

深空光通信技术现状及发展趋势*

罗 彤¹, 王伟志¹, 薛佳音¹, 丁润伟¹, 张钦宇^{1,2}

(1 鹏城实验室 深圳 518052)

2 哈尔滨工业大学(深圳) 深圳 518052)

摘要: 深空通信是深空探测任务顺利进行的重要保障。以激光为载波的通信系统具有通信速率高、体积小、重量轻和功耗低等特点, 已成为深空通信未来发展的主要方向。总结了深空光通信系统的发展现状和未来发展趋势, 分析了深空光通信系统的组成以及关键技术。在此基础上, 就未来技术发展、组网规划、标准化和生态演进、演示验证等方面, 给出了我国深空光通信发展的思考和建议。

关键词: 深空光通信; ATP; 深空通信网络

中图分类号: V443+.1

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2022)04-0044-12

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220518001

引用格式: 罗彤, 王伟志, 薛佳音, 等. 深空光通信技术现状及发展趋势[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 44-55.

Status and development trends of deep space optical communication

LUO Tong¹, WANG Weizhi¹, XUE Jiayin¹, DING Runwei¹, ZHANG Qinyu^{1,2}

(1. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518052, China;

2. Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518052, China)

Abstract: Deep space communication is an essential guarantee for the implementation of deep space explorations. Laser communication has the characteristics of high data rate, small size, light weight and low power consumption, and has become the main trend of the future development of deep space communication. In this paper, the development status and trends of deep space optical communication system are summarized, and the composition and key technologies of deep space optical communication system are analyzed. On this basis, some suggestions for the development of deep space optical communication in China are given in terms of future technology development, networking planning, standardization and ecology evolution, demonstration and verification.

Key words: Deep space optical communication; ATP; Deep space communication network

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220518001

Citation: LUO Tong, WANG Weizhi, XUE Jiayin, et al. Status and development trends of deep space optical communication[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 44-55.

引 言

深空探测广义上指脱离地球引力场, 进入太阳系和宇宙空间的探测活动。关于深空探测的严谨定义, 一种是国际电信联盟 ITU (International Telecommunication Union) 在《无线电规则》第 1.77 款中关于深空探测的规定, 即距离地球 200 万公里以外的探测任务; 另一种定义为对月球及以远地天体或空间开展的探测活动^[1]。我国采用第二种定义, 将月球探测作为深空探测的起点^[2]。

作为丰富人类认知、拓展人类生存空间、提升国家基础创新能力、推动重大科技创新的领域, 深空探测一直受到各大航天强国的高度关注, 已成为人类航天活动的探索热点和各国科技竞争的战略制高

*基金项目: 鹏城实验室重大攻关项目 (PCL2021A03-1)

通信作者: 张钦宇 (zhangqy@pcl.ac.cn)

收稿日期: 2022-05-18 收修改稿日期: 2022-06-28

点。2021 年《中国航天白皮书》^[3]制定了深空探测的总体发展要求,即继续开展月球探测、行星探测工程,发射小行星探测器、完成近地小行星采样和主带彗星探测,完成火星采样返回、木星系探测等关键技术攻关,论证太阳系边际探测等实施方案。

深空通信是深空探测器与地球建立联系的信息桥梁,是保障深空探测任务顺利完成的时空纽带。随着遥测技术发展,高光谱成像仪、合成孔径雷达等高分辨率图像采集设备的使用,以及机器人/载人探测任务的语音、视频、宇航员的健康监测数据对通信速率需求大大增加,当前以微波为主的通信手段已难以满足日益增长的大带宽、高速率、实时性等通信需求。此外,面向更远离太阳的深空进行探测,由于太阳能量难于获取,对通信载荷的体积、重量和功耗 SWaP (Size, Weight and Power) 的要求也更为严苛。随着地面光纤通信技术发展和近地卫星光通信系统的成功验证,以激光为载波的空间光通信系统因具有带宽大、指向好、速率高、保密性强、频谱无需申请以及终端体积小、重量轻、功耗低等特点,逐渐成为深空通信新的研究方向。美国航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 和欧空局 ESA (European Space Agency) 针对深空光通信进行了大量研究,已经计划及开展了多项深空光通信演示项目。从 NASA 的月球激光通信演示验证 LLCD (Lunar Laser Communication Demonstration) 项目在轨实测数据来看,月地间的通信速率可达到 622 Mbps,相对于微波通信,速率提升至 6 倍,并且通信载荷的重量减少 50%,功耗减少 20%^[4]。通信速率的提升能够大大丰富探测任务的多样性,SWaP 的降低能够支撑更远距离的探测,深空光通信技术可望成为未来深空探测的主要解决方案,有着广阔的发展前景。

基于深空光通信技术在未来深空探测任务中的重要性,本文对国内外深空光通信发展现状进行了调研和总结,并对系统组成和关键技术发展进行说明;然后在分析未来深空光通信的技术演进途径、组网、标准化及生态发展趋势的基础上,对我国深空光通信的发展提出建议。

1 发展现状

相对于近地光通信,深空光通信信号衰减更大,信道环境更为复杂,光束的捕获、跟踪和对准 ATP (Acquisition, Tracking and Pointing) 的技术难度急剧增加,必须通过提升发射功率、增大收发天线增益和光学系统效率、提高对准精度和探测灵敏度来满足链路预算要求。这大大增加了系统复杂性和设计难度,目前只有少数航天国家开展了系统级的验证测试。美国是最早也是唯一完成月地光通信在轨验证的国家,ESA 配合 NASA 进行了月地通信中地面站的验证测试。我国目前还处于深空光通信专项技术研究和论证阶段,尚无工程化演示系统的相关报道。

1.1 美国 NASA

美国是最早进行深空光通信研究的国家,从上个世纪 90 年代开始,NASA 及合作方就开展了一系列的深空光通信验证项目^[5]。其中具有里程碑意义的是 2013 年月球激光通信验证项目 LLCD^[6],实现了下行 622 Mbps、上行 20 Mbps 的传输速率,第一次实现了月地通信链路上高清电视图像传输。依托于火星激光通信演示系统 MLCD (Mars Laser Communications Demonstration) 的研究成果,NASA 启动了火星距离级别的深空光通信项目 DSOC (Deep Space Optical Communication)^[7],预计 2022 年将在 Psyche 任务中使用,对小行星带“16 Psyche”小行星的遥测数据进行回传。重返月球计划启动后,NASA 的 Artemis 项目承担登月任务,计划于 2023 年在 Artemis II 月球任务中进行载人绕月飞行。载人猎户座宇宙飞船将使用 O2O (Optical to Orion) 激光通信终端,提供 4K 超高清实时视频及科学数据的传输^[8],这将是首次载人飞行任务中使用激光通信链路。NASA 计划于 2025 年开展月球轨道平台网关 LOP-G (Lunar Orbital Platform-Gateway)^[9]项目,实现 LOP-G 对地、月球表面、载人航天器、中继卫星间的激光通信。NASA 规划目标在 DSOC 二代系统上实现 1 Gbps@1 AU (天文单位) 的通信速率^[10]。NASA 上述项目的相关信息详见表 1。

表 1 NASA 深空光通信演示系统
Table 1 NASA's deep space optical communication systems

演示系统	LLCD	DSOC Gen-1	Orion EM-2	LOP-G
距离	月-地	0.1 AU~2 AU	月-地	月-地
波长	1 550 nm	上行 1 064 nm/下行 1 550 nm	1 550 nm	1 550 nm
速率	上行 10 M/20 Mbps 下行 39 Mbps~622 Mbps	上行 1.6 kbps<1 AU 下行 2 Mbps@2 AU 下行 14 Mbps@1 AU 下行 132 Mbps@0.25 AU	上行 20 Mbps 下行 80 Mbps ~250 Mbps	上行>20 Mbps 下行>1 Gbps
光端机整机	发射功率: 0.5 W 天线直径: 10 cm 质量: 30.7 kg 功耗: 90 W	发射功率: 4 W 天线直径: 22 cm 质量: 28 kg 功耗: 76 W	发射功率: 1 W 天线孔径: 10 cm	-
地面站	发射功率: 4×10 W 发射天线直径: 4×15 cm 接收天线直径: 4×40 cm&1 m	发射功率: 5 kW 发射天线直径: 1 m 接收天线直径: 5 m	-	-
任务时间	2013 年	2022 年	2023 年	2025 年

1.2 欧洲 ESA

ESA 对空间光通信研究多集中在地球数据中继卫星的应用上, 深空光通信演示验证相对较少。2013 年, ESA 的地面站配合 NASA 的 LLCD 进行了光通信和测距测试, 并验证了 DTN 协议在深空光通信中的有效性^[11]。2015 年, ESA 曾计划在小行星撞击任务 AIM (Asteroid Impact Mission)^[12]中进行 0.5 AU 深空通信演示, 因该项目未能通过批准从而转向深空光通信系统 DOCS (Deep-space Optical Communications System)^[13]的研制, DOCS 系统预计 2024 年在空间环境认知 (Space Situational Awareness) 计划的空间天气 SWE (Space Weather) 任务中使用, 进行地球-拉格朗日点 L5 之间的通信试验。ESA 于 2015 年开始提议开展月球村 (Moon Village) 计划^[14], 吸纳公共/私人实体加入, 在月球共同建设基础设施。当前参与分析的备选方案中, 月-地高速链路建议采用光通信, 预计在 2025 年~2030 年间进行首次实验。ESA 深空通信目标是在 2025 年达到 100 Mbps@1 AU, 可通率 95 %^[15]。ESA 上述项目的相关信息详见表 2。

表 2 ESA 深空光通信演示系统
Table 2 ESA's deep space optical communications

演示系统	LLCD	DOCS	Moon Village
距离	月-地	1 AU	月-地
波长	1 550 nm	上行 1 064 nm/下行 1 550 nm	405 nm
速率	上行 20 Mbps 下行 80 Mbps	下行 10 Mbps (地面站 4 m 天线) 下行 625 kbps (地面站 1 m 天线)	1 Gbps
光端机整机	--	发射功率: 5 W 天线孔径: 20 cm	发射功率: 35 W~350 W 发射天线直径: 50 mm (发散角 1°) 接收天线直径: 2×1 m
地面站	发射功率: 3×40 W 发射天线直径: 3×40 mm 接收天线直径: 1 m	发射功率: 4×600 W 发射天线直径: 1 m/4 m 接收天线直径: 1 m/4 m	-
任务时间	2013 年	2024 年	2025 年以后

2 系统组成及关键技术

当前典型的深空光通信系统组成如图 1 所示, 包括光端机 FLT (Flight Laser Terminal) 和光通信地面站 OGS (Optical Ground Station), FLT 和 OGS 具有相同的功能组成, 主要由光机子系统、ATP 子系统、通信子系统等功能模块组成。以下就各子系统的 key 技术发展方向进行说明。

2.1 光机子系统

光机子系统主要由天线、光学子系统和二维转台组成。天线及光学子系统除了保证提供足够的天线增益、视场范围、收发效率外,多轴系统的同轴度、收发光路的隔离度以及对杂散光的抑制度是设计考虑的关键因素。机械转台受 ATP 子系统控制,实现大范围的光束扫描。

FLT 为了减少同轴遮挡,天线大都采用离轴望远镜方式。收发隔离通常采用波长隔离、偏振隔离或二者相结合的方案。对杂散光的抑制主要采用滤波和光学设计保证,由于深空信道多普勒频偏大(火星-地球频偏达 $13.5\text{ GHz}@1\ 550\text{ nm}$),滤波带宽不能太小,采用偏振收发方式也能减少杂散光。图 2 所示为 NASA 的 DSOC 天线^[16],其光学天线采用离轴 Gregorian 望远方式,在副镜前面增加光阑,以减少杂散光。

深空信道中对链路质量影响最大的是大气层段,大气湍流的随机、无规则起伏运动,会造成光束强度闪烁和相位起伏,严重影响深空激光通信质量。当前减少大气湍流影响的方法主要有大口径天线接收技术、分集技术和自适应光学技术。FLT 受限于 SWaP,当前还无法应用以上技术。OGS 天线则已开展了这几项技术的研究和应用。NASA、ESA 都开始进行下一代 $8\text{ m}\sim 12\text{ m}$ 大口径 OGS 的研制^[17]; NASA 的 LLCD 项目中 OGS 采用了多个中小型天线组成天线阵列^[18],除了获取等效的天线口径外,多个非相干信号叠加能起到分集效果、减少信号闪烁起伏的作用,但分集接收对接收到的信号进行合并处理相对复杂。在自适应光学技术上,ESA 正在研发 24×24 阵列,控制带宽 4 kHz 的变形镜,准备应用于下一代 OGS 天线的自适应光学系统中^[19]。

另外, NASA 在 2010 年启动了在射频天线基础上嵌入折反式光学天线技术 iROC (Integrated Radio and Optical Communications) 的研究。首先,在 DSS-13 号 34 m 口径的深空射频测控站进行技术评估,使其在接收 Ka 波段信号同时也能接收 $1\ 550\text{ nm}$ 波长的光信号^[20]。该系统的光学主镜采用 64 块六边形反射镜拼接合成,分为 4 个子孔径,等效为一个 8.3 m 有效口径的光学天线。随后,基于地面站 iROC 的研究也延伸到 FLT 上, NASA 计划在火星勘测轨道飞行器 MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) 项目中将 Ka 波段 3 m 口径天线的中心位置集成 0.25 m 口径的光学天线,预计采用该天线的系统速率可达 $1\text{ Mbps}@$ 木卫二、 $350\text{ Mbps}@$ 火星近心点,对准精度 $2\ \mu\text{rad}$ ^[21]。iROC 主要优势在于:① 无需上行信标光;② 可在 RF 和光链路中进行切换,增加通信速率的同时也减少任务风险。OGS/FLT 的 iROC 天线模型如图 3 所示。

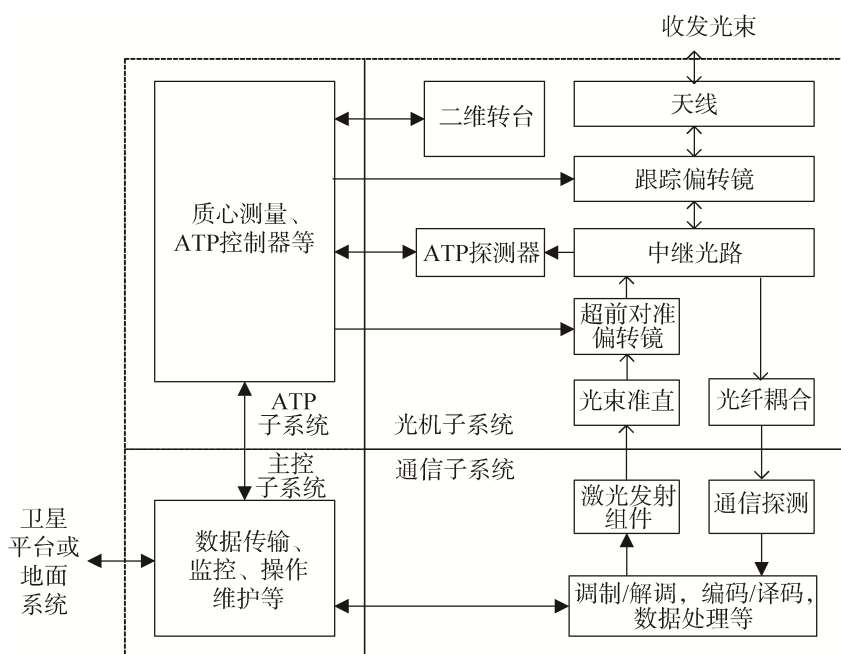


图 1 深空光通信系统组成示意图

Fig. 1 The schematic of deep space optical communication subsystems

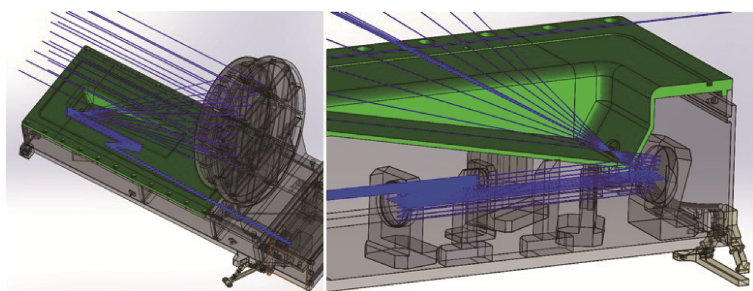


图 2 DSOC 光端机天线模型图

Fig. 2 The diagram of DSOC FLT telescope model

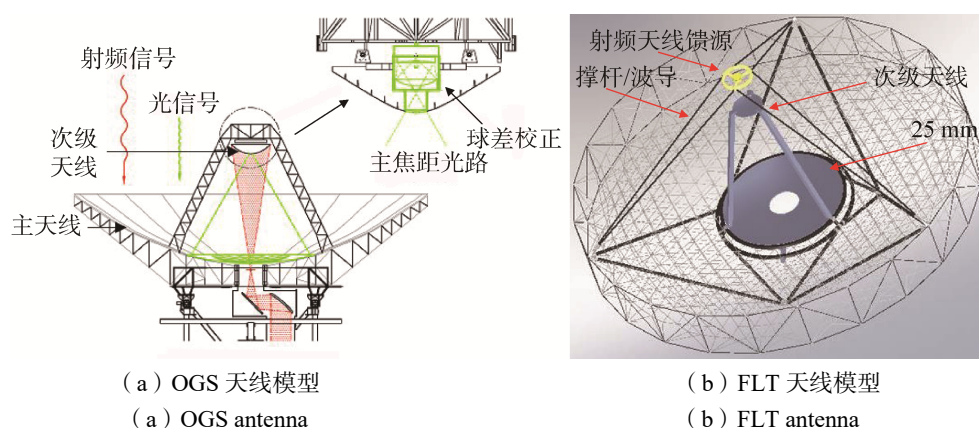


图 3 iROC 天线模型图

Fig. 3 The diagram of iROC telescope model

2.2 ATP 子系统

激光通信系统的束散角小, 快速精确地捕获、瞄准和跟踪是深空光通信成功与否的决定性因素以及影响通信性能优劣的重要因素。ATP 子系统用于实现光束的捕获、跟踪和对准, 其关键技术包括超远距离微弱信号的捕获技术和高精度、高带宽的跟瞄技术。

光束通过大气层和深空信道会导致光束的衰减、展宽和闪烁, 超远距离的快速捕获是深空光通信应用中的一个挑战。对于月地距离级别的链路, 还可以采用 OGS 发射信标光的方式进行捕获, 但是对于更远距离的链路, 功率受限将使得采用信标方式变得不可行。国内外针对深空无信标捕获技术进行了研究, 文献[22]提出以地球为信标, 通过地球的红外成像对 OGS 进行无信标捕获, 但在地球自转下, 陆地、海洋和云量的变化在成像上的差异会导致定位不准确。另外一种方案是采用红外恒星敏感器^[23], 因为恒星的位置和亮度相对比较恒定, 利用星历表, 根据航天器自控系统提供的姿态信息, 星敏感器对恒星进行捕获跟踪, 根据恒星惯性坐标的位置信息对下行光束方向进行校正, 从而实现快速的无信标捕获。NASA 的 O2O 项目的 FLT 采用了星敏感器方案, 如本文 3.3 节中 MIT 林肯实验室研制的可扩展激光终端。

从链路分析可知, 要保证链路预算中 2 dB 的视轴误差损耗, 在 50 mm 天线直径下, 跟瞄误差需小于 $2 \mu\text{rad}$ (RMS), 可见深空通信对跟瞄精度指标要求非常高。跟瞄误差主要由对准误差和跟踪误差组成。假定在视轴静态误差已校准的情况下, 跟瞄误差主要由超前对准偏差、跟踪探测器噪声和跟踪系统残差组成。跟踪系统的残差主要由精跟踪控制系统对机械噪声和卫星平台振动的抑制能力决定。随着电子学和精密机械的发展, 当前探测器噪声和机械噪声带来的误差已能控制在较小范围内, 如何抑制卫星平台的振动成为跟踪环设计首要考虑的因素。深空环境下卫星振动功率谱密度未知, 但从当前一些卫星实测数据来看, 卫星部件运动的谐振谱能到 200 Hz 以上^[24]。FLT 振动抑制通常采用的方案是被动隔离和主动抑制相结合, 如图 4 所示的 NASA 的 DSOC FLT 系统, 将光子子系统放置在振动隔离支架上消除高频振动, 中低频的振动通过跟踪环进行抑制, 从而达到最终跟踪精度要求。

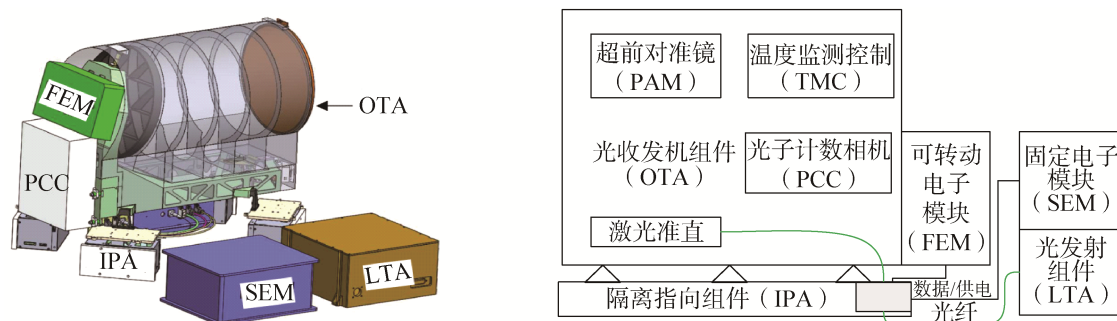


图 4 DSOC FLT 系统组成及功能框图

Fig. 4 The block diagram of DSOC FLT system composition and functional

另外,为达到减少光路损失、简化系统的目的,将单光子探测器拼接为焦平面阵列,使 ATP 探测器和通信探测器合一的技术在 FLT 和 OGS 上已开始进行研究^[25]。

2.3 通信子系统

通信子系统关键技术主要包括激光发射技术、探测接收技术和调制/编码技术。

2.3.1 激光发射技术

高峰值功率、高调制带宽的激光源是实现超远距离通信的重要保障。因此,激光发射技术主要考虑如何提高激光发射功率、转换效率,以及保证大峰均比调制下的光束质量。当前深空光通信发射机主要采用主振荡功率放大器 MOPA (Master Oscillator Power-Amplifier) 技术。MOPA 在转换效率、线宽、波长调谐范围、光束质量和脉冲持续方面具有优势。NASA 的 DSOC 激光发射采用的是 MOPA 技术,如图 5 所示^[26]。其种子光源采用分布式反馈 DFB (Distributed Feed Back) 激光器,放大采用两级保偏放大,第一级采用掺铒光纤放大器 EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier),二级采用铒镱共掺光纤放大器 EYDFA (Erbium-Ytterbium-Doped Fiber Amplifier)。输出波长 1 550 nm,平均功率 ≥ 4.5 W,脉宽 0.5 ns~8 ns,PPM 阶数 16~128,消光比 >13 dB,光束质量 $M^2 < 1.2$ 。

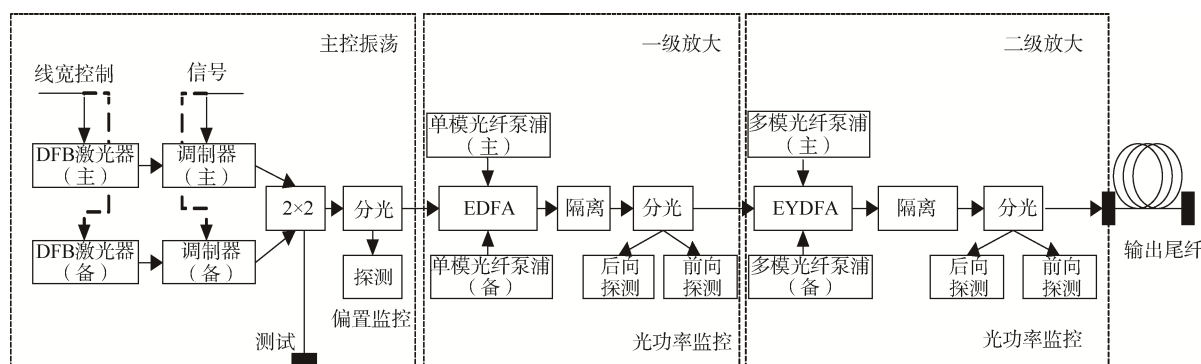


图 5 DSOC 激光组件示意图

Fig. 5 The functional diagram of DSOC laser assembly

2.3.2 探测接收技术

深空光通信距离远,受大气段和宇宙段的信道影响大,难以恢复载波的相位/频率信息,且相干接收机的灵敏度低于单光子探测,因此,目前探测体制都采用单光子直探方式。在光通信频段上主流的单光子探测器主要分三类:雪崩效应器件、频率转换器件和低温超导器件。其中雪崩效应器件和低温超导器件已经应用于深空通信系统中,频率转换器是利用非线性光学晶体将红外光转换为可见光,再通过光硅单光子探测器进行探测,以提高探测效率,也是目前单光子探测器的研究方向之一^[27]。

FLT 的探测器通常采用盖革模式的雪崩光电二极管 GM-APD (Geiger Mode-Avalanche Photo Diode)。近年来迅速发展的碲镉汞光电探测器 (HgCdTe-APD) 也逐渐开始应用于深空光通信中,ESA 正在研发 GHz 探测速率的 HgCdTe-APD,准备应用于 DOCS 深空任务中^[28]。

由于下行信号光非常微弱,OGS 需采用更高灵敏度的探测器。NASA 的 LLCD 项目中使用了超导纳米线单光子探测器 SNSPDs (Super-conducting Nanowire Single-Photon Detectors),它代表了当前灵敏度(优于 1 光子/比特)和探测效率(93%)的最高性能。提高 SNSPDs 临界温度和制冷小型化的研究也正在开展,有望未来运用于 FLT^[29]中。

无论是 GM-APD 还是 SNSPDs,探测器的响应恢复时间都会影响探测速度。为了提升单光子探测器计数率和光子数分辨率,近年来也开展了采用光纤分束耦合多通道 SNSPDs^[30]和 GM-APD^[31]的探测技术的理论分析和实验室测试。

为提高集成度和小型化,光通信接收机多采用光纤耦合方式,即将空间光通过光纤耦合至探测器。近年来研究表明,采用多个模式的光纤接收空间光信号,可获得模式分集增益,减少大气湍流影响的同时提高耦合效率,其中采用少模光纤 FMF (Few-Mode Fibers) 的耦合效率要高于多个单模光纤^[32]。综

上所述, 一种结合模式分集和多通道单光子探测器的接收机方案如图 6 所示, 空间光通过光子灯笼耦合后经过少模光纤, 最后由多通道单光子探测器进行探测接收处理。此方案有待后续进一步研究和验证。

2.3.3 调制/编码技术

深空光通信接收到的光子数量少, 受到的信道干扰强, 在选择调制方式时, 主要考虑光子利用效率和抗干扰能力。脉冲位置调制 PPM (Pulse-Position Modulation) 具有很高的光子利用率和抗干扰能力, 目前是深空光通信主要调制方式。此外, 为了增加通信速率, 也有将波分复用 (WDM) 技术^[33]和轨道角动量调制技术^[34]应用于深空的研究。

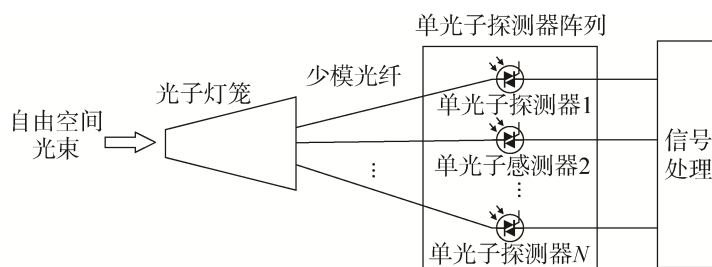


图 6 模式分集的多通道单光子接收机

Fig. 6 Multichannel single photon receiver with mode diversity

深空光通信信道误码率高, 传输链路易中断, 因此需要纠错能力强的编码和交织。RS 码、Turbo 码和低密度奇偶校验码 LDPC (Low Density Parity Check Code) 都可作为深空光通信的候选码, 并且这些编码都可以和 PPM 调制进行级联。其中, 串行级联脉冲位置调制 SCPPM (Serially Concatenated Pulse-Position Modulation) 码是 NASA 在 MLCD 项目中提出的用于深空激光通信的编译码方式, 它是将卷积码和 PPM 调制融合的级联码, 继承卷积码易于实现且译码简单的特点, 同时将调制加入到编码过程中, 提高了系统能量的利用率, 也增加了可靠性, 这已经成为 CCSDS 调制编码的标准化方案^[35]。在 NASA 的 DSOC 和 ESA 的 DCOS 任务中都采用 SCPPM, 当前也有将卢比变换 LT (Luby Transform) 码、Raptor 码等喷泉码应用于空间光通信的研究报告^[36]。

3 未来发展趋势

3.1 深空光通信技术发展

2016 年, NASA 对未来 50 年深空通信发展趋势进行了展望^[37], 如表 3 所示。预计 2025 年光通信技术真正开始应用于深空探测任务中, 并逐渐开始占据主导地位。之后通信速率按每 10 年提高 10 倍的速度演进, 主要技术途径包括密集光波复用 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) 技术、大功率激光发射技术、相干通信技术、光子集成技术、天线技术。2045 年后运用的技术当前还无法预测, 可能的途径是在提升发射机效率、同时解决卫星能源的基础上, 采用大口径天线阵列和高阶调制技术来提升通信速率。此外, 量子纠缠和 X 射线通信也是深空通信的发展方向。

表 3 深空通信发展展望

Table 3 Prospects for the development of deep space communication

距离 (AU)		2 025(Mbps)	2 035(Mbps)	2 045(Mbps)	2 055 (Mbps)	2 065 (Mbps)
OGS		3×34 m Ka-band	Optical	Optical	Optical	TBD(To Be Defined)
FLT		天线直径: 3 m 发射功率: 180 W 编码: 1/2 LDPC	天线直径: 0.3 m 发射功率: 10 W 调制: PPM	天线直径: 0.5 m 发射功率: 50 W 调制: PPM	天线直径: 0.5 m 发射功率: 200 W 调制: 第二代	TBD
金星 (近点)	0.3	2 304	2 800	2.9×10^4	2.9×10^5	2.9×10^6
金星 (远点)	2.4	36	44	460	$4 603$	5×10^4
火星 (近点)	0.6	576	700	7×10^3	7×10^4	7×10^5
火星 (远点)	2.6	30.7	37	392	4 000	4×10^4
木星	5.4	7.1	8.6	91	909	9 093
土星	10.1	2.0	2.5	26	260	2 599
天王星	19	0.57	0.7	7.3	73.4	734
海王星	30.3	0.23	0.27	2.9	28.9	289

3.2 深空通信组网发展

当前演示验证的深空光通信均采用星-地“一跳”的方式。这种方式的优点是 OGS 扩展性好,易于维护升级,不足之处是受大气影响,可用度较低,必须通过全球多点部署 OGS 来提升可用度。NASA 的 LLCSD 采用了月地直接信息传输链路,利用环月卫星激光终端直接与地面激光站进行高速通信,且后续探空任务会沿用这种模式^[38]。另外一种方式是采用星-数据中继卫星-地这种“多跳”方式,即星-数据中继卫星间采用光通信,中继卫星-地可采用微波或光通信,如图 7 所示。这种方式可提高可用度,但会增加成本,单点故障也会降低可靠性,可通过多星组网的方式提升可靠性。文献[39]分析了月地距离以单路 8K 视频(2.5 Gbps)速率,在 BPSK 调制方式下,比较上述两种组网方式的可行性和性价比。认为当前技术水平下,一跳方式性价比优于两跳,但两跳方式的可通过率要优于一跳方式,建议 2030 年前仍以一跳方式进行部署,靠 OGS 地理上的多点部署来保证可通过率,2030 年后随着实时视频需求增加逐渐采用二跳方式。

中国科学院国家空间科学中心也在进行通用行星际通信网络 UNICON (Universal Interplanetary Communication Network)^[40]的规划研究,建议在地球和火星之间的日心轨道上部署 6 颗卫星,同步轨道上部署 3 颗卫星,组成激光中继通信与导航星座,深空探测器将数据传送至 UNICON 日心星座,然后通过地球同步轨道星座发送至地面站,可为金星到小行星带,乃至木星轨道范围内的各类深空飞行器提供测控通信导航服务,拓扑如图 8 所示。

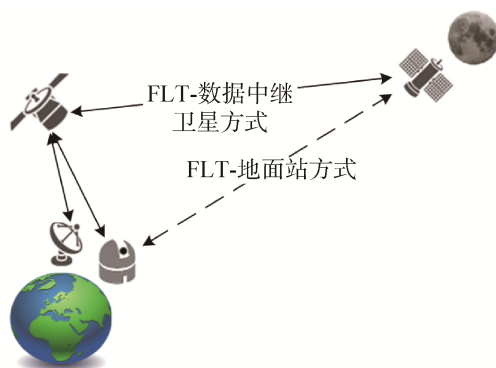


图 7 DSN 组网示意图

Fig. 7 Diagram of deep space network

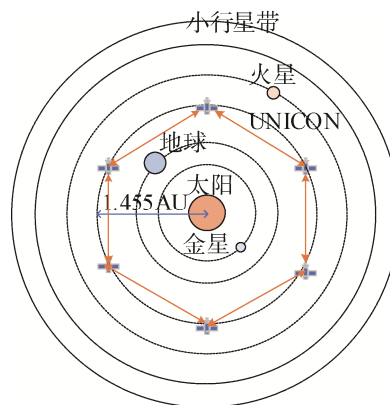


图 8 UNICON 组网示意图

Fig. 8 Diagram of UNICON network

文献[41]建议我国天基深空光通信系统的构建应与第三代或第四代地球轨道数据中继卫星相结合,布设在太平洋上空的同步静止轨道上,系统配置采用 1 m~2 m 孔径的光学系统对准深空通信目标,至少应具备支持月球和火星任务光通信的能力。来自深空的数据经过太平洋上空的中继卫星间光学链路就可以传送到定点在我国大陆上空的中继卫星,再转换为 Ka 频段链路传送到地面。未来还可以结合载人月球和火星探测任务的需求,逐步补充具备支持深空光通信能力的中继卫星数量,最终建成可实现连续覆盖的天基深空光通信系统。

3.3 标准化及生态发展

全球许多空间机构都在积极开展空间光通信基础建设,对于 LOP-G, Moon Village 这样大型的项目,需要不同机构协作,以降低任务成本和风险。同射频系统一样,只有形成统一的标准才能使得各个设备进行互联互通。空间光通信标准化组织主要有空间数据系统咨询委员会 CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) 和跨机构操作咨询组织 IOAG (Interagency Operation Advisory Group), CCSDS 发布的蓝皮书已将深空星-地光通信纳入高光子效率 HPE (High Photon Efficiency) 应用场景,并规定了物理层、编码与同步标准建议,最近也将 LOP-G 项目中的用例,包括 LOP-G 对地、LOP-G 对月球表面、LOP-G 对月球轨道卫星、LOP-G 对载人飞船间的光通信纳入到 HPE 应用场景中。同时,CCSDS 也开展大气特征的标准研究,以准确预测大气影响而进行链路切换,保证可通过率。NASA、ESA 等组织非常重

视标准化建设, 将空间光通信技术发展、飞行任务和标准化建设相结合, 并将标准化作为产品组成的一部分。从图 9 可以看出, NASA 新增的每一个任务场景都纳入到标准建议中, 任务和标准化紧密结合。

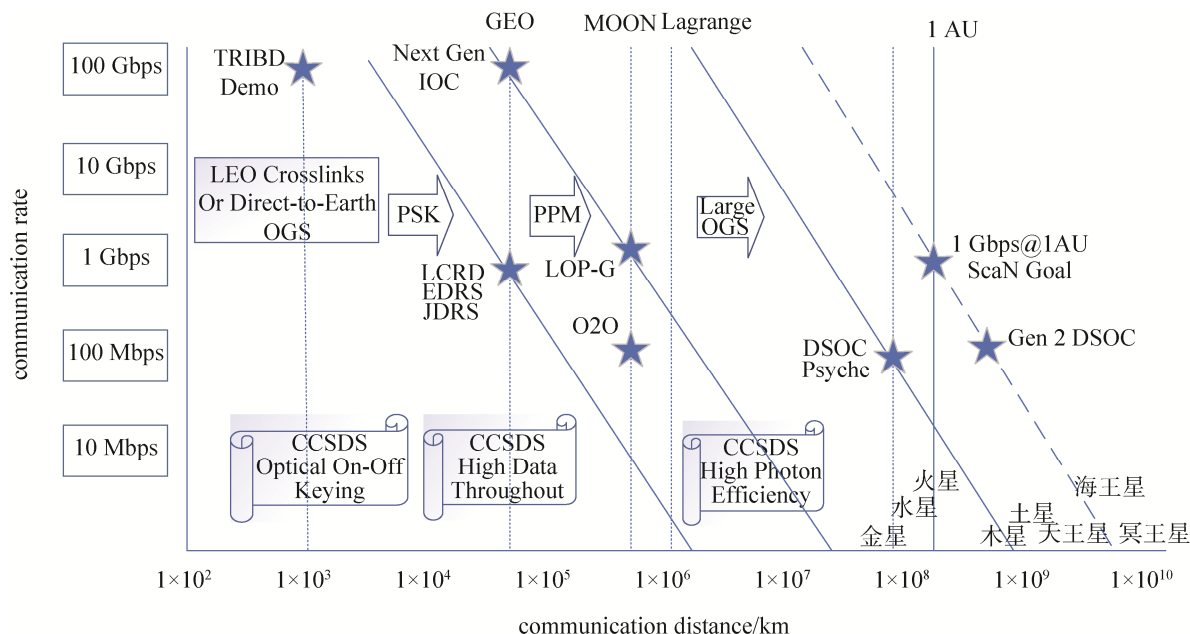
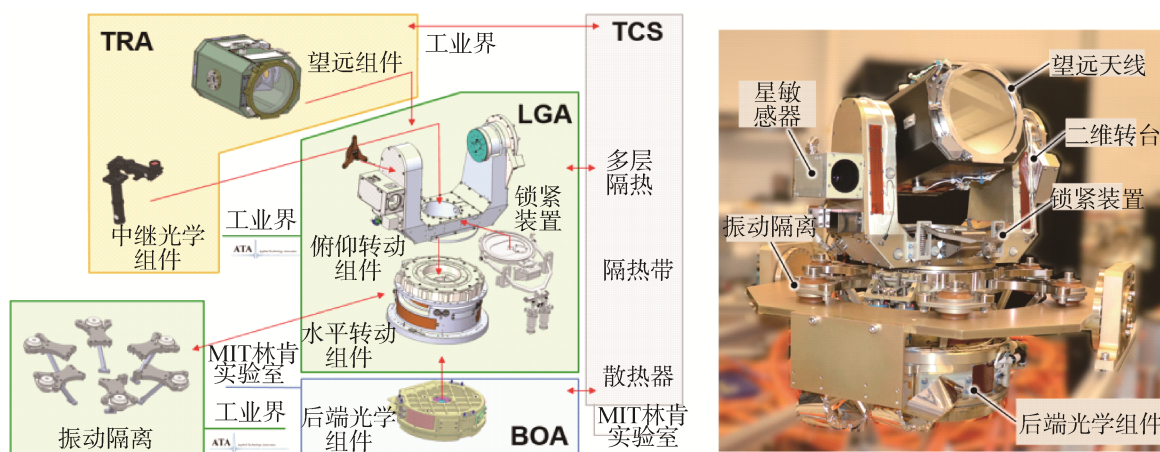


图 9 NASA 深空光通信项目及协议标准发展

Fig. 9 NASA's deep space optical communication and protocol development

深空光通信工程难度大、周期长、产业化较难形成。尽管在结构、热和光学设计上深空光端机相对于近地光通信端机有较大不同, 但可以通过模块化设计尽可能做到重用, 以降低深空通信设备的成本和工程难度, 同时尽可能吸纳更多的企业参与。图 10 所示为 MIT 林肯实验室研制的模块化、灵活、可扩展激光终端 MAScOT (Modular, Agile, Scalable Optical Terminal) [42], 采用模块化设计, 部分模块由工业界商业公司提供, 通过较小的扩展, 可应用于 NASA 的激光通信中继演示 LCRD (Laser Communications Relay Demonstration) 项目 LEO-空间站通信, 以及 O2O 项目月地通信中。



注: TRA-天线和中继光学系统, LGA-锁紧和二维转台, TCS-热控系统, BOA-后端光学系统

图 10 MAScOT 光端机模块组成

Fig. 10 Subassemblies of the MAScOT

4 对我国深空光通信发展的建议

4.1 在深空化、高速化、小型化上开展重点研究

建议深空光通信从深空化、高速化和小型化开展重点研究。深空化包括大功率发射技术、大口径或

阵列天线收发技术、超高灵敏度探测技术、自适应光学技术、无信标快速捕获技术；高速化包括适应深空场景的高阶调制技术、多参量复用技术和高效编解码技术；小型化包括光子集成技术、光电集成技术以及系统功能设计优化。深空光通信要充分借鉴地面光纤通信和近地通信技术，结合深空信道环境，促进关键理论和应用技术上的突破。

4.2 优先构建深空-数据中继卫星-LEO 卫星的光通信网络

深空通信具有时延大、网络拓扑变化快速、链路断续和误码率高的特点，当前点对点通信方式难以保证数据可靠传输，构建星际通信网络是未来发展的必然趋势。此外，我国没有地缘优势，全球全天候覆盖的 OGS 站址难以获取。建议优先构建深空-数据中继卫星-LEO 卫星的光通信网络，依托迅速发展的近地卫星通信网，解决数据回传最后一跳受大气影响的问题，使深空探测链路均衡，保证可靠性和可通率。

4.3 重视标准化及产业化生态

建议持续跟踪 CCSDS 在空间光通信方面的工作进展，及时掌握国际上空间激光通信主流技术体制及其标准的发展动向，有利于我国对后续深空光通信技术发展方向的把握和技术状态的更新。把创新技术纳入到标准体系中，提升我国在该领域的竞争力。在协议标准化的同时，也重视通信端机的标准化和系列化。系统设计时应充分运用模块化和可扩展的设计方法，依托近地星间光通信产业化生态，吸纳更多的企业参与，加速深空光通信工程化进程。

4.4 开展地月激光通信验证

我国计划在探月四期开展月地激光通信技术验证^[43]。当前，各研究单位已对近地光通信链路进行了关键技术的演示验证，取得了一系列成果，但未进行深空环境下的在轨验证。深空光通信在轨验证要求高，地面演示系统又难以满足真实的深空环境要求。针对月地光通信链路的验证，建议可借鉴 NASA 的 Lunar Testbed 的演示验证方案^[44]，即通过阿波罗号登月时留下的角锥反射器阵列进行月地往返通信测试，可真实模拟月地间相对运动、大气和自由空间信道、AU 级能量衰减，对激光通信设备、新研究的关键技术进行地面验证，降低验证难度，提高技术成熟度。

5 结束语

综合当前深空光通信发展现状，美国和欧洲在深空光通信领域研究较早，技术研究覆盖全面，且已开展了实质性的在轨验证并取得了关键技术上的突破。国内深空光通信处于起步阶段，缺少系统性的研究和工程实践。我国已经启动月球探测和行星探测工程，未来也将规划启动距离更远的小行星探测、主带彗星探测、火星采样返回和木星系探测等任务。为了保障这些远距离探测任务的顺利完成，构建起与之匹配的深空通信能力意义重大。为保证未来我国行星际探测顺利实施，亟待大力发展深空光通信技术，在相关基础理论、系统工程技术和演进路线上展开深入研究，并带动相关信息技术、航天技术和工程技术的进一步发展。

参考文献

- [1] Radio frequency and modulation systems—part 1 earth stations and spacecraft: Recommended standard CCSDS 401.0-B-32[S]. Consultative committee for space data systems (CCSDS), 2021. <https://public.ccsds.org/Pubs/401x0b32.pdf>
- [2] 中国的航天-《中国的航天》白皮书摘登[J]. 航天标准化, 2001(1): 1-3.
- [3] 中华人民共和国国务院办公厅. 2021 中国的航天白皮书[R/OL]. (2022-01-28) http://www.gov.cn/zhengce/2022-01/28/content_5670920.htm.
- [4] CORNWELL D. Laser communication from the moon at 622 Mb/s[EB/OL]. (2014-04-15) [2020-03-31]. <http://spie.org/news/5368-laser-communication-from-the-moon-at-622mb/s?SSO=1>.
- [5] HEMMATI H, BISWAS A, DJORDJEVIC Ivan B, et al. Deep-space optical communications: future perspectives and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 2020-2039.
- [6] BOROSON D M, ROBINSON B S, MURPHY D V, et al. Overview and results of the lunar laser communication

- demonstration[C]// Proc. SPIE, 2014, 8971: 89710S.
- [7] BISWAS A, SRINIVASAN M, PIAZZOLLA S, et al. Deep space optical communications[C]// Proc. SPIE, 2018, 10524: 105240U.
- [8] ROBINSON B S, SHIH T, KHATRI F I, et al. Laser communications for human space exploration in cislunar space: ILLUMA-T and O2O[C]// Proc. SPIE, 2018, 10524: 10524S.
- [9] GARGIONI G, ALEXANDRE D, PETERSON M, et al. Multiple asteroid retrieval mission from lunar orbital platform-gateway using reusable space crafts[C]// IEEE Aerospace Conference, 2019.
- [10] EDWARDS B L. NASA's optical communications programs[EB/OL]. (2019-05-21) [2022-03-31]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20190025298/downloads/20190025298.pdf>.
- [11] ARNOLD F, MOSBERGER M, WIDMER J, et al. Ground receiver unit for optical communication between LADEE spacecraft and ESA ground station[C]// Proc. SPIE, 2014, 8971: 89710M.
- [12] 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), 2015.
- [13] SODNIK Z, HEESE C, ARAPOGLOU P D, et al. Deep-space optical communication system(DOCS) for ESA's space weather mission to Lagrange Orbit L5[C]// 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2017.
- [14] DROUET M M, NADER J, NADER R, et al. Internet for the moon: Possible communication architectures for connecting the moon village to the internet[C]// 69th International Astronautical Congress(IAC), 2018.
- [15] DADDATO R J, SCHULZ K J, ZAYER I, et al. Deep space science downlinks via optical communication[C]// 2011 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2011.
- [16] NEGAR F P, KÄRCHER H J, SURE T. Design and concepts for a 12 m optical communication antenna[C]// 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2017.
- [17] THOMAS R W. Discovery deep space optical communications (DSOC) transceiver[C]// Proc. SPIE, 2017, 10096: 100960V.
- [18] MURPHY D V, KANSKY J E, GREIN M E, et al. LLCD operations using the lunar lasercom ground terminal[C]// Proc. SPIE, 2014, 8971: 89710V.
- [19] FISCHER E, FERIENCIK M, KUDIELKA K, et al. ESA optical ground station upgrade with adaptive optics for high data rate satellite-to-ground links-test result[C]// 2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2019.
- [20] MOHAGEG M, LORIO M C, HOPPE D J, et al. Minimizing effect of sun-earth-probe angle for RF/optical hybrid telescope[C]// Proc. SPIE, 2020, 11272: 11272K.
- [21] MIRANDA F A, TEDDER S A, VYHNALEK B E, et al. An overview of key optical communications technologies under development at the NASA Glenn Research Center[C]// Proc. SPIE, 2021, 11692: 116920X.
- [22] ORTIZ G G, LEE S. Acquisition, tracking, and pointing using earth thermal images for deep space optical communications[C]. IEEE the 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2003.
- [23] ARETSKIN-HARITON E D, SWANK A J, GRAY J. Beaconless optical communication system constraints[EB/OL]. (2019-08-14) [2020-03-31]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20190002792>.
- [24] HAYDEN W L, MCCULLOUGH T, RETH A, et al. Wide-band precision two-axis beam steerer tracking servo design and test results[C]// Proc. SPIE, 1993, 1866: 271–279.
- [25] SRINIVASAN M, ANDREWS K S, et al. Photon counting detector array algorithms for deep space optical communications[C]// Proc. SPIE, 2016, 9739: 97390X.
- [26] DINU M, AHRENS R, SOCHOR T, et al. Qualification and performance of a high efficiency laser transmitter for deep-space optical communications[C]// Proc. SPIE, 2022, 11993: 119930G.
- [27] 白鹏, 张月衡, 沈文忠. 半导体上转换单光子探测技术研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(22): 37–53.
BAI Peng, ZHANG Yueheng, SHEN Wenzhong. Research progress of semiconductor up-conversion single photon detection technology[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(22): 37–53.
- [28] PES S, ROTHMAN J, BLEUET P, et al. Reaching GHz single photon detection rates with HgCdTe avalanche photodiodes detectors[C]// Proc. SPIE, 2020, 11852: 118525S.

- [29] ZHANG T, DANG H Z, ZHA R, et al. Investigation of a 1.6 K space cryocooler for cooling the superconducting nanowire single photon detectors[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(5): 500105.
- [30] VYHNALEK B E, DOWNEY J N, TEDDER S A. Single-photon counting detector scalability for high photon efficiency optical communications links[C]// Proc. SPIE, 2020, 11272: 112721A.
- [31] WEN G, HUANG J, ZHANG L, et al. A high-speed and high-sensitivity photon-counting communication system based on multichannel SPAD detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(2):7900310.
- [32] TEDDER S A, VYHNALEK B E, SAVAL S L, et al. Single-mode fiber and few-mode fiber photonic lanterns performance evaluated for use in a scalable real-time photon counting ground receiver[C]// Proc. SPIE, 2019, 10910: 10910G.
- [33] ENGIN D, LITVINOVITCH S, GILMAN C, et al. 50 W, 1.5 μm , 8 WDM (25 nm) channels PPM downlink Tx for deep space lasercom[C]// Proc. SPIE, 2021, 11678: 116780K.
- [34] DJORDJEVIC I B. Deep-space and near-earth optical communications by coded orbit angular momentum(OAM) modulation[J]. Optics Express, 2011, 19(15): 14277–14289.
- [35] EDWARDS B L, DADDATO R, SCHLZ K J, et al. An update on the CCSDS optical communications working group interoperability standards[C]// 2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), 2019.
- [36] KAUSHAL H, KADDOUM G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57–96.
- [37] DEUTSCH L J, TOWNES S A. Deep space network: The next 50 years[EB/OL]. (2016-05-16) [2022-03-31]. <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2016-2373>.
- [38] 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.
LI Lianghai, LIU Xiangnan, LI Xiaoliang. Progress and application research of deep space laser communication[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(6): 523–529.
- [39] ARAKI T. A trade-off study of lunar-earth optical communication links[C]// Proc. SPIE, 2021, 11852: 118521X.
- [40] 中国科学院国家空间科学中心. 一种天基深空中继卫星组网系统: 108494472 A[P]. (2018-09-28) [2022-03-31].
- [41] 李海涛. 中国深空测控网光通信技术途径分析与发展展望[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 20–32.
LI Haitao. Technical approach analysis and development prospects of optical communication technology in China deep space TT&C network(Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(5): 20–32.
- [42] GILLMER S R, SMEATON C V, BURNSIDE J W, et al. Demonstration of a modular, scalable, laser communication terminal for human spaceflight missions[C]// Proc. SPIE, 2021, 11816: 11816E.
- [43] 吴伟仁, 李海涛, 李赞, 等. 中国深空测控网现状与展望[J]. 中国科学(信息科学), 2020, 50(1): 87–108.
WU Weiren, LI Haitao, LI Zan, et al. Status and prospect of China's deep space TT&C network[J]. Science in China (Information Sciences), 2020, 50(1): 87–108.
- [44] VILNROTTER V A, THILL M D, HOPPE D J. Lunar testbed for demonstrating deep-space optical communications, ranging and secret key distribution[EB/OL]. (2021-08-15) [2022-03-31]. https://ipnpr.jpl.nasa.gov/progress_report/42-226/42-226B.pdf.

[作者简介]

罗 彤 1971 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为星间激光通信。

王伟志 1985 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无线通信。

薛佳音 1985 年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为空间探测、信息传输、信号处理等。

丁润伟 1983 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为信息传输与处理、机器学习等。

张钦宇 1972 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为空天信息网络、深空通信等。

(本文编辑: 傅 杰)