从而留出更多能量用于信号探测。SNSPD的应用挑战在于其需要在约3 K的低温环境中工作,因此不可部署于航天器上,且需要考虑低温冰箱与光学系统的热与振动隔离问题。

在LLCD项目中,LLGT地面站的4个接收望远镜各自配置了一个直径 $14\ \mu\text{m}$ 的4单元SNSPD阵列用于数据探测,光轴定位通过精密的钛低温压电 $xy\text{z}$ 堆叠实现。每个SNSPD性能相近,光子探测效率

(PDE)接近75%,定时抖动小于60 ps,暗计数率小于 $3000\ \text{s}^{-1}$,在2.8 K温度下重置时间小于5 ns^[33]。而LLOT地面站为单口径,配置了直径 $66\ \mu\text{m}$ 的12单元SNSPD阵列^[37]。为了增强系统的灵活性,该项目通过多模保偏光纤将望远镜焦点处的信号光耦合至低温冰箱的探测器焦平面。由于光纤耦合会引入耦合效率与偏振相关损失,为此,MIT/LL专门研制了一种弱保偏多模光纤,在大气湍流强度 D/r_0 为0.5~6.0时,耦合效率为92%~52%,偏振相关损失在0.44 dB以下^[38]。

在DSOC项目中,接收天线为5 m的Hale望远镜,信号光直接耦合至SNSPD阵列焦平面,不再经过多模光纤耦合。SNSPD阵列由JPL研制,具有64单元,在焦平面上被分成了4个象限,如图5所示。除了直接探测信号外,4象限SNSPD阵列还可以检测接收光的位置信息,用于对信号光的精密跟踪^[39]。整个SNSPD阵列工作面积直径为 $318\ \mu\text{m}$,光子探测效率大于50%,定时抖动小于150 ps,暗计数率 $10^4\ \text{s}^{-1}$,性能卓越。随着深空激光通信对通信距离与通信速率需求的增加,地面接收天线口径也将继续扩大,这将需要面积更大的SNSPD阵列。

3.4 高效率调制与编码纠错技术

深空激光通信链路距离长、接收光子匮乏的通信条件对于通信体制提出了很高的要求。脉位调制(PPM)信号光脉冲时隙占空比低,在平均激光探测功率受限的情况下可获得更高的峰值功率,调制的功率

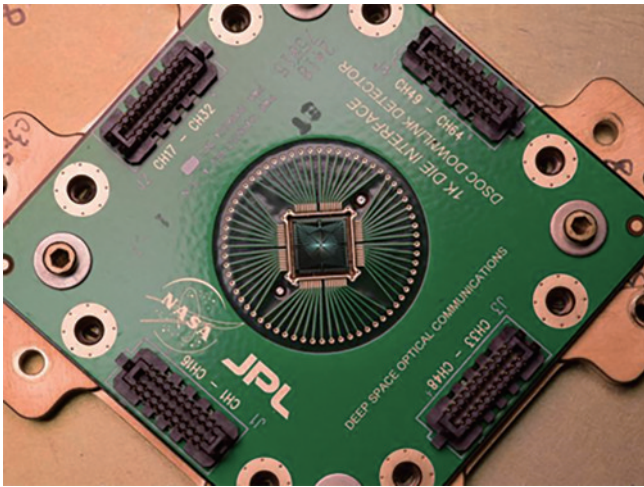


图 5 封装的 64 单元 SNSPD 阵列^[39]

Fig. 5 Packaged 64 pixel SNSPD array^[39]

利用率和频带利用率也更高,在 1980 年就被 NASA 考虑为深空激光通信最适用的调制格式。PPM 技术配合单光子探测器的通信体制具有能量调制效率高、抗干扰能力强和探测灵敏度高等优点,是当前深空激光通信体制的主要方案^[40]。

PPM 位数越高,通信效率也越高,然而为保证能量利用效率,光纤放大器的增益也需要提高,由于光纤噪声的存在,放大器输出峰值功率被限制为千瓦级。结合功耗、尺寸、质量、稳定性、寿命等需求,当前深空激光通信通常采用主振荡功率放大(MOPA)激光器,其中主振荡器是振幅稳定、单空间模式、低功率的激光器,通过编码的数据序列进行直接或外部调制,而后的光放大器提供超过 30 dB 的增益,将激光器的输出峰值功率提高到 0.1~1 kW 水平,同时保持其调制特性^[41]。

在 MLCD 项目中,采用了 MOPA 体系,主振荡器设计使用了商用基于掺镱光纤的低功率分布反馈式(DFB)光纤激光器,通过 LiNbO₃ 外调制器进行光信号调制,而后通过商业化的掺镱光纤放大器将信号光放大,平均功率可达到 5 W,峰值功率可达到 300~500 W^[42]。在随后实际实施的 LLCD 项目中,沿用了 DFB 主振荡器和 LiNbO₃ 外调制器,并通过一种双通两级保偏掺镱光纤放大实现了下行信号光 0.5 W 的平均功率^[43]。DSOC 项目的通信距离相较于月球更远,为此 NASA 优化了已有的激光器,采用了两级 1550 nm 光纤放大器,实现了达 50 dB 的增益,最终发射系统可实现 6 W 的平均功率和 1 kW 峰值功率,同时保持了多速率 128-PPM 格式的性能,并通过了热、辐射和振动测试^[44]。

此外,由于干扰、空间衰减以及受限的激光功率,信道编码也是有效通信的关键因素。早期,探测器多采用外码为 RS 码,内码为卷积码的级联码;随后, Turbo 码出现并逐步成为深空通信的主流编码;同时,

LDPC 码的优越性能也被发掘,成为深空通信编码的一种备选方案^[45]。在 MLCD 项目中, NASA 提出了距离信道容限小于 1 dB 的 SCPPM 码,其性能优于 RS 码、卷积码以及级联码,在后来美国的深空激光通信项目中得到了应用。

在 MLD 项目中,就计划采用 32-PPM 和 64-PPM 调制方式,并提出了 SCPPM 码,实现达 30 Mb/s 的下行通信速率。在 LLCD 项目中,采用了 16-PPM 调制方式,编码类型为 1/2 Turbo 码,实现了 40~622 Mb/s 的下行通信速率^[46]。在 DSOC 项目中,则采用了更高的 128-PPM 调制方式,编码类型为 SCPPM 码,实现了 267 Mb/s 的下行通信速率^[47]。在 NASA 之后的深空激光通信项目中,调制格式也均计划采用 PPM 方式。

4 启示与思考

4.1 深空激光通信发展特点

深空激光通信技术是在一个完善的体系下循序渐进发展的。美国于 20 世纪 60 年代开始空间激光通信技术研究;80 年代初,明确了激光通信作为未来深空通信的主要手段,并开始一系列研究论证;90 年代初,提出了未来三十年的深空激光通信研究计划,包括总体布局、基础设施建设和关键技术开发;90 年代至今,美国深空激光通信研究基本按照计划执行。

在总体布局上,深空激光通信距离由月球到火星及太阳系其他行星,范围由点对点向中继网络通信发展,空间上呈由近及远、由点到面的发展特点。

在基础设施上,美国充分利用资源,将积累的研究成果用于建设实验测试平台和样机,并建设了空间激光通信专用地面站支持后续演示实验。

在关键技术上,针对激光源、星上通信终端结构、捕跟方式、接收方式、探测器等关键环节的技术都进行了全面的开发,成熟的技术则在后续项目中沿用,保证可靠性与经济性。

4.2 深空激光通信未来发展方向

从总体布局来看,未来深空激光通信在月球的部署将进一步发展,在火星及太阳系其他行星实现激光通信是下一步目标。随后,围绕各行星的中继通信网络将进入建设,以构建星际激光通信网络。同时,激光通信与射频通信将进一步集成,形成复合通信网络。

从技术方案来看,未来深空激光通信的技术细节仍有优化的空间。一些技术在深空激光通信中具备应用潜力,例如:天基望远镜可实现全天候观测,且可覆盖天区较大;相干探测技术可消除背景光干扰并提供准确的光学多普勒信号;自适应光学校正技术可提升相干探测光纤耦合效率与直接探测信噪比。新技术的开发和引入将不断提升深空激光通信的能力。

4.3 我国深空激光通信实现技术路线探讨

参考美国等国家在深空激光通信领域的成功经

验,我国可结合未来探月计划,将月地通信作为开展深空激光通信的第一步。激光通信载荷可搭载于月球探测卫星,在现有空间激光通信星上终端的基础上,对稳定系统进行优化,采用主动与被动结合的方式抑制扰动。星上探测器采用四象限单光子探测器阵列(如 APD 阵列)实现上行信号光的跟踪与直接探测。下行信号光采用 1064 nm 或 1550 nm 波段,激光器采用 MOPA 架构,采用多位 PPM 调制方式,编码类型可选择 SCPPM 纠错码。地面通过 2 米级光通信望远镜接收,配备超导纳米线单光子探测器阵列对下行信号光进行探测,同时可获取信号光位置信息用于跟踪。

实现月地激光通信后,可进一步构建地面站、近地卫星、中继卫星、月球卫星、月球车、深空探测器的空间激光通信网络,并不断提升深空激光通信速率与距离,发展拉格朗日点-地、火星-地等深空激光通信技术,为火星及太阳系内其余行星探测活动打下基础。

5 结束语

深空激光通信作为深空探测活动中高效可靠的通信手段,为探测器提供了快速传回海量科学数据的能力,这一技术已成为未来深空探测中的关键技术。当前深空激光通信演示已取得较丰富的成果,实际应用正在逐步筹划之中。我国可基于现有空间激光通信技术基础,积极学习和借鉴国外先进经验,跟进深空激光通信研究,为我国未来的深空探测活动奠定基础。

参 考 文 献

- [1] Lesh J R, Katz J, Tan H H, et al. 2.5-bit/detected photon demonstration program: description, analysis, and phase I results[R]. Pasadena: Jet Propulsion Lab, 1981.
- [2] Hemmati H. Deep space optical communications[M]. Hoboken: Wiley, 2006.
- [3] Lambert S G. Design and analysis study of a spacecraft optical transceiver package[R]. Saint Louis: McDonnell-Douglas Astronautics Co., 1985.
- [4] Nock K. TAU-A mission to a thousand astronomical units [C]//19th International Electric Propulsion Conference, May 11-13, 1987, Colorado Springs, CO. Virginia: AIAA Press, 1987: 1049.
- [5] Wilson K E, Lesh J R. An overview of the Galileo optical experiment (GOPEX) [J]. Telecommunications and Data Acquisition Progress Report, 1993, 114: 192-204.
- [6] Hemmati H, Lesh J R. Laser communications terminal for the X2000 series of planetary missions[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3266: 171-177.
- [7] Biswas A, Boroson D, Edwards B. Mars laser communication demonstration: what it would have been [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6105: 610502.
- [8] Smith D E, Zuber M T, Sun X L, et al. Two-way laser link over interplanetary distance[J]. Science, 2006, 311(5757): 53.
- [9] Boroson D M, Robinson B S, Murphy D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710S.
- [10] O'Neill I J. NASA's deep space optical comm demo sends, receives first data[EB/OL]. [2023-11-16]. <https://www.nasa.gov/missions/psyche-mission/nasas-deep-space-optical-comm-demo-sends-receives-first-data/>.
- [11] O'Neill I J. NASA's tech demo streams first video from deep space via laser[EB/OL]. [2023-12-18]. <https://www.nasa.gov/directorates/stmd/tech-demo-missions-program/deep-space-optical-communications-dsoc/nasas-tech-demo-streams-first-video-from-deep-space-via-laser/>.
- [12] O'Neill I J. NASA's new experimental antenna tracks deep space laser[EB/OL]. [2024-02-08]. <https://www.nasa.gov/technology/space-comms/deep-space-network/nasas-new-experimental-antenna-tracks-deep-space-laser/>.
- [13] Hoppe D, Biswas A, Srinivasan M, et al. Deep space optical communications[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10524: 105240U.
- [14] Robinson B S, Khatri F I, Padula M, et al. Optical communication for human space exploration-status of space terminal development for the Artemis II crewed mission to the moon[C]//IEEE ICSOS Conference, March 28-31, 2022, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2022.
- [15] Lock R E, Edwards C D, Nicholas A K, et al. Small areostationary telecommunications orbiter concepts for Mars in the 2020s[C]//2016 IEEE Aerospace Conference, March 5-12, 2016, Big Sky, MT, USA. New York: IEEE Press, 2016.
- [16] Sodnik Z, Heese C, Arapoglou P D, et al. European deep-space optical communication program[J]. Proceedings of SPIE, 10524: 105240Q.
- [17] 徐晓帆, 陆洲. 星地激光通信可靠性保障技术研究现状 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(6): 650-657.
Xu X F, Lu Z. Research status of mitigation techniques to assure the reliability of satellite-to-ground laser communications[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(6): 650-657.
- [18] 空间激光信息技术研究中心. 上海光机所星地高速相干激光通信实验成功完成在轨测试[EB/OL]. [2017-01-24]. http://www.siom.cas.cn/xwzx/ttxw/201701/t20170120_4739274.html.
Space Laser Information Technology Research Center. Shanghai Institute of Optics and Mechanics successfully completed in orbit testing of high-speed coherent laser communication experiment between satellite and ground [EB/OL]. [2017-01-24]. http://www.siom.cas.cn/xwzx/ttxw/201701/t20170120_4739274.html.
- [19] 谭立英, 孙征虎. 深空月地激光高速信息传输技术[J]. 深空探测学报, 2019, 6(6): 515-522.
Tan L Y, Sun Z H. High speed laser information transmission technology of deep space between moon and earth[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(6):

- 515-522.
- [20] 崔岳, 唐勇. 实践二十号卫星在轨核心试验全部完成[J]. 国际太空, 2020(7): 38-41.
Cui Y, Tang Y. The in-orbit core test of Shijian-20 satellite has been completed[J]. Space International, 2020 (7): 38-41.
- [21] 景洋. 100 秒, “吉林一号”实现星地激光高速通信[EB/OL]. [2023-06-29]. <https://mp.pdnews.cn/Pc/ArtInfoApi/article?id=36436449>.
Jing Y. 100 seconds, “Jilin No. 1” achieves high-speed satellite ground laser communication[EB/OL]. [2023-06-29]. <https://mp.pdnews.cn/Pc/ArtInfoApi/article?id=36436449>.
- [22] 罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极 1 号”在轨测试[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 3-10.
Luo Z R, Zhang M, Jin G, et al. Introduction of Chinese space-borne gravitational wave detection program “Taiji” and “Taiji-1” satellite mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 3-10.
- [23] 赵梦阳, 高瑞弘, 张强涛, 等. 太极计划激光链路构建地面模拟控制系统研究[J]. 中国激光, 2023, 50(19): 1906003.
Zhao M Y, Gao R H, Zhang Q T, et al. Research on simulated laser link construction control system of Taiji program[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(19): 1906003.
- [24] 张艺斌, 邓汝杰, 刘河山, 等. 太极计划星间激光通信参数设计及实验验证[J]. 中国激光, 2023, 50(23): 2306002.
Zhang Y B, Deng R J, Liu H S, et al. Parameter design and experimental verification of Taiji program inter-satellite laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(23): 2306002.
- [25] 邓汝杰, 张艺斌, 刘河山, 等. 太极计划中的星间激光测距地面电子学验证[J]. 中国光学, 2023, 16(4): 765-776.
Deng R J, Zhang Y B, Liu S H, et al. Ground electronics verification of inter-satellites laser ranging in the Taiji program[J]. Chinese Optics, 2023, 16(4): 765-776.
- [26] Scozzafava J J, Boroson D M, Bondurant R S, et al. The Mars lasercom terminal[C]//Digest of the LEOS Summer Topical Meetings, July 25-27 2005, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 9-10.
- [27] Chen C C, Hemmati H, Biswas A, et al. Simplified lasercom system architecture using a disturbance-free platform[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6105: 610505.
- [28] Boroson D M, Scozzafava J J, Murphy D V, et al. The lunar laser communications demonstration (LLCD)[C]//2009 Third IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology, July 19-23, 2009, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE Press, 2009: 23-28.
- [29] Jacka N, Walter R, Laughlin D, et al. Design of stabilized platforms for deep space optical communications (DSOC)[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10096: 100960P.
- [30] Lesh J R, Deutsch L J, Weber W J. Plan for the development and demonstration of optical communications for deep space[J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1522: 27-35.
- [31] Britcliffe M, Hoppe D, Roberts W, et al. A ten-meter ground-station telescope for deep-space optical communications: a preliminary design[R]. Pasadena: Jet Propulsion Lab, 2001.
- [32] Wilson K E, Britcliffe M, Golshan N. Progress in design and construction of the Optical Communications Telescope Laboratory (OCTL) [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3932: 112-116.
- [33] Boroson D M, Bondurant R S, Murphy D V. LDORA: a novel laser communications receiver array architecture [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5338: 56-64.
- [34] Grein M E, Kerman A J, Dauler E A, et al. An optical receiver for the lunar laser communication demonstration based on photon-counting superconducting nanowires[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9492: 949208.
- [35] Charles J R, Hoppe D J, Sehic A. Hybrid RF/optical communication terminal with spherical primary optics for optical reception[C]//2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), May 11-13, 2011, Santa Monica, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 171-179.
- [36] Gol'tsman G N, Okunev O, Chulkova G, et al. Picosecond superconducting single-photon optical detector [J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(6): 705-707.
- [37] Biswas A, Kovalik J M, Wright M W, et al. LLCD operations using the Optical Communications Telescope Laboratory (OCTL) [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710X.
- [38] Grein M E, Kerman A J, Dauler E A, 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), May 11-13, 2011, Santa Monica, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 78-82.
- [39] Srinivasan M, Alerstam E, Wollman E, et al. The deep space optical communications project ground laser receiver [J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12413: 124130R.
- [40] 向劲松, 邓晨辉, 蒋豪, 等. 基于光子探测阵列的 PPM 系统误码性能分析[J]. 光通信研究, 2017(2): 27.
Xiang J S, Deng C H, Jiang H, et al. The performance analysis for PPM system based on photon-counting detector arrays[J]. Study on Optical Communications, 2017(2): 27.
- [41] Hemmati H, Biswas A, Djordjevic I B. Deep-space optical communications: future perspectives and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 2020-2039.
- [42] 马晶, 徐科华, 谭立英, 等. 美国火星激光通信系统分析[J]. 空间科学学报, 2006, 26(5): 364-369.
Ma J, Xu K H, Tan L Y, et al. Analysis for Mars laser communications system in USA[J]. Chinese Journal of Space Science, 2006, 26(5): 364-369.
- [43] Constantine S, Elgin L E, Stevens M L, et al. Design of a high-speed space modem for the lunar laser communications demonstration[J]. Proceedings of SPIE,

- 2011, 7923: 792308.
- [44] Gupta S, Engin D, Pachowicz D, et al. Development, testing, and initial space qualification of 1.5- μm high-power (6 W) pulse-position-modulated (PPM) fiber laser transmitter for deep-space laser communication[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9739: 97390V.
- [45] 李皓. 深空光通信中的 SCPPM 编码性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- Li H. Research on coding performance of SCPPM in deep space optical communication[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [46] 赵焯. 深空激光通信系统 PPM 调制解调技术研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2020.
- Zhao Y. Research on pulse position modulation and demodulation in deep space laser communication system [D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2020.
- [47] Srinivasan M, Rogalin R, Lay N, et al. Downlink receiver algorithms for deep space optical communications [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10096: 100960A.