

ZHAO Yun, WANG Han, DONG Binbin, HAO Junbo, ZHANG Zizhuo, CHEN Shihan, YANG Chenglong, GAO Qixiang, ZHONG Xing, CHEN Maosheng. Research Progress and Fronts in Satellite-to-ground Laser Communication (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(2): 612–628. CSTR:32142.14.cjss.2024-0148. DOI:10.11728/cjss2025.02.2024-0148

星地激光通信研究现状与前沿技术

赵 云 王 汉 董滨滨 郝俊博
张子卓 陈诗涵 杨成龙 高启翔
钟 兴 陈茂胜

(长光卫星技术股份有限公司 长春 130033)

摘 要 激光通信技术突破了传统微波通信的带宽限制, 成为实现高速率、大容量星地通信的重要手段, 特别适用于海量空间科学数据的传输。星地激光通信技术在空间科学中具有广泛的应用前景, 是实现空间科学数据高效、快速传输的关键技术之一。本文系统梳理了国内外星地激光通信的系统组成及实验成果, 详细介绍了实现稳定可靠通信的关键技术, 例如捕获跟踪瞄准、星上激光器技术等。针对大气湍流对激光信道的影响, 分析了自适应光学等有效的抑制方法, 并汇总了基于新型结构光场的激光通信技术发展现状。结合空间科学对数据传输的需求, 对星地激光通信的研究现状进行了总结, 并展望了未来的发展方向, 强调了其在空间科学和深空探测中的重要应用潜力。

关键词 星地激光通信, 捕获跟踪瞄准, 星上激光器, 大气湍流, 自适应光学, 新型结构光场

中图分类号 V11

Research Progress and Fronts in Satellite-to-ground Laser Communication

ZHAO Yun WANG Han DONG Binbin HAO Junbo ZHANG Zizhuo
CHEN Shihan YANG Chenglong GAO Qixiang
ZHONG Xing CHEN Maosheng

(Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130033)

Abstract With the increasing amount of data generated by scientific research such as remote sensing satellite imaging and deep space exploration, conventional microwave communications are unable to meet the current transmission needs of high-speed and large-capacity satellite-to-ground communications due to limitations in bandwidth and related technologies. Laser communication technology breaks through the bandwidth limitations and becomes an important means of satellite-to-ground communications, especially suitable for the transmission of massive space science data. The system composition and

2024-10-31 收到原稿, 2024-12-26 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

experimental results of satellite-to-ground laser communications at home and abroad systematically are sorted out, including communication wavelength, communication rate, modulation method, wavefront correction technology. The key technologies for achieving stable and reliable communications, such as precise pointing, rapid acquisition, high-precision tracking, and onboard laser technology are introduced in detail. Given the impact of atmospheric turbulence on laser channels, effective suppression methods such as adaptive optics are analyzed. The development status of laser communication technology based on new structured light fields including vortex beam, vector beam, and optical pin beam is summarized. Finally, combined with the demand of space science for data transmission, the research progress of satellite-to-ground laser communications is summarized and future development direction is prospected, emphasizing its important application potential in space science and deep space exploration.

Key words Satellite-to-ground laser communications, Acquisition, tracking and pointing, On-board laser, Atmospheric turbulence, Adaptive optics, New structured light field

0 引言

星地通信技术已经成为构建立体化信息网络的重要一环,随着人类空间活动的不断扩展,遥感卫星成像、深空探测等空间科学领域对高光谱、高分辨率等数据的需求日益增加,空间科学研究中产生的数据量不断增长,这对星地通信的传输速率和容量提出了更高的要求.传统的微波通信由于存在带宽和相关技术的限制,难以满足当前高速率大容量星地通信的传输需求.激光通信是公认的最佳解决方案,其采用光波作为信息载体,频率比微波高几个数量级,具有更高的通信速率和容量.此外,激光的发散角更小,方向性更好,抗干扰能力更强,激光通信的安全性和保密性更高.同时,激光通信还具有通信终端体积小、质量轻、功率低等优点,已经在美国、欧洲等多个国家和地区开展了大量研究.中国虽然起步较晚,但发展迅速,相继完成了海洋二号、墨子号、吉林一号等项目的技术验证,展示了中国在星地激光通信中的技术实力和地位.

星地激光通信的通信质量取决于多个因素,包括捕获跟踪瞄准技术、星上激光器技术、光纤耦合技术等.此外,大气湍流造成的光束漂移、闪烁、波前相位畸变等也会影响信号接收功率的强度和稳定性、降低光纤耦合效率,进而增大通信误码率,严重损害通信性能.为了进一步提高通信容量和质量,基于涡旋光束、矢量光束等新型结构光场的激光通信技术也得到了广泛的研究.

随着空间科学研究的数据量不断增加,尤其是在深空探测和遥感卫星成像等领域,星地激光通信将发

挥更加重要的作用.本文对当前国内外星地激光通信技术的发展现状进行了梳理,对捕获跟踪瞄准技术、星上激光器技术等关键技术,以及大气湍流对激光通信的影响及其抑制手段进行了分析,对基于新型结构光场的激光通信技术进行了介绍,探讨了其在空间科学和深空通信中的应用前景,强调了激光通信在满足高速率、大容量数据传输方面的独特优势.

1 星地激光通信技术发展现状

从 20 世纪 70 年代起,美国、欧洲等国家和地区就已经开始了对星地激光通信相关技术的理论研究^[1-3].经过多年的技术积累以及激光器等核心器件的飞速发展,各国相继开展星地激光通信在轨验证,逐步迈向规模化建设和实用阶段.

1.1 美国

1.1.1 星地激光通信演示计划

1995 年日本通信研究实验室邀请美国宇航局喷气推进实验室 (NASA Jet Propulsion Laboratory, JPL) 共同开展星地激光通信演示计划 (Ground/Orbiter Lasercomm Demonstration, GOLD),以评估在不同大气条件下的单/双向激光通信的可行性^[4].如图 1 所示,该系统发射的 ETS-VI 卫星与 JPL 的桌山设施之间建立了一条双向通信链路.该实验采用了多光束传输的方法来减轻大气闪烁对上行光束的影响,实现了脉冲位置调制 (Pulse Position Modulation, PPM) 下的双向 $1.024 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的通信速率.这是世界上首次实现的星地双向激光通信链路,开启了激光通信技术的实用化进程.

1.1.2 激光通信光学载荷演示计划

2014 年 NASA JPL 启动了激光通信光学载荷 (Optical Payload for Lasercomm Science, OPALS) 技术演示项目, 其系统任务架构如图 2 所示. OPALS 项目中激光器以 2.5 W 的功率发射波长为 1550 nm、发散角为 1.08 mrad 的下行链路信号, 由地面站 1 m 口径的望远镜收集, 在开关键控 (On-Off Keying, OOK) 的调制方式下实现了 $50 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的通信速率, 误码率低于 10^{-4} , 成功将一段高清视频从国际空间站下行传输到地面^[5].

为了抑制大气湍流的影响, JPL 引入了自适应光学 (Adaptive Optics, AO) 系统对相位畸变进行补

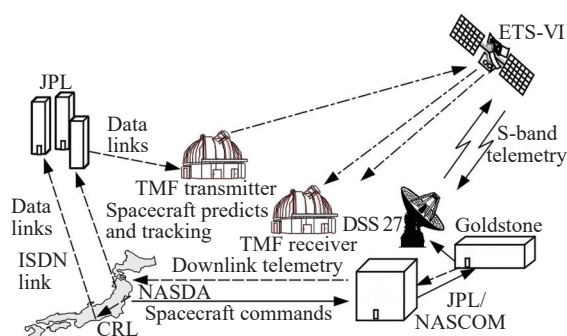


图 1 GOLD 计划系统组成

Fig. 1 Conceptual drawing of GOLD

偿^[6], 校正后的闭环系统斯特列尔比从 0.02 提升到 0.6, 光纤耦合功率提升 16 dB. 这是美国首次通过 AO 校正将下行链路信号耦合进单模光纤, 为利用低轨卫星进行高速率、高稳定性的光通信以及与地面光纤网络的无缝连接铺平了道路.

1.1.3 激光通信中继演示计划

2021 年 NASA 的激光通信中继演示 (Laser Communications Relay Demonstration, LCRD) 项目正式启动, 旨在为近地轨道卫星和地球之间提供双向光通信中继服务^[7-12]. 为了提高单模光纤的耦合效率, 光学地面站都采用了 AO 系统来动态补偿波前像差. 如图 3 所示, 集成光学系统包含对下行链路的自适应校正子系统, 其结构包含快速转向镜、分束器、夏克-哈特曼波前传感器 (Shack-Hartmann Wave-Front Sensor, SH-WFS), 以及用于校正波前像差的 12×12 单元、行程 $3.5 \mu\text{m}$ 的低阶变形镜和 32×32 单元、行程 $1.5 \mu\text{m}$ 的高阶变形镜. 在平均大气相干长度为 4 cm 的夜间实验中, AO 子系统的光纤耦合效率达到了 35%, 建立了长达 35 min 的双向数据中继链路, 以 $360 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的传输速率无差错中继传输超过 300 Gbit 的数据^[12].

LCRD 演示计划为激光通信技术搭建了良好的技术测试平台, 未来这项演示计划还将继续执行多项技术测试实验, 例如高速率延迟容忍网络技术测试

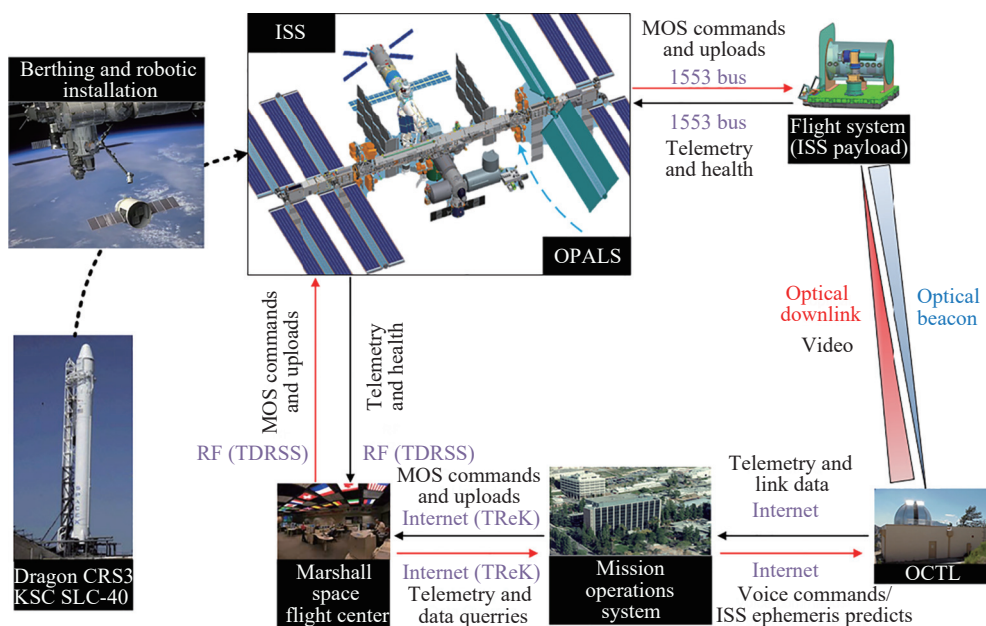


图 2 OPALS 系统任务架构

Fig. 2 OPALS system architecture

(克服延迟、中断或数据丢失等问题), 加速激光通信技术的发展。

1.1.4 太字节红外传输计划

2022 年 NASA 与麻省理工林肯实验室合作开展太字节红外传输计划 (Terabyte Infrared Delivery, TBIRD), 旨在实现从近地轨道卫星直接向地面传输海量数据^[13-19]。TBIRD 的系统架构如图 4 所示。空间终端托管在近地轨道卫星 6 U CubeSat 上, 重量不到 3 kg^[14]。空间终端有两个 100 Gbit·s⁻¹ 的光纤相干收发器, 输出两个 1550 nm 左右不同波长的单模光纤信号, 用于下行链路传输^[14-18]。

自项目启动以来, TBIRD 累计执行了 43 次通信任务, 实现了以 100/200 Gbit·s⁻¹ 的下行速率传输大于 1 TB 的数据, 甚至实现了 4.8 TB 数据端到端无错误传输^[19]。TBIRD 利用纸巾盒大小的有效载荷实现了 200 Gbit·s⁻¹ 的数据传输, 是有史以来最高的光

通信下行传输速率, 充分显示了近地轨道星地激光通信的巨大潜力, 为高速率、小体积激光通信终端树立了标杆。

1.2 欧洲

1.2.1 微型卫星通信

2010 年 RUAG Sapce 公司在欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 的支持下研制了 OPTEL- μ 通信系统, 包括一个微型空间终端和一个地面终端, 以实现近地轨道卫星与地面间的直接通信^[20]。OPTEL- μ 系统下行链路为 1550 nm, 采用 OOK 调制; 上行链路为 1064 nm 的信标光, 采用 PPM 调制和自动重发请求协议。OPTEL- μ 激光通信终端的质量为 8 kg, 功耗为 45 W, 实现了 2.5 Gbit·s⁻¹ 的下行通信速率^[21]。

1.2.2 欧洲数据中继系统

为建立欧洲独立通信网络, 2015 年起 TESAT 公司建造可移动自适应光学地面站 (Transportable Adaptive Optical Ground Station, TAOGS) 进行通信测试, 实现了 1.8 Gbit·s⁻¹ 的通信速率^[22]。根据 TAOGS 的设计经验, ESA 对地面站进行了升级, 加入卡塞格林自适应光学系统 (Cassegrain Adaptive Receive Optics, CARO)^[23], 其光学布局如图 5 所示。在测试期间, 平均大气相干长度约为 10 cm, 下行链路的光纤耦合效率达到了 29%^[24]。

除了为下行链路做波前校正外, ESA 还为上行链路设计了自适应光学系统——Alpha-Up 系统。其具有共用的下行链路/上行链路口径, 通过测量下行链路波前来预补偿上行链路波前。测试后上行链路的衰

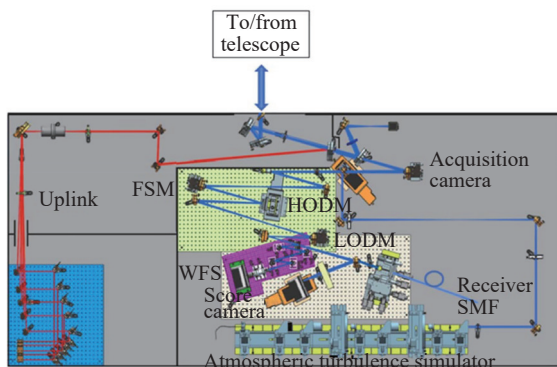


图 3 集成光学系统的布局

Fig. 3 Layout of the integrated optical system

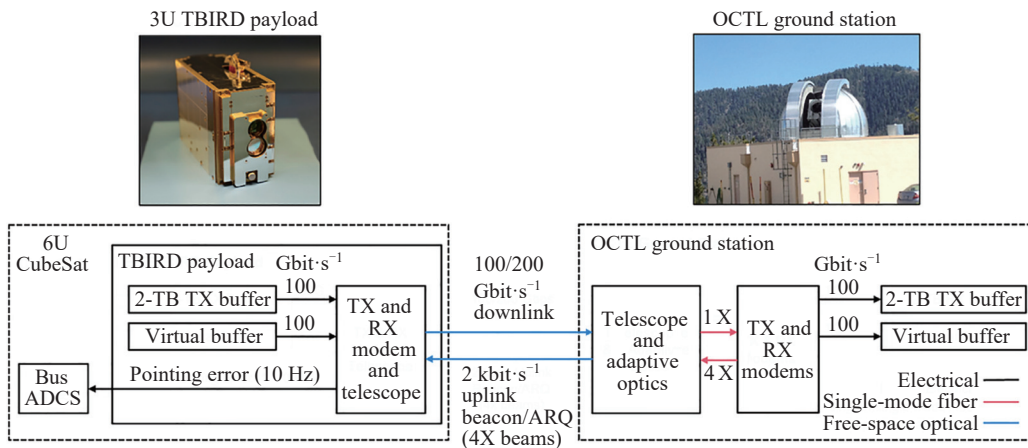


图 4 TBIRD 系统任务架构

Fig. 4 TBIRD system architecture

减情况有明显改善, 在 99% 的置信度下信道传输效率增加了 10 dB^[24].

1.2.3 空间红外光通信下行链路系统

德国宇航中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) 的空间红外光通信下行链路系统 (Optical Space Infrared Downlink System, OSIRIS) 计划旨在开发适用于小型近地轨道对地通信的高紧凑光通信载荷, 其发展路线如图 6 所示. OSIRISv1 在与 OGSOP-NG 的通信测试中实现了 OOK 调制下 $39 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的下行速率^[25]. OSIRISv2 和 OSIRISv3 则分别能达到 $1 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $10 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的通信速率. 目前 DLR 正在开发世界上最小的激光通信终端 OSIRIS4 CubeSat.

1.3 中国

1.3.1 海洋二号

2011 年哈尔滨工业大学科研团队开展激光通信科学试验项目, 激光通信终端搭载海洋二号卫星成功发射. 星地激光通信链路数据传输试验获得成

功, 卫星与地面站距离约 2000 km, 通信速率为 $20/504 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[26]. 此次试验是中国首次星地激光通信试验, 标志着中国的卫星光通信技术已进入空间试验阶段.

1.3.2 墨子号

2016 年中国科学院上海光学精密机械研究所牵头开展了星地高速相干激光通信实验, 激光通信空间终端随墨子号发射. 空间终端输出光功率约为 2.2 W, 波长为 1550 nm, 发散角为 $40 \mu\text{rad}$. 光学地面站位于新疆乌鲁木齐市南山地区, 这里有极佳的大气观测条件. 南山站主要包括如图 7 所示的直径 1.2 m 卡塞格林望远镜, 差分相移键控 (Differential Phase Shift Keying, DPSK) 接收器, 以及 2.5 W, 1064 nm 的激光发射器^[27].

2016 年底至 2017 年初进行了双向激光通信链路测试. 在距离超过 1000 km 条件下, 基于 DPSK 调制实现了下行链路 $5.12 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的通信速率, 平均误码率在 1.9×10^{-9} , 实现了上海东方明珠电视塔图像的传输. 基于 PPM 调制的上行链路通信速率为 $20 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均误码率在 5.3×10^{-7} ^[27]. 这是中国首次在轨相干激光通信试验, 验证了该技术用于星间和星地链路的可行性.

1.3.3 实践十三号/二十号

2017 年实践十三号卫星所搭载的激光通信终端与地面站实现了国际上首次高轨卫星对地高速激光双向通信试验, 达到最高 $5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 的通信速率, 显示了中国在空间高速信息传输技术领域的世界先进

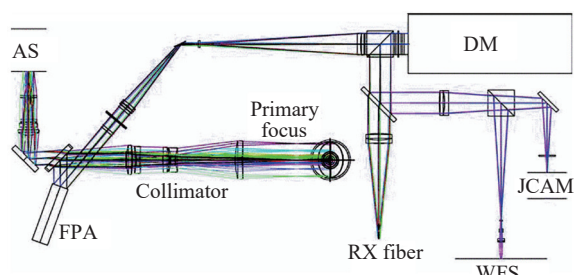


图 5 CARO 系统光学布局

Fig. 5 CARO system optical layout

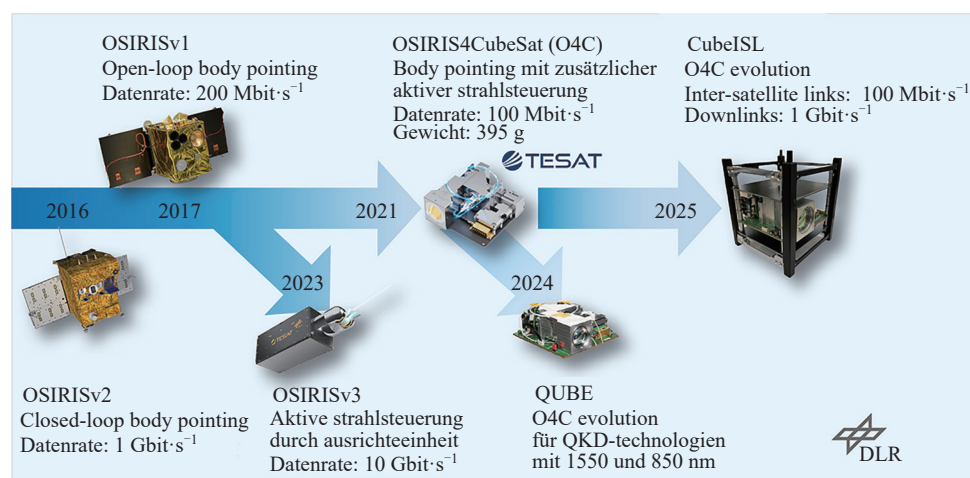


图 6 OSIRIS 计划路线

Fig. 6 OSIRIS initiative roadmap

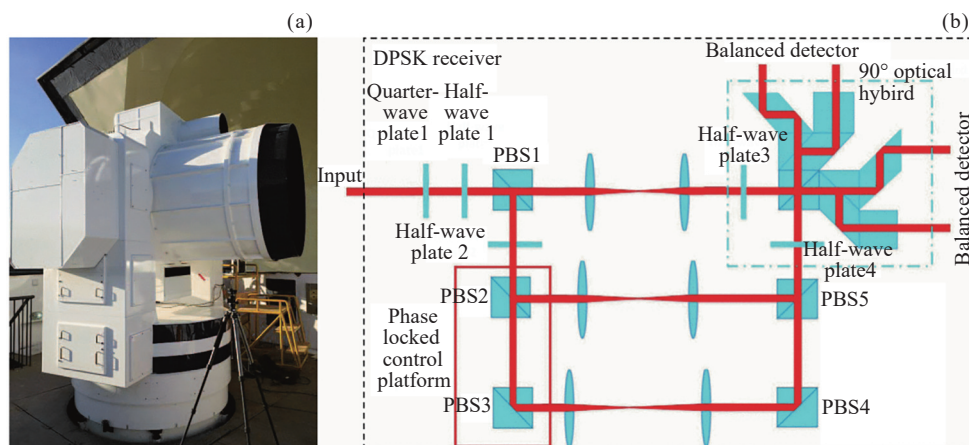


图 7 南山光学地面站

Fig. 7 Nanshan OGS

水平. 2020 年中国首套高速高阶相干激光通信终端搭载实践二十号卫星首次在轨验证了正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) 相干调制的激光通信, 与丽江光学地面站通信速率高达 $10 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$, 为中国当时卫星激光通信的最高速率^[28].

1.3.4 吉林一号

2023 年长光卫星科技股份有限公司成功开展了星地激光高速通信试验, 自主研发的吉林一号 MF02 A04 星与车载激光通信地面站之间的单次通信时长超过 100 s, 通信速率达到 $10 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$. 将高分辨载荷在轨实际获取的影像对地面激光数传站进行了回传, 经地面解码后, 得到了与传统微波数传一致的亚米级图像. 这次超高速星地激光通信试验是中国首次面向业务化应用, 标志着中国实现星地激光高速通信工程化应用.

1.4 现状与发展趋势

欧洲、美国等国家和地区已进入星地激光通信的应用阶段, 高/低轨目前均已获得了在轨验证. 而中国在星地激光通信技术领域起步较晚的情况下, 快速掌握各项关键技术, 也已跻身世界前列. 典型的国内外卫星激光通信技术在轨验证情况总结如表 1 所示. 从表 1 可以看出, 在星地激光通信高速率化、轻量化发展的趋势下, 相干激光通信技术取代非相干通信技术成为主流, 并结合波分复用技术、偏振复用等技术提高信道容量; 自适应光学、空间分集等关键技术也成为保障通信链路可靠性不可或缺的手段.

2 星地激光通信的关键技术

2.1 捕获跟踪瞄准技术

在采用小束散角的空间激光通信中, 通信系统需要具备极高的动态瞄准和跟踪精度. 因此, 设计捕获、瞄准和跟踪 (Acquisition, Pointing, and Tracking, APT) 系统以保障通信的可靠性和效率至关重要. 不同轨道的激光链路对 APT 系统的要求各不相同: 低轨道卫星需要高动态性能和快速捕获能力, 高轨道卫星对功率要求更高, 深空激光通信则面临着极高的导航定位精度要求.

APT 系统的主要工作流程可分为瞄准、捕获、粗跟踪和精跟踪四个阶段, 如图 8 所示.

APT 系统能否快速准确地建立星地激光通信链路主要取决于精确瞄准技术、快速捕获技术以及高精度跟踪技术等关键技术.

2.1.1 精确瞄准技术

在激光通信的瞄准阶段, 面临初始指向精度不足、设备误差以及大气扰动等问题. 初始指向精度不足通常由卫星高度和星历表数据误差引起, 而瞄准仪器的应力、噪声和安装结构等因素会进一步降低瞄准精度. 此外, 大气湍流、云层和热梯度效应会导致光束漂移和扩展, 对瞄准精度产生严重影响.

为解决上述难题, 可采用高精度测量设备、标校功能和动态补偿策略. 其中, GPS/INS 组合导航系统与星敏感器用于终端定位^[29,30], 并结合星历表数据计算轨道以实现初始指向预测. 通过利用恒星或自然天体作为参考信标标校, 消除系统误差, 进一步提高瞄

表 1 国内外典型的星地激光通信系统

Table 1 Typical satellite-to-ground laser communication systems at home and abroad

地区	年份	项目/卫星	通信架构	通信波长	调制方式	通信速率	校正技术
美国	1995	GOLD	GEO-Ground	↑ 514.5 nm ↓ 830 nm	↑ PPM ↓ PPM	↑ 1.024 Mbit·s ⁻¹ ↓ 1.024 Mbit·s ⁻¹	↑ 空间分集
	2014	OPALS	GEO-Ground	↑ 976 nm ↓ 1550 nm	↓ OOK	↓ 50 Mbit·s ⁻¹	↑ 空间分集 ↓ AO
	2021	LCRD	LEO-GOE-Ground	↑ 1555/1565 nm ↓ 1545 nm	↑ DPSK ↓ DPSK	↑ 1.244 Gbit·s ⁻¹ ↓ 1.244 Gbit·s ⁻¹	↑ 空间分集 ↓ AO
	2022	TBIRD	LEO-Ground	↑ 1534 nm ↓ 1550 nm	↑ PPM ↓ DP-QPSK	↑ 2 Kbit·s ⁻¹ ↓ 2×100 Gbit·s ⁻¹	↑ 空间分集 ↓ AO
欧洲	2010	OPTEL-μ	LEO-Ground	↑ 1064 nm ↓ 1550 nm	↑ PPM ↓ OOK	↓ 2.5 Gbit·s ⁻¹	—
	2013	EDRS	LEO-GOE-Ground	↓ 1064 nm	↓ BPSK	↓ 1.8 Gbit·s ⁻¹	↓ AO
	2016	OSIRISv1	LEO-Ground	↓ 1550 nm	↓ OOK	↓ 39 Mbit·s ⁻¹	↓ AO
中国	2011	海洋二号	LEO-Ground	↓ 1550 nm	↓ OOK	↓ 504 Mbit·s ⁻¹	—
	2016	墨子号	LEO-Ground	↑ 1064 nm ↓ 1550 nm	↑ PPM ↓ DPSK	↑ 20 Mbit·s ⁻¹ ↓ 5.12 Gbit·s ⁻¹	—
	2017	实践十三号	GEO-Ground	↓ 1550 nm	↓ OOK	↓ 5 Gbit·s ⁻¹	—
	2020	实践二十号	GEO-Ground	↓ 1550 nm	↓ QPSK	↓ 10 Gbit·s ⁻¹	↓ AO

注 “↑”表示上行链路,即从地面站到卫星;“↓”表示下行链路,即从卫星到地面站。

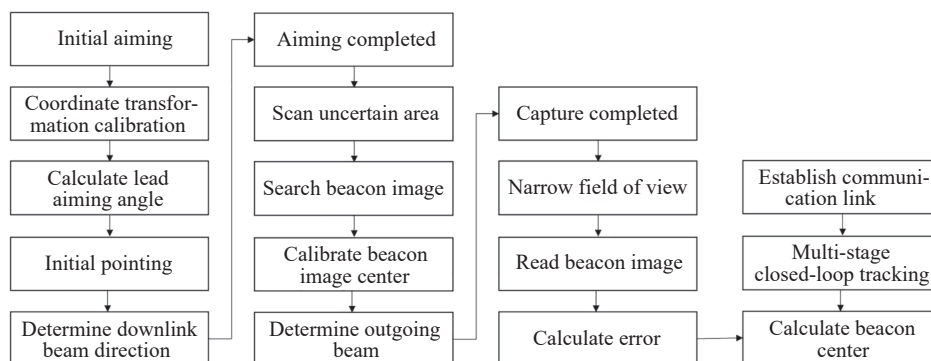


图 8 瞄准、捕获、跟踪流程

Fig. 8 Pointing, acquisition, and tracking process

准精度. 此外, 采用磁流体角速度传感器修正光轴随机误差, 以降低微振动对光束瞄准的影响^[31].

2.1.2 快速捕获技术

空间激光通信不同于光纤通信, 受轨道预报误差、平台姿态扰动和望远镜指向精度等因素的影响, 捕获跟踪精度难以保障, 甚至可能导致瞄准失败. 此外, 通信时间窗口的限制要求捕获过程快速高效, 以确保尽可能多的数据传输.

为应对捕获阶段的难题, 通常通过优化扫描策略和提高光斑探测精度来提升捕获效率. 在扫描策略方

面, 常用方法包括如图 9 所示的光栅扫描、螺旋扫描、光栅-螺旋扫描、玫瑰形扫描和李萨茹扫描等^[32], 各策略在实现难度和扫描效率上各有优势, 应根据具体应用场景选择最优方案. 在光斑探测方面, 利用电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 或四象限探测器获取光斑图像, 通过质心算法、形心算法、圆检测算法或基于卷积神经网络的深度学习算法计算光斑坐标和脱靶量^[33,34]. 其中, 质心算法适用于光斑分布均匀的情况, 形心算法适用于大气湍流较强时的非均匀光斑检测, 以提高检测精度. 此外, 通过光学

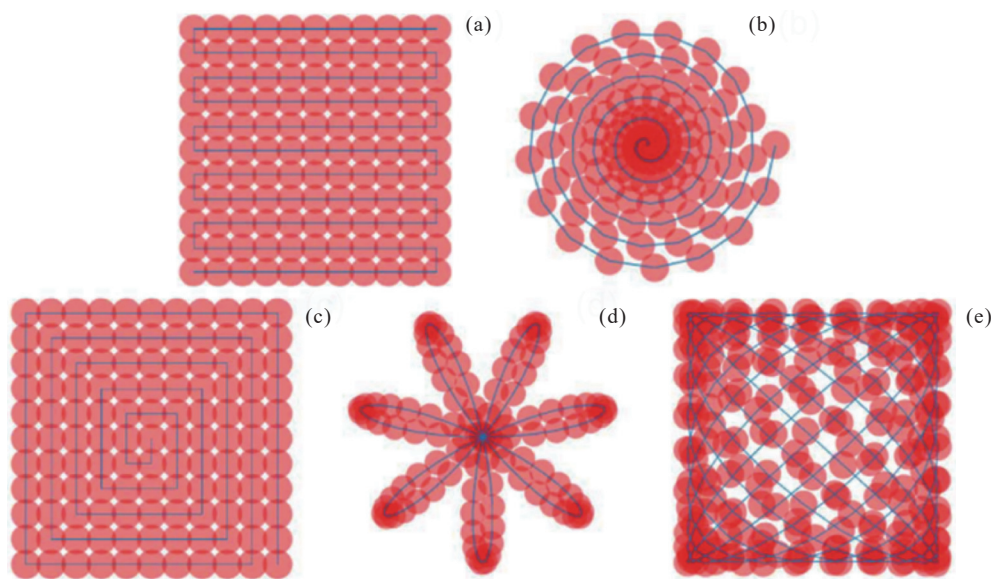


图 9 扫描策略. (a) 光栅扫描, (b) 螺旋扫描, (c) 复合扫描, (d) 玫瑰形扫描, (e) 李萨茹扫描

Fig. 9 Scanning strategy. (a) Raster scanning, (b) spiral scanning, (c) raster-spiral scanning, (d) rosette scanning, (e) Lissajo scanning

变倍实现信标束散角的粗精切换^[35], 并采用非均匀性校正等方法优化探测器输出的一致性^[36], 从而适应不同环境和捕获需求.

2.1.3 高精度跟踪技术

在跟踪阶段, APT 系统主要面临传感器误差、动态滞后误差、空间平台抖动误差和力矩干扰引起的误差等问题. 其中, 空间平台抖动是影响跟踪精度的关键因素. 此外, 跟踪探测器的信噪比受入射光功率、背景光特性、积分时间及噪声特性等多种因素影响, 平台振动残差也会对视轴对准和光束耦合效率产生显著影响.

为提升跟踪精度, 系统可从抑制平台抖动、消除外界干扰和优化控制算法等方面进行改进. 针对平台抖动误差, 采用二级隔振技术和高带宽跟踪执行机构, 提高系统对平台动态特性的适应性. 在光斑探测方面, 通过开窗技术实现大视场与高帧频模式的切换, 保障探测器同时具备大视场和高带宽性能^[37]. 章动扫描技术^[38]进一步优化光斑耦合效率, 使其保持在最大值附近. 此外, 自适应控制算法^[39-41]的应用增强了系统在参数变化下的实时调整能力和鲁棒性, 从而有效提升激光通信终端的跟踪性能.

2.1.4 发展趋势

国外在 APT 系统领域研究起步较早, 1985 年 NASA 开发的 LUCE 系统实现了优于 1 mrad 的跟

踪精度^[42]. 1994 年, 日本 LCE 系统采用面阵 CCD 和四象限探测器, 精跟踪精度达到 2 μrad ^[43]. 2001 年, ESA 的 SILEX 计划利用直流步进电机和快速反射镜实现 2 μrad 的跟踪精度^[44]. 此后, 日本的 OICETS 实验^[45]和德国的 LCTSX 计划^[46]分别通过二维伺服平台和简化结构的设计提高了精度和系统稳定性. 近年, Antonello 系统通过双级瞄准及快速反射镜技术将跟踪精度提升至 10 μrad 以下^[47].

中国在 APT 系统领域也开展了深入研究, 并取得了重要成果. 2003 年中国科学院上海光学精密机械研究所实现了跟踪精度为 0.2 mrad 的无线激光通信链路^[48]. 2007 年复合轴粗跟踪伺服技术实现了精跟踪误差 4 μrad 的星际通信实验^[49]. 近年来, 随着多轴复合机构与神经网络算法等技术的发展, 跟踪精度进一步提高至 10 μrad 以下^[50,51], 满足了星地和星间通信的实际需求. 2023 年中国通过双向模型实现“一对四”组网通信, 误差控制在 56.8 μrad ^[52].

在非传统机械扫描领域, 二维液晶相控阵技术在国际上取得进展, NASA 的 TBIRD 项目基于单光电探测器的跟踪系统显著提高了灵活性. 在国内, 柔性 APT 结构和新型捕获方案已实现 3 μrad 的精度, 满足星间链路需求. 未来 APT 系统将向更高精度、更快响应速度和更强适应能力发展, 重点包括信标光与信号光的合并、非共光路结构应用及光学矢量相控阵

技术攻关, 以满足复杂环境下的空间通信需求.

2.2 星上激光器技术

近年来, 由半导体激光器与光纤组件构成的激光发射模块广泛应用在星地激光通信领域中. 由于即使单个组件发生故障也会危及激光发射模块的正常工作, 因此针对半导体激光器与光纤组件的失效与退化机理研究不断展开.

2.2.1 半导体激光器的失效机理

在激光通信系统中, 半导体激光器通常以恒定输出功率和波长工作, 如图 10 所示, 其失效模式主要包括快速失效、逐渐失效和逐渐失效后的突然失效.

快速失效通常发生在工作前 100 h 内, 表现为输出功率的迅速下降和阈值电流的快速增加. 这与晶圆外延生长或芯片制造过程中引入的内部缺陷有关. 非辐射复合增强的位错爬升和滑移机制会引起缺陷在晶体结构中的传播和位错网络的生长, 导致激活区损坏并使激光器失效^[53-55]. 逐渐失效是半导体激光器最大工作寿命的主要限制因素, 表现为光输出功率随时间缓慢下降, 阈值电流逐步增加, 而斜率效率保持恒定. 这种退化与激活区中非辐射复合中心的增加以及内部应力增强有关^[56], 通常伴随位错网络增长、黑点缺陷及微位错环的形成. 逐渐失效后的突然失效表现为在正常工作期间输出功率的突然消失, 多与电、光、热过载及黑线缺陷相关. 此外, 灾难性光学镜面损坏、电极或散热材料退化也可能导致此类失效^[57], 进一步限制了高功率半导体激光器的最大输出功率.

2.2.2 光纤组件的失效与退化分析

热负荷是影响光纤放大器性能的关键因素. 高光

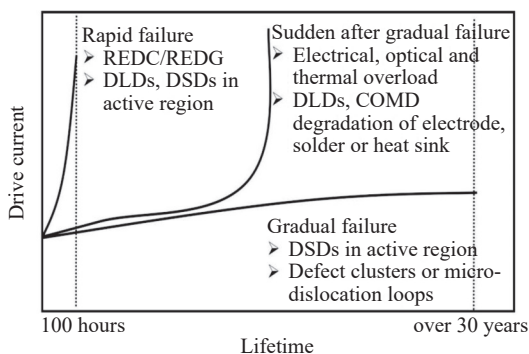


图 10 恒定输出功率下激光二极管的失效形式

Fig. 10 Failure modes of laser diodes under constant output power

信号衰减和泵浦光与信号光波长不匹配引起的量子缺陷会导致热量积累, 限制放大器效率并增加散热要求. 此外, 空间湿度水平的极端变化对设备的正常运行也提出了更高的要求^[58].

光纤组件在发射和运行期间受到振动和冲击的显著影响. 运载火箭的声学噪声和轨道修正引起的振动可能对光纤接头造成损害. 光纤系统需要在高应力环境下保持完整性和连续性, 例如在导弹应用场景中需承受高达 300 kpsi (1 kpsi $\approx$ 6.895 MPa) 的轴向应力^[59], 以确保可靠性.

辐射对硅基光纤的影响主要包括辐射引发的衰减、发射和折射率变化. 辐射诱导衰减会随着辐射剂量的增加导致光纤损耗, 并在辐射停止后部分恢复, 其程度取决于纤芯与包层成分、辐射类型和温度等参数^[60-62]. 辐射诱导发射会降低信号的信噪比, 而辐射诱导折射率变化则通过改变玻璃密度和波导结构对光纤性能产生影响^[63].

2.2.3 星上激光器地面空间鉴定测试

在测试前需对组件进行材料分析, 确保其适合真空环境. 空间鉴定测试旨在验证选用的组件、子系统及系统能在轨道条件下正常运行. 鉴定流程如图 11 所示, 通常从组件级别开始, 最终覆盖整个系统, 若组件发生变化, 则需重新认证. 测试包括振动冲击测试、热循环测试和辐射测试, 各测试参数需与空间环境一致.

组件在测试后需经过筛选, 以剔除不符合标准的部分, 确保组装的系统性能稳定. 此外, 部件寿命测试是鉴定的重要环节, 需通过广泛测试评估其在任务全寿命周期内的可靠性和性能稳定性.

2.2.4 发展趋势

尽管在半导体激光器和光纤组件的失效与退化机理研究方面取得了显著进展, 但这些成果尚未广泛应用于制造工艺的优化与改进. 目前, 器件的筛选与验证仍主要依赖传统的环境测试方法, 这些方法虽然能够验证器件在特定条件下的可靠性, 但难以全面反映复杂应用环境中的退化行为与失效模式, 存在潜在失效风险覆盖不足的问题. 未来研究应重点聚焦于将失效机理研究成果转化为制造工艺优化, 并制定更具针对性和前瞻性的测试方法, 以全面提升激光器与光纤组件的可靠性.

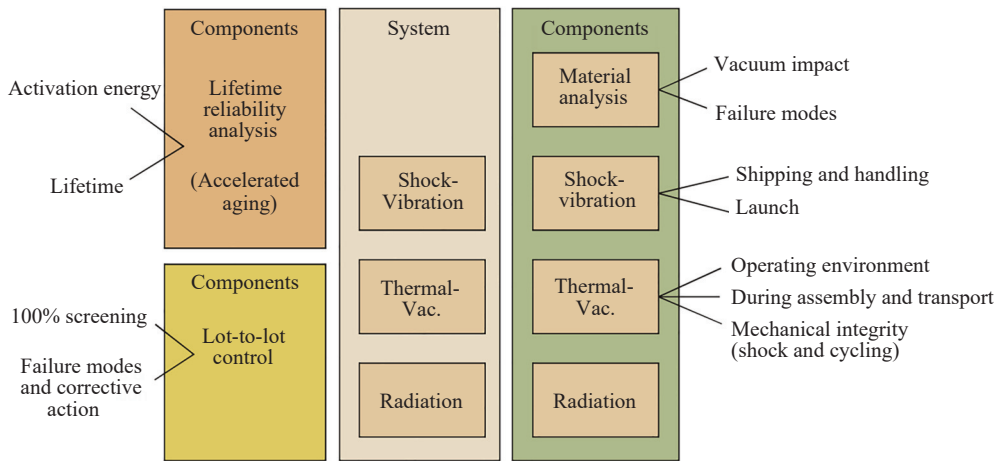


图 11 星上激光器系统的测试过程

Fig. 11 Test process of on-board laser system

3 大气湍流对星地激光通信的影响与抑制

湍流效应是指大气中的随机运动导致大气折射率随机变化的现象, 会严重削弱光束的光学质量, 给光通信的接收带来了困难. 从通信链路的角度分析, 湍流对光束的影响, 最终表现为链路信噪比和可靠性的下降. 大气湍流引起的光束漂移和光强闪烁均会显著降低接收天线探测到的信号光功率^[64]. 除此之外, 湍流引起的波前畸变将影响接收到的光信号耦合到光纤的效率. 特别地, 对于相干探测系统, 波像差还将引起信号光与本振光的空间相位不匹配, 从而影响混频效率^[65].

3.1 大气湍流对星地激光通信功率链路的影响

通信链路不仅是信息传递的通道, 也是能量传递系统. 为了获取高质量的通信效果, 通常对通信链路的功率余量有所要求.

星地激光通信链路的功率预算方程可以用如下公式简单描述:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta_{ot} \cdot L_s \cdot \eta_s \cdot L_{APT} \cdot G_r \cdot \eta_{or}$$

其中, P_r 为接收的信号功率, P_t 为发射的信号功率, G_t 为发射光学天线的增益, η_{ot} 为发射端的透过率, L_s 为自由空间的链路衰减, η_s 为大气信道的功率衰减, L_{APT} 为 APT 瞄准失配的损耗, G_r 为接收光学天线的增益, η_{or} 为接收端的透过率.

假设星地下行通信链路的设计通信距离为 1300 km, 通信波长为 1550 nm, 通信俯仰角为 20°, 发射功率为 0.2 W, 采用相干/非相干的通信方式. 接收光学望远镜的口径为 500 mm, 单模光纤的数值孔径为 0.14, 纤芯直径为 8.2 μm, 系统如图 12 所示. 多模光纤的数值孔径为 0.28, 纤芯直径为 62.5 μm. 经计算可得在大气相干长度为 5 cm 的情况下, 通信链路的功率预算如表 2 所示.

可以看到, 由于波前畸变的影响, 光纤耦合效率显著降低, 引起通信链路的功率下降, 因而功率余量不足, 无法实现有效通信.

3.2 抑制大气湍流的技术现状

大气湍流引起的接收光信号的波动会造成信噪比的波动, 从而影响通信系统的误码率, 降低通信系统的可靠性. 目前在自由空间光链路中常用的抑制大气湍流的技术有孔径平均^[66,67]、分集技术^[68-70]、AO 等^[71,72]. 尽管编码技术可以在一定程度上恢复短期数据丢失^[60], 但由于湍流引起的深度信号衰落, 接收数据将存在长达数十毫秒的随机中断, 传统编码技

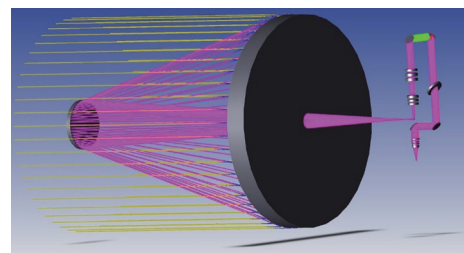


图 12 接收光学望远镜系统

Fig. 12 Schematic diagram of the receiving optical telescope system

表 2 星地激光通信链路的功率预算
Table 2 Power budget of satellite-to-ground laser communication link

项目	数值	备注
P_t /dBm	23	200 mW发射功率
G_t /dB	94	80 μ rad发散角
L_s /dB	-260	1300 km传输距离
G_r /dB	120	500 mm天线尺寸
光纤耦合效率/dB	-8.10	多模通信
通信接收灵敏度/dBm	-25.98	单模通信
	-38	多模通信
	-42	单模通信
链路余量/dB	-2.8	多模通信
	-16.68	单模通信

术对此束手无策. 近些年, AO 逐渐成为大孔径接收望远镜的光学地面站中不可或缺的系统, 被认为是抑制湍流问题最佳的技术^[73].

典型的 AO 系统如图 13 所示, AO 对波前畸变的实时校正可以提高光纤的耦合效率^[74]. 假设将波前误差 RMS 校正至 $\leq \lambda/8$, 此时光纤耦合效率得到显著提升, 多模通信可以达到 -0.18 dB, 单模通信达到 -3.08 dB, 通信得以建立, 并且通信质量大大提升.

3.3 发展趋势

AO 系统在星地激光通信领域已得到广泛成熟的应用, 显著提升了通信链路的可用性和可靠性. 鉴于星地激光通信的发展前景及需求, 未来 AO 技术的研究重点在于提升系统在强湍流条件下的抑制能力, 并进一步增强通信链路的稳定性和可靠性. 其中波前探测器是 AO 系统的关键, 与曲率传感、剪切干涉和四棱锥传感等技术相比, 哈特曼波前传感技术具有结构简单、光能利用率高、动态范围大等优点, 但仍需进一步扩展其动态范围, 解决光斑超出子孔径范围时的匹配问题, 以满足强湍流条件下的波前探测需求. 对于波前校正器, 可以围绕高精度、快速响应的波前校正技术展开, 采用小型化、低成本的器件 (例如微机电系统 (Micro Electro Mechanical System, MEMS) 和液晶变形镜) 来降低系统成本和体积. 同时, 利用机器学习和智能控制技术, 使 AO 系统具备更高的自适应性和动态环境响应速度, 从而满足星地激光通信在多变大气环境中的稳定传输需求.

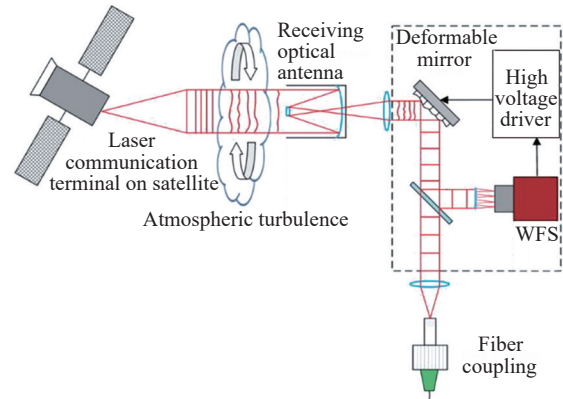


图 13 自适应光学系统

Fig. 13 Schematic diagram of AO system

4 基于新型结构光场的激光通信

除了 AO 等抑制方法, 研究也一直在探索可以提高星地激光通信质量的其他技术手段, 例如基于新型结构光场的通信技术. 与传统的高斯光相比, 新型结构光场具有偏振、相位等额外自由度, 可以增加通信容量、提高抗湍流性, 具有潜在的研究价值.

4.1 涡旋光通信

涡旋光携带轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM)^[75], 具有相位奇点和螺旋波前, 其模式的正交性为多通道信号传输提供了可能, 显著提升了通信容量^[76,77]. 然而, 大气湍流会引发不同 OAM 模式间的串扰, 增加通信误码率.

2014 年 Ren 等^[78]利用自适应光学技术校正 OAM 光在湍流传输中引入的像差. 如图 14(a) 所示, 通过引入共轴传输的高斯光作为探测光, 用哈特曼波前探测器测量高斯光的畸变波前, 并通过校正器补偿 OAM 光的像差. 实验表明, 该方法对低阶 OAM 模式效果较好, 高阶模式的补偿效果有限. 同年, Huang 等^[79]提出基于多输入多输出系统的湍流抑制方法. 如图 14(b) 所示, 在发射端通过计算全息生成多个 OAM 模式实现共轴传输, 接收端使用与传输模式相反阶数的系统将 OAM 光转换为高斯光进行解码, 从而在弱湍流条件下有效降低误码率. 这些研究为涡旋光通信在复杂大气环境下的应用提供了技术支持.

4.2 矢量光通信

矢量光场具有偏振奇点和空间-偏振不可分性^[80,81], 可通过空间模式复用增加信息通道, 提高通信容量. 在大气湍流条件下, 其传输特性受到广泛关注.

2020 年 Zhang 等^[82]通过拉盖尔-高斯型涡旋光束合成径向偏振矢量光束, 研究其在不同湍流强度下的传输特性. 结果表明, 矢量光束相比标量涡旋光束具有更远的环形光强分布识别距离、更小的闪烁指数和光束漂移, 这得益于偏振态正交分量对湍流影响的部分抵消. 2021 年, Zhu 等^[83]利用湍流屏模拟进行了

矢量光通信实验. 如图 15(a) 所示, 通过 SPDPSK 协议将信息编码到两个正交圆偏振分量中, 并使用偏振分束器分离分量进行解码. 在闪烁指数为 1.09 的湍流条件下, 使用 34 个正交矢量模式实现了每脉冲 4.84 bits 的通信速率, 误码率为 4.3%; 当闪烁指数增至 1.54 时, 使用 18 个矢量模式实现每脉冲 4.02 bits

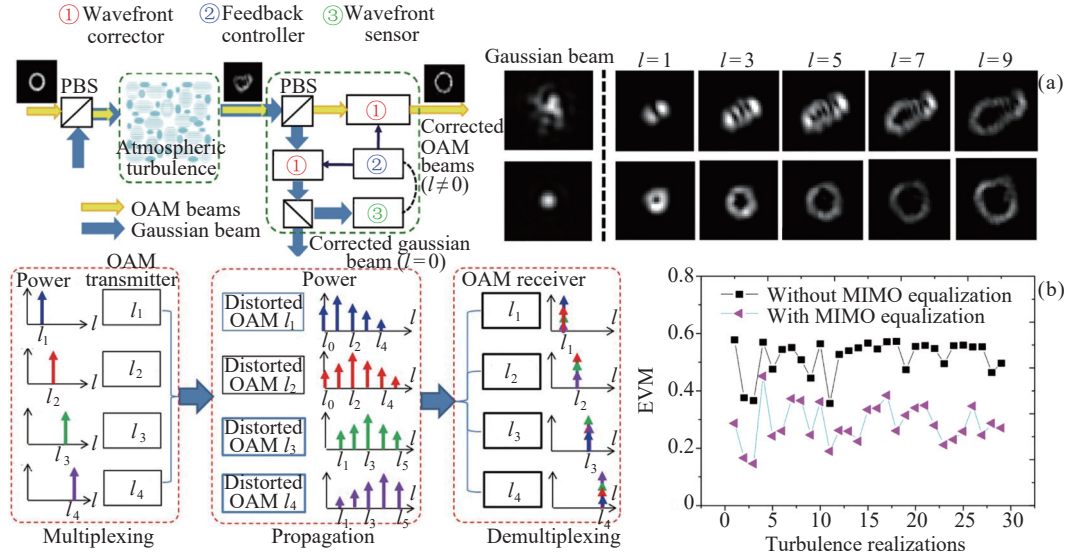


图 14 涡旋光束通信. (a) 利用 AO 系统实现对 OAM 光的畸变补偿, (b) 通过多输入多输出技术抑制大气湍流的影响
Fig. 14 OAM communication. (a) Using AO system to realize distortion compensation of OAM light, (b) using multiple-input multiple-output technology to suppress the impact of atmospheric turbulence

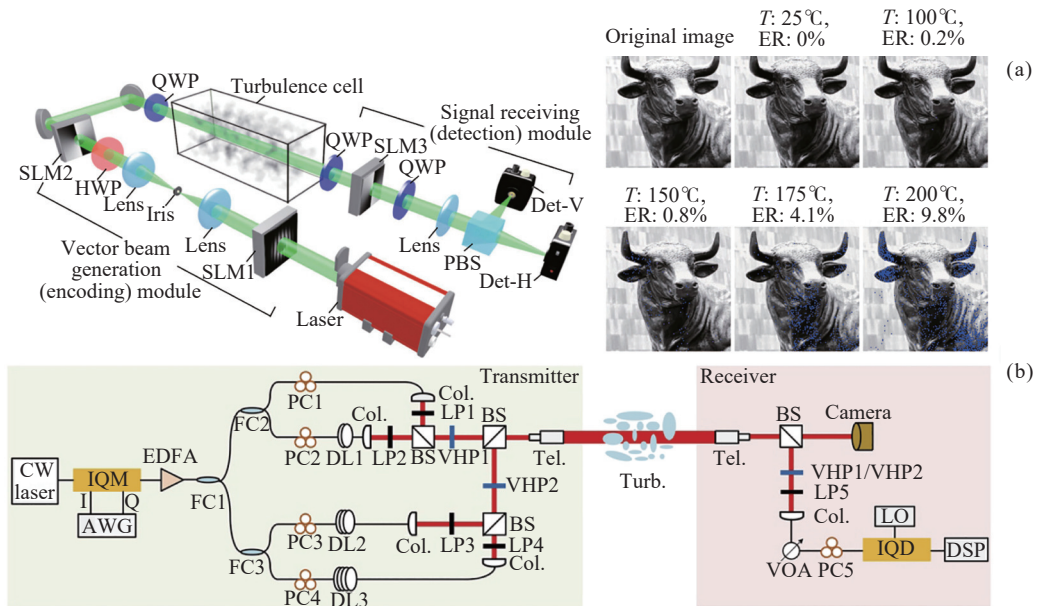


图 15 矢量光束通信. (a) 基于 SPDPSK 协议的矢量光通信实验, (b) 基于 QPSK 协议的矢量光通信实验
Fig. 15 Vector beam communication. (a) Vector optical communication experiment based on SPDPSK protocol, (b) vector optical communication experiment based on QPSK protocol

的速率, 误码率降至 2.6%. 2023 年 Yu 等^[84] 利用四种柱矢量光束进行模式复用实验, 每模式携带 $30 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 QPSK 信号. 如图 15(b) 所示, 在接收端, 通过矢量半波片和线偏振片选择单模光纤中的矢量光模式并完成解码. 在强湍流条件下, 矢量光通信的误码率低于传统高斯光, 且中断概率减少到原来的 $1/2\sim 1/3$, 展示出更优异的抗湍流性能.

4.3 锋芒光束通信

锋芒光束是一种无衍射光束, 具有光束稳定性好、结构简单、成本低和实时性强等特点, 被视为抑制大气湍流的新型技术.

2019 年 Zhang 等^[85] 通过相位调制合成多组艾里光束实现锋芒光束, 其横向波矢沿抛物线轨迹传输并相互抵消, 形成稳定的无衍射光束. 如图 16 所示, 与高斯光在 1 km 链路中的对比实验表明, 锋芒光束的中心光斑能量集中度更高, 光强波动更小. 2022 年, Hu 等^[86] 在使用 OOK 编码的 $1 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 非相干通信实验中发现, 锋芒光束在相同孔径接收条件下的功率损耗比高斯光低 $8\sim 13 \text{ dB}$, 且通信误码率更低. 2023 年 Xu 等^[87] 将锋芒光束与 OAM 相结合, 提出锋芒涡旋光束, 其光斑畸变更弱, 光束扩展、质心偏移和光强闪烁更小. 但锋芒光束最大传输距离仍限制在 1 km, 其稳定性以能量损失为代价, 传输距离受限, 尚不具备星地激光通信的实际应用可行性.

4.4 发展趋势

涡旋光束、矢量光束和锋芒光束等新型结构光场具有增加通信容量、提高传输稳定性等优势, 可以较

好地解决光强闪烁、光束漂移、光束扩展等问题, 但仍然面临波前畸变影响通信误码率的问题. 在未来有望与 AO 系统相结合, 可以适当降低对 AO 系统的性能要求, 实现基于新型结构光场的星地激光通信. 但是如何实现对新型结构光场的波前探测, 提高编解码的效率和准确性等, 都是亟需解决的重要问题.

5 结论

随着空间科学研究领域数据量的激增, 尤其是深空探测、遥感卫星成像以及其他空间科学任务对高光谱和高分辨率数据需求的不断增加, 星地激光通信在满足这些数据传输需求方面具有无可比拟的优势, 已在全球范围内得到广泛关注和初步应用, 美国、欧洲、日本及中国等多个国家和地区均完成了星地激光通信在轨验证并取得显著成效. 本文对星地激光通信系统的核心技术进行了系统梳理, 包括捕获跟踪瞄准、星上激光器等技术的原理及其在实际应用中的难点, 并分析了大气湍流对信道的影响和大孔径、空间分集及自适应光学等有效的抑制手段. 此外, 还探讨了基于新型结构光场的激光通信前沿技术, 为未来发展方向提供了指导.

空间科学的海量数据量将对星地激光通信的通信性能提出更高的要求, 例如更高的速率、更大的容量和更高的稳定性等. 星地激光通信的未来发展可能包含以下几个方面.

(1) 更高性能的激光通信器件. 更高功率的激光

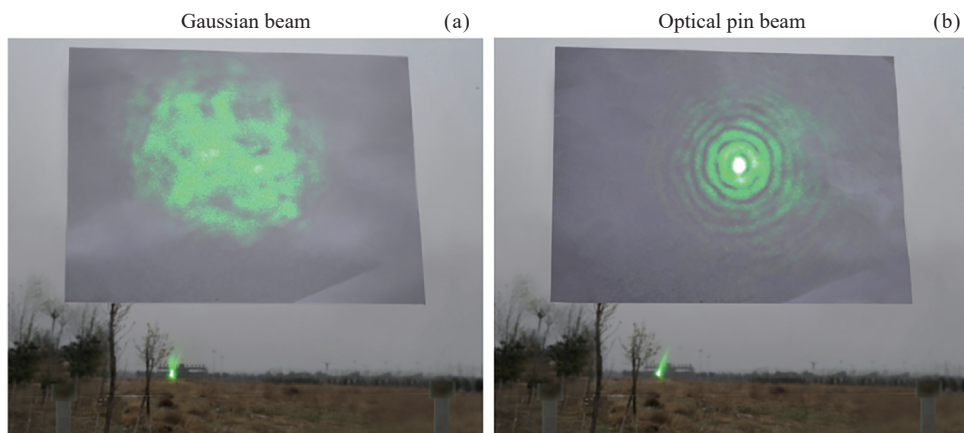


图 16 锋芒光束通信. 锋芒光束与高斯光束传输后的远场图案

Fig. 16 Optical pin beam communication. Far-field pattern after optical pin beam and Gaussian beam transmission

器、更高灵敏度的光电探测器、更大倍率的光放大器等,都可以有效提升通信功率和探测灵敏度,扩展通信距离和通信容量。

(2) 更有效的通信建链和大气湍流抑制技术. 精密快速的 APT 技术可以更快地建立可靠的激光通信链路,适用于强湍流的 AO 技术以及多点布站技术、分集技术等联合可以提高通信可用度,锋芒光束等新型激光具有更好的抗湍流性,有望实现更稳定的星地激光通信。

(3) 更高容量的调制技术. 涡旋光的 OAM 复用和矢量光的偏振复用等可以有效增加通信通道,提升通信容量. 然而,以上发展目标也带来了诸多技术难点,需在多方技术协同下不断攻克,星地激光通信的持续发展将为空间科学和其他领域的数据传输提供强有力的支持,为未来深空探测及空间信息网络的建设奠定坚实的技术基础。

参考文献

- [1] FRIED D L. Scintillation of a ground-to-space laser illuminator[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, **57**(8): 980-983
- [2] MINOTT P O. Scintillation in an earth-to-space propagation path[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, **62**(7): 885-888
- [3] CZICHY R H, SODNIK Z, FURCH B. Design of an optical ground station for in-orbit checkout of free-space laser communication payloads[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communication Technologies VII. San Jose: SPIE, 1995
- [4] WILSON K E. An Overview of the GOLD Experiment Between the ETS-6 Satellite and the Table Mountain Facility[R]. The Telecommunications and Data Acquisition Report, 1996
- [5] BISWAS A, OAIDA B, ANDREWS K S, *et al.* Optical payload for lasercomm science (OPALS) link validation during operations from the ISS[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVII. San Francisco: SPIE, 2015
- [6] WRIGHT M W, KOVALIK J, MORRIS J, *et al.* LEO-to-ground optical communications link using adaptive optics correction on the OPALS downlink[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII. San Francisco: SPIE, 2016
- [7] ROBERTS W T, ANTOS D, CROONQUIST A, *et al.* Overview of ground station 1 of the NASA space communications and navigation program[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII. San Francisco: SPIE, 2016
- [8] ROBERTS JR L C, BURRUSS R, FREGOSO S, *et al.* The adaptive optics and transmit system for NASA's laser communications relay demonstration project[C]//Proceedings of the Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans. San Diego: SPIE, 2016
- [9] WILSON K E, ROBERTS JR L C. Recent developments in adaptive optics for the LCRD optical ground station at table mountain[C]//Proceedings of the International Conference on Space Optical Systems and Applications. Kobe, Japan, 2014
- [10] ISRAEL D J, EDWARDS B L, BUTLER R L, *et al.* Early results from NASA's laser communications relay demonstration (LCRD) experiment program[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communications XXXV. San Francisco: SPIE, 2023
- [11] ROBERTS L C, MEEKER S R, TESCH J, *et al.* Performance of the adaptive optics system for laser communications relay demonstration's ground station 1[J]. *Applied Optics*, 2023, **62**(23): G26-G36
- [12] ISRAEL D J, EDWARDS B L, BUTLER R L, *et al.* NASA's Laser communications relay demonstration (LCRD) experiment program: characterization and initial operations[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communications XXXVI. San Francisco: SPIE, 2024
- [13] ROBINSON B S, BOROSON D M, SCHIELER C M, *et al.* TeraByte InfraRed delivery (TBIRD): a demonstration of large-volume direct-to-earth data transfer from low-earth orbit[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXX. San Francisco: SPIE, 2018
- [14] RIESING K M, SCHIELER C M, BROWN J J, *et al.* Pointing, acquisition, and tracking for the TBIRD CubeSat mission: system design and pre-flight results[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communications XXXIV. San Francisco: SPIE, 2022
- [15] SCHIELER C M, RIESING K M, HORVATH A J, *et al.* 200 Gbps TBIRD CubeSat downlink: pre-flight test results[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communications XXXIV. San Francisco: SPIE, 2022
- [16] SCHIELER C M, RIESING K M, BILYEU B C, *et al.* TBIRD 200-Gbps CubeSat Downlink: system architecture and mission plan[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). Kyoto City, Japan: IEEE, 2022
- [17] PIAZZOLLA S, ROBERTS W T, KOVALIK J, *et al.* Ground station for terabyte infrared delivery (TBIRD)[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communications XXXV. San Francisco: SPIE, 2023
- [18] SCHIELER C M, RIESING K M, BILYEU B C, *et al.* On-orbit demonstration of 200-Gbps laser communication downlink from the TBIRD CubeSat[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communications XXXV. San Francisco: SPIE, 2023
- [19] RIESING K, SCHIELER C, BILYEU B, *et al.* Operations and results from the 200 Gbps TBIRD laser communication mission[C]//Proceedings of the 37th Annual Small

- Satellite Conference. Logan: Utah State University, 2023
- [20] BUCHHEIM K. OPTEL- μ : a compact system for optical downlink from LEO satellites[C]//SpaceOps 2012 Conference. Stockholm, Sweden: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012
 - [21] BAISTER G, GREGER R, BACHER M, *et al.* OPTEL- μ LEO to ground laser communications terminal: flight design and status of the EQM development project[C]//Proceedings of the International Conference on Space Optics—ICSO 2016. Biarritz: SPIE, 2017
 - [22] SAUCKE K, SEITER C, HEINE F, *et al.* The Tesat transportable adaptive optical ground station[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII. San Francisco: SPIE, 2016
 - [23] FISCHER E, KUDIELKA K, BERKEFELD T, *et al.* Adaptive optics upgrades for laser communications to the ESA optical ground station[C]//Proceedings of the International Conference on Space Optics—ICSO 2020. SPIE, 2021
 - [24] KUDIELKA K, FISCHER E, BERKEFELD T, *et al.* Optical feeder link demonstrations between the ESA optical ground station and alphasat[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). Vancouver: IEEE, 2023
 - [25] GIGGENBACH D, FUCHS C, SCHMIDT C, *et al.* Downlink communication experiments with OSIRISv1 laser terminal onboard flying laptop satellite[J]. *Applied Optics*, 2022, **61**(8): 1938-1946
 - [26] ZHANG Qingjun, ZHANG Jian, ZHANG Huan, *et al.* The study of HY-2A satellite engineering development and in-orbit movement[J]. *Strategic Study of CAE*, 2013, **15**(7): 12-18 (张庆君, 张健, 张欢, 等. 海洋二号卫星工程研制及在轨运行简介 [J]. *中国工程科学*, 2013, **15**(7): 12-18)
 - [27] CHEN W B, SUN J F, HOU X, *et al.* 5.12 Gbps optical communication link between LEO satellite and ground station[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). Naha: IEEE, 2017
 - [28] CUI Yue, TANG Yong. The in-orbit core test of Shishi No. 20 satellite has been completed[J]. *Space International*, 2020(7): 38-41 (崔岳, 唐勇. 实践二十号卫星在轨核心试验全部完成 [J]. *国际*, 2020(7): 38-41)
 - [29] EPPLE B. Using a GPS-aided inertial system for coarse-pointing of free-space optical communication terminals[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communications VI. San Diego: SPIE, 2006
 - [30] ZHAO Xue, MU Yining, JIANG Feiou, *et al.* Application of GPS/INS technology in the initial capture of static laser communication[J]. *Laser & Infrared*, 2012, **42**(5): 505-509 (赵雪, 母一宁, 姜非欧, 等. GPS/INS 技术在静态激光通信初始捕获中的应用 [J]. *激光与红外*, 2012, **42**(5): 505-509)
 - [31] HOU Xia, LIU Zheqi, CHANG Yidi, *et al.* Analysis on development status and trend of space laser communication technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, **51**(11): 1101013 (侯霞, 刘哲琦, 常亦迪, 等. 卫星激光通信技术发展现状与趋势分析 [J]. *中国激光*, 2024, **51**(11): 1101013)
 - [32] SCHEINFELD M, KOPEIKA N S, SHLOMI A. Acquisition time calculation and influence of vibrations for microsatellite laser communication in space[C]//Proceedings of the Acquisition, Tracking, and Pointing XV. Orlando: SPIE, 2001
 - [33] FAN Xinkun. The Precision Detection Technology of Laser Spot in Space Laser Communication System[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018 (范新坤. 空间激光通信系统中激光光斑精密判读技术 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018)
 - [34] XU Yuan. Research on Target Alignment and Tracking Technology of Infinite Optical Communication Platform Based on Zynq[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023 (许源. 基于 Zynq 的无线光通信平台目标对准跟踪技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2023)
 - [35] LÜ Chunlei, TONG Shoufeng. Realization of high bandwidth and high tracking accuracy fine tracking assembly of compound-axis[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2012, **38**(3): 96-100 (吕春雷, 佟首峰. 高带宽高跟踪精度复合轴 APT 精跟踪系统的实现 [J]. *大连海事大学学报*, 2012, **38**(3): 96-100)
 - [36] WU Zheng. Research on Imaging System of Beaconless Acquisition and Tracking for Space Laser Communication System[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021 (吴峥. 空间激光通信无信标捕跟成像系统研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2021)
 - [37] WANG Junyao. Research on APT Technology for Space Multi-Node Laser Communication Networking[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023 (王俊尧. 空间多节点间激光通信组网 APT 技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2023)
 - [38] GAO Jianqiu, SUN Jianfeng, LI Jiawei, *et al.* Coupling method for making space light into single-mode fiber based on laser nutation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(8): 801001 (高建秋, 孙建锋, 李佳蔚, 等. 基于激光章动的空间光到单模光纤的耦合方法 [J]. *中国激光*, 2016, **43**(8): 801001)
 - [39] ZHENG Yanhong, WANG Yan, CHEN Xinglin. H_∞ control applied for APT system of inter-satellite laser communications[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, **29**(6): 1619-1625 (郑燕红, 王岩, 陈兴林. 卫星光通信 APT 控制系统 H_∞ 设计 [J]. *航空学报*, 2008, **29**(6): 1619-1625)
 - [40] HAN Liqiang, WANG Qi, SHIDA K, *et al.* Hybrid self-adaptive control of coarse tracking platform in ATP system for space optical communication[J]. *Journal of Yanshan University*, 2009, **33**(5): 377-381, 404 (韩立强, 王祁, 信太克归, 等. 空间光通信 ATP 系统粗跟踪平台的混合自适应控制 [J]. *燕山大学学报*, 2009, **33**(5): 377-381, 404)
 - [41] HUANG Haibo, AI Yong, ZUO Tao, *et al.* Design of fuzzy control system for fine tracking in free space optical communication[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2010, **21**(3): 366-370 (黄海波, 艾勇, 左韬, 等. 自由空间光通信精

- 跟踪模糊控制系统的设计[J]. 光电子·激光, 2010, **21**(3): 366-370)
- [42] NAKAGAWA K, YAMAMOTO A, TOYODA M. Performance test result of LUCE (Laser utilizing communications equipment) engineering model[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communication Technologies XII. San Jose: SPIE, 2000
 - [43] ARIMOTO Y, TOYOSHIMA M, TOYODA M, *et al.* Preliminary Result on Laser Communication Experiment Using (ETS-VI)[C]//Proceedings of the Proceedings-SPIE the International Society for Optical Engineering. San Jose: SPIE International Society for Optical, 1995
 - [44] TOLKER-NIELSEN T, OPPENHAUSER G. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communication Technologies XIV. San Jose: SPIE, 2002
 - [45] JONO T, TOYODA M, NAKAGAWA K, *et al.* Acquisition, tracking, and pointing systems of OICETS for free space laser communications[C]//Proceedings of the Acquisition, Tracking, and Pointing XIII. Orlando: SPIE, 1999
 - [46] SMUTNY B, LANGE R, KÄMPFNER H, *et al.* In-Orbit verification of optical inter-satellite communication links based on homodyne BPSK[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communication Technologies XX. San Jose: SPIE, 2008
 - [47] ANTONELLO R, BRANZ F, SANSONE F, *et al.* High-precision dual-stage pointing mechanism for miniature satellite laser communication terminals[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, **68**(1): 776-785
 - [48] CHEN Gang, DONG Zuoren, GENG Jianxin, *et al.* 155/622 Mb/s multiple transmitter laser communication systems[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(5): 583-587 (陈刚, 董作人, 耿健新, 等. 155/622 Mb/s 多发射器激光通信系统[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 583-587)
 - [49] TONG Shoufeng, JIANG Huilin, LIU Yunqing, *et al.* Optimum design of bandwidth for the APT coarse tracking assembly in free space laser communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(9): 16-20 (佟首峰, 姜会林, 刘云清, 等. 自由空间激光通信系统 APT 粗跟踪伺服带宽优化设计[J]. *光电工程*, 2007, **34**(9): 16-20)
 - [50] MENG Lixin, ZHAO Dingxuan, ZHANG Lizhong, *et al.* The test of tracking accuracy and design of airborne laser communication stabilized pod[J]. *Acta Armamentarii*, 2015, **36**(10): 1916-1923 (孟立新, 赵丁选, 张立中, 等. 机载激光通信稳瞄吊舱设计与跟踪精度测试[J]. *兵工学报*, 2015, **36**(10): 1916-1923)
 - [51] ZHANG Yuansheng, QIU Zhen'an, GUO Shuai, *et al.* Key technology analysis of airborne laser communication system and its verification[J]. *Electronics Optics & Control*, 2017, **24**(10): 80-84 (张元生, 仇振安, 郭帅, 等. 机载激光通信系统关键技术分析与试验验证[J]. *电光与控制*, 2017, **24**(10): 80-84)
 - [52] HU Yibo, MENG Lixin, BAI Yangyang, *et al.* Coarse tracking equivalent compound control technology for space laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, **60**(9): 0906004 (胡一博, 孟立新, 白杨杨, 等. 空间激光通信粗跟踪等效复合控制技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, **60**(9): 0906004)
 - [53] JIMÉNEZ J. Laser diode reliability: crystal defects and degradation modes[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2003, **4**(6): 663-673
 - [54] HORTELANO V, ANAYA J, SOUTO J, *et al.* Defect signatures in degraded high power laser diodes[J]. *Microelectronics Reliability*, 2013, **53**(9/10/11): 1501-1505
 - [55] SHI B, PINNA S, ZHAO H W, *et al.* Lasing characteristics and reliability of 1550 nm laser diodes monolithically grown on silicon[J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2021, **218**(3): 2000374
 - [56] ORTON J W. Reliability and degradation of semiconductor lasers and LEDs[J]. *Journal of Modern Optics*, 1992, **39**(8): 1799-1800
 - [57] FUKUDA M. Historical overview and future of optoelectronics reliability for optical fiber communication systems [J]. *Microelectronics Reliability*, 2000, **40**(1): 27-35
 - [58] HENDOW S, FALVEY S, NELSON B, *et al.* Overview of qualification protocol of fiber lasers for space applications[C]//Proceedings of the Solid State Lasers XV: Technology and Devices. San Jose: SPIE, 2006
 - [59] YABLON A D. Optics of Fusion Splicing[M]. Berlin: Springer, 2005
 - [60] BEAUVOIS G, CAUSSANEL M, LUPI J F, *et al.* Projet DROÏD: développement d'un dosimètre distribué à fibre optique[C]//Proceedings of the FMR2016: 7eme Journees sur les Fibres Optiques en Milieu Radiatif. 2016
 - [61] CHEYMOL G, LONG H, VILLARD J F, *et al.* High level gamma and neutron irradiation of silica optical fibers in CEA OSIRIS nuclear reactor[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, **55**(4): 2252-2258
 - [62] GRISCOM D L. Fractal kinetics of radiation-induced point-defect formation and decay in amorphous insulators: application to color centers in silica-based optical fibers[J]. *Physical Review B*, 2001, **64**(17): 174201
 - [63] REMY L, CHEYMOL G, GUSAROV A, *et al.* Compaction in optical fibres and fibre bragg gratings under nuclear reactor high neutron and gamma fluence[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, **63**(4): 2317-2322
 - [64] KAZAURA K, OMAE K, SUZUKI T, *et al.* Enhancing performance of next generation FSO communication systems using soft computing based predictions[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(12): 4958-4968
 - [65] WANG Y K, XU H Y, LI D Y, *et al.* Performance analysis of an adaptive optics system for free-space optics communication through atmospheric turbulence[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 1124
 - [66] JAHID A, ALSHARIF M H, HALL T J. A contemporary survey on free space optical communication: potentials, technical challenges, recent advances and research direction[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2022, **200**: 103311

- [67] LI H W, HUANG Y M, WANG Q, *et al.* Performance analysis of satellite-to-ground coherent optical communication system with aperture averaging[J]. *Applied Sciences*, 2018, **8**(12): 2496
- [68] GEISLER D J, YARNALL T M, STEVENS M L, *et al.* Multi-aperture digital coherent combining for free-space optical communication receivers[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(12): 12661-12671
- [69] SUN J, HUANG P M, YAO Z S, *et al.* Adaptive digital combining for coherent free space optical communications with spatial diversity reception[J]. *Optics Communications*, 2019, **444**: 32-38
- [70] WAINRIGHT E, REFAI H H, SLUSS JR J J. Wavelength diversity in free-space optics to alleviate fog effects[C]//Proceedings of the Free-Space Laser Communication Technologies XVII. San Jose: SPIE, 2005
- [71] HAMPSON K M, TURCOTTE R, MILLER D T, *et al.* Adaptive optics for high-resolution imaging[J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2021, **1**(1): 68
- [72] FÉTICK R J L, MUGNIER L M, FUSCO T, *et al.* Blind deconvolution in astronomy with adaptive optics: the parametric marginal approach[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, **496**(4): 4209-4220
- [73] JIANG L, DAI Z S, YU X, *et al.* Experimental demonstration of a single-mode fiber coupling over a 1 km urban path with adaptive optics[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2021, **42**(3): 363-370
- [74] JIAN H, KE D, CHAO L, *et al.* Effectiveness of adaptive optics system in satellite-to-ground coherent optical communication[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(13): 16000-16007
- [75] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of laguerre-gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, **45**(11): 8185
- [76] WANG J. Twisted optical communications using orbital angular momentum[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, **62**(3): 34201
- [77] WANG J, LIU J, LI S H, *et al.* Orbital angular momentum and beyond in free-space optical communications[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(4): 645-680
- [78] REN Y X, XIE G D, HUANG H, *et al.* Adaptive optics compensation of multiple orbital angular momentum beams propagating through emulated atmospheric turbulence[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(10): 2845-2848
- [79] HUANG H, CAO Y W, XIE G D, *et al.* Crosstalk mitigation in a free-space orbital angular momentum multiplexed communication link using 4×4 MIMO equalization[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(15): 4360-4363
- [80] RUCHI, SENTHILKUMARAN R P, PAL S K. Phase singularities to polarization singularities[J]. *International Journal of Optics*, 2020, **2020**(1): 2812803
- [81] SHEN Y, ROSALES-GUZMÁN C. Nonseparable states of light: from quantum to classical[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, **16**(7): 2100533
- [82] ZHANG Jianqiang, ZHAI Yanwang, FU Shiyao, *et al.* Propagation properties of radially-polarized vector beams under a turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(11): 1101001 (张建强, 翟焱望, 付时尧, 等. 径向偏振矢量光束在大气湍流下的传输分析 [J]. *光学学报*, 2020, **40**(11): 1101001)
- [83] ZHU Z Y, JANASIK M, FYFFE A, *et al.* Compensation-free high-dimensional free-space optical communication using turbulence-resilient vector beams[J]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1): 1666
- [84] YU Y, XU M F, PU M B, *et al.* Demonstration of 120 Gbit/s turbulence-resilient coherent optical communication employing cylindrical vector beam multiplexing[J]. *Optics Express*, 2023, **31**(25): 42165-42175
- [85] ZHANG Z, LIANG X L, GOUTSOULAS M, *et al.* Robust propagation of pin-like optical beam through atmospheric turbulence[J]. *APL Photonics*, 2019, **4**(7): 076103
- [86] HU N Z, ZHOU H B, ZHANG R Z, *et al.* Experimental demonstration of a “Pin-Like” low-divergence beam in a 1-Gbit/s OOK FSO link using a limited-size receiver aperture at various propagation distances[J]. *Optics Letters*, 2022, **47**(16): 4215-4218
- [87] XU Y, LAN B, LIU C, *et al.* Self-focusing pin-like optical vortex beams resist atmospheric turbulence propagation for the space optical communication[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Laser, Optics, and Optoelectronic Technology (LOPET 2023). Kunming: SPIE, 2023

作者简介



赵 云 男, 1996 年 2 月出生于吉林省通化市, 现为长光卫星技术股份有限公司光学工程师, 主要研究方向为波前探测、衍射光学系统设计等。
E-mail: 15754309307@163.com



陈茂胜 男, 1985 年 9 月出生于江苏省盐城市, 现为长光卫星技术股份有限公司研究员, 主要研究方向为光学遥感卫星总体设计等。
E-mail: chenms0911@aliyun.com