

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.260036.

专题:面向6G的无线光通信

王佳怡,周宇,郭秉礼,等.星地激光链路高可用关键技术与未来展望[J].光通信研究,2026(2):260036.

Wang J Y, Zhou Y, Guo B L, et al. Key Technologies and Future Prospects for High Availability of Satellite-Ground Laser Links[J]. Study on Optical Communications, 2026(2):260036.

## 星地激光链路高可用关键技术与未来展望(特邀)

王佳怡,周宇,郭秉礼,阎宽,黄善国

(北京邮电大学 电子工程学院 信息光子学与光通信全国重点实验室,北京 100876)

**摘要:**相较于射频(RF)通信,星地激光通信具有大带宽、高速率、高安全性和低功耗等核心优势,已成为构建空天地一体化信息网络、支撑第六代移动通信技术(6G)及未来卫星互联网发展的关键技术。文章系统梳理了国内外在星地激光通信方面的研究过程及发展现状,整理了近几年国内该领域的标准以及研究进展。重点聚焦于星地链路中的3项关键技术:自适应光学(AO)系统、大气湍流预测技术和星地捕获跟踪瞄准(ATP)技术,介绍了原理并探讨了未来发展方向,为相关领域的进一步研究提供了参考。

**关键词:**星地激光通信;自适应光学;大气湍流;捕获跟踪瞄准

**中图分类号:**TN929

**文献标志码:**A

### Key Technologies and Future Prospects for High Availability of Satellite-Ground Laser Links

WANG Jiayi, ZHOU Yu, GUO Bingli, YAN Kuan, HUANG Shanguo

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communication, School of Electronic Engineering, Beijing

University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Compared with Radio Frequency (RF) communication, satellite-to-ground laser communication offers significant advantages including ultra-large bandwidth, high data rates, enhanced security, and low power consumption. It is a key enabling technology for constructing integrated space-air-ground information networks and supporting 6th Generation Mobile Communication Technology (6G) and future satellite internet development. This paper systematically reviewed the research process and current development status of satellite-to-ground laser communication both domestically and internationally, and summarized recent Chinese standards and technical advancements in this field. The paper focuses on three critical technologies in satellite-to-ground optical links: Adaptive Optics (AO) systems, atmospheric turbulence prediction techniques, and Acquisition, Tracking and Pointing (ATP) technologies. The paper elaborated on their underlying principles, presented recent research progress, and highlighted representative achievements. Furthermore, it discussed future development trends to provide a reference for ongoing and prospective research in this domain.

**Key words:** satellite-to-ground laser communication; AO; atmospheric turbulence; ATP

## 0 引言

天地一体化信息网络是科技强国的重要标志,也是国家新型基础设施体系的核心组成部分。根据国家整体规划,2030年将建成全球覆盖、按需服务、随域接入和安全可信的信息网络,服务国防建设和社会发展<sup>[1]</sup>。星地激光通信是实现海量信息高速传输的重要手段,将在构建天地一体化网络中发挥重要作用,也是各国航天机构研究的重要方向。美国、欧洲和日本早在20世纪90年代便开启了相关的理论研究和实验验证,而中国虽起步相对较晚,但发展迅猛、成果显著,已跻身世界前列。

决定星地激光链路通信质量的关键技术有自适应光学(Adaptive Optics, AO)系统设计、大气湍流预测与补偿技术、高精度捕获跟踪瞄准(Acquisition, Tracking and Pointing, ATP)系统、高性能光收发模块和先进调制与编码方案等。随着遥感、气象、导航及商业航天等领域的迅猛发展,星上数据量呈指数级增长,星地激光通信凭借着大带宽、低时延和高安全特性等优势,正成为支撑未来高速、大容量和安全可靠信息传输的战略关键。本文对当前美、欧、中的星地激光通信研究现状进行了梳理,对近几年国内相关标准的制定进展进行了整理,重点介绍了AO系统、大气湍流预测技术和星地ATP技术,

收稿日期:2026-01-31; 修回日期:2026-03-03; 纸质出版日期:2026-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62401082)

作者简介:王佳怡(2002-),女,黑龙江哈尔滨人。硕士,主要研究方向为光通信与光传输系统。

通信作者:周宇,特聘副研究员。E-mail:zhouyu@bupt.edu.cn

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

探讨了其未来发展趋势与演进方向。

## 1 星地激光通信发展概述

随着航天事业的发展,卫星与地面进行高质量通信的需求与日俱增。星地激光通信作为实现高速空间信息传输的关键技术,近年来在链路速率、系统稳定性与工程化应用等方面取得了显著进展,已成为支撑低轨卫星星座、遥感数据实时回传及未来天地一体化网络的核心使能手段。

### 1.1 国内外研究进展

#### 1.1.1 美国

作为最早开展相关实验的国家之一,美国以喷气推进实验室、国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和一些商业公司为首,系统推进了星地激光通信从概念验证、在轨试验到工程应用的全链条技术发展,奠定了其在全球自由空间光通信(Free-Space Optical Communication, FSOC)领域的领先地位。

1995年,美国喷气推进实验室与日本通信研究实验室共同开展了地面/轨道飞行器激光通信验证(Ground/Orbiter Lasercomm Demonstration, GOLD)<sup>[2]</sup>,该实验利用日本的工程试验卫星(Engineering Test Satellite, ETS)-VI卫星及其星载激光通信终端,与美国加州桌山设施的激光地面站建立链路,是国际首个在地球静止轨道(Geostationary Orbit, GEO)高度实现双向星地激光通信的在轨验证,为后续的在轨激光通信试验奠定了重要技术基础。

2013年, NASA成功开展了月球激光通信验证(Lunar Laser Communication Demonstration, LLCD)试验<sup>[3]</sup>,首次实现了绕月卫星与地球上多个地面站之间的高速双向激光通信。在此次验证中,建立了当时人类历史上距离最远的激光通信链路,并实现了当时地月之间最高通信数据速率,其上行通信速率为20 Mbit/s,下行通信速率最大可达622 Mbit/s。

2021年, NASA开展了激光通信中继验证(Laser Communications Relay Demonstration, LCRD),是其首个高轨双向激光中继在轨验证项目,成功验证了高轨激光中继的可行性。作为承前启后的关键任务, LCRD为后续国际空间站相关实验及计划中的近地轨道激光通信网络提供了核心技术和运行范式,标志着空间激光通信向业务化和网络化迈出了重要一步<sup>[4-10]</sup>。

2025年, NASA计划部署激光通信近地卫星系

统(Laser Optical Communications Near-Earth Satellite System, LOCNESS)<sup>[11-12]</sup>的首颗中继卫星,作为其下一代激光中继系统的第1个节点,并计划最终利用3个近地卫星中继节点构建激光通信网络,实现全球覆盖,以弥补目前射频网络有限的数据传输能力。该系统的架构示意图如图1所示。

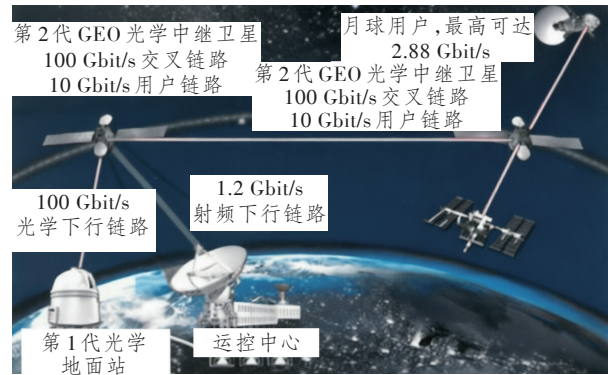


图1 LOCNESS架构示意图

Figure 1 Schematic diagram of LOCNESS architecture

#### 1.1.2 欧洲

2016年,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)与德国空中客车防务与航天公司合作建成并正式运行了欧洲数据中继系统(European Data Relay System, EDRS)<sup>[13-14]</sup>,成为全球首个投入业务化运营的空间激光通信网络,其初期依托GEO卫星EDRS-A(搭载于Eutelsat 9B),为哨兵系列等低轨遥感卫星提供最高1.8 Gbit/s的星间激光链路服务。

2019年,专用中继卫星EDRS-C成功发射,与EDRS-A组成双节点星座,显著提升了系统容量与可用性,服务可靠性达99.7%以上。同期, ESA启动EDRS Global(原GlobeNet)计划,确定于2025年新增第3颗中继节点EDRS-D,由日本JSAT公司提供平台,面向亚太区域提供服务,旨在实现全球覆盖,标志着空间激光通信从区域性数据中继迈向全球、安全和准实时业务化网络的关键演进。

2024~2026年,作为ESA“ScyLight”(SeCure and Laser Communication Technology)计划下的旗舰项目,高吞吐量光网络(High Throughput Optical Network, HydRON)<sup>[15-17]</sup>将进入关键的在轨演示阶段。该阶段将不仅展示端到端透明光传输能力,还将为未来业务化空间光网络奠定工程实施路径、互操作标准(如空间数据系统咨询委员会提出的高光子效率协议)与商业运营模式的基础,标志着欧洲向全球高速、安全和弹性空间信息基础设施迈出了实质性一步。

### 1.1.3 中国

我国在星地激光通信领域的研究起步相对较晚。在 20 世纪 90 年代,哈尔滨工业大学和中科院上海光机所等单位已开展 FSOC 基础理论与地面验证研究,但受限于精密光学、高速光电探测、高精度跟瞄及大气湍流补偿等关键技术瓶颈,长期处于实验室和地面链路试验阶段。进入 21 世纪后,随着国家对高通量天基信息传输需求的日益迫切,尤其是高分辨率遥感、全球快速重访星座和未来第六代移动通信技术(6th Generation Mobile Communication Technology, 6G)卫星互联网的发展驱动,星地激光通信被逐步纳入国家重大科技专项与航天工程体系。

近年来,我国星地激光通信技术实现了跨越式发展,已从原理验证迈入超高速率、业务化应用与星座组网的新阶段。2011 年,哈尔滨工业大学马晶和谭立英团队在“海洋二号”卫星上成功完成了国内首次星地激光通信在轨链路试验,实现了低轨卫星与地面站间稳定光信号捕获跟踪与数据传输,填补了国内星地激光通信试验的空白<sup>[18-19]</sup>,为后续工程化

奠定了基石。

2016 年,由中国自主研发的全球首颗量子科学实验卫星“墨子号”成功发射<sup>[20]</sup>,成功建立了低地球轨道卫星与光学地面站之间的双工激光通信链路,其中下行链路基于 1 550 nm 波段的相干激光通信,速率高达 5.12 Gbit/s;上行链路则采用 1 064 nm 波段的脉冲位置调制信号,速率为 20 Mbit/s。在未部署 AO 系统的情况下,下行链路在持续 306 s 的通信过程中平均误码率为  $1.9 \times 10^{-9}$ ,而上行链路的误码率低于  $10^{-6}$ ,技术指标达到同期国际先进水平。

2023 年,中国科学院空天信息创新研究院联合长光卫星技术股份有限公司,利用自主研发的 500 mm 口径车载激光通信地面站与“吉林一号”MF02A04 卫星成功完成了 10 Gbit/s 星地激光通信业务化应用试验,数据误码率低于  $10^{-9}$ ,遥感影像质量通过严格验证,标志着长光卫星已经成功实现星地激光高速图像传输全业务链的工程化,工程应用能力达到国际先进水平,这也是我国首次自主实现业务化应用星地激光高速图像传输试验<sup>[21]</sup>。“吉林一号”星座组网卫星示意图如图 2 所示。



图 2 “吉林一号”星座组网卫星示意图

Figure 2 Schematic of “Jilin-1” constellation networking satellite

随后在 2024 年 12 月,长光卫星技术股份有限公司成功开展了国内首次星地激光 100 Gbit/s 超高速高分辨遥感影像传输试验。该项试验是长光卫星继星地 10 Gbit/s、星间 100 Gbit/s 激光数传试验成功后的又一项重大突破,标志着我国在星间/星地融合构建超高速光网传输领域迈出了重要一步。

### 1.1.4 国内外研究进展总结

自 20 世纪 90 年代起,在 FSOC 相关理论体系逐渐完备、航天技术设备与载荷能力也得到提升的背景下,星地激光通信逐步由早期的理论探索与地面验证阶段迈向了在轨实验验证的新阶段。美国、

欧洲和日本等航天强国和地区率先布局空间激光通信技术,依托低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)、GEO 乃至深空平台,持续开展了一系列具有里程碑意义的在轨演示与工程验证。相比之下,中国在该领域起步相对较晚,但近年来发展迅猛,在空间光通信核心技术上也已跻身国际前列。表 1 系统梳理了各国在星地激光通信方向的典型项目,横向对比了各国在星地激光通信领域的关键技术参数以及代表性技术突破,呈现了不同国家在发展时间线、卫星平台类型和波长与速率演进等方面的异同与进展趋势。

表1 各国典型项目总结  
Table 1 Summary of typical projects in various countries

国家	年份	项目名称	卫星平台类型	通信波长/nm	通信速率/bit/s	关键信息
美国	1995	GOLD	GEO	↑ 514.5 ↓ 830.0	↑ 1.024 M ↓ 1.024 M	国际首个在 GEO 高度实现双向星地激光通信的在轨演示
	2013	LLCD	月球轨道卫星	↑ 1 064.0 ↓ 1 550.0	↑ 20 M ↓ 622 M	世界首次地月激光通信,验证了 $4 \times 10^5$ km 距离下的高速光链路可行性
	2021	LCRD	GEO	↑ 1 555.0/1 565.0 ↓ 1 545.0	↑ 20 M ↓ 622 M	NASA 首个高轨双向激光中继在轨验证项目
	2022	TBIRD <sup>[22-24]</sup>	LEO	↑ 1 064.0 ↓ 1 550.0	↑ 2 k ↓ 200 G	创星地激光通信速率世界纪录
	2025	LOCNESS	GEO	1 550.0	↑ 10 G ↓ 100 G	NASA 计划中的下一代激光中继系统
欧洲	2016	EDRS-A	GEO	1 064.0	1.8 G	全球首个业务化星间激光通信系统
	2019	EDRS Global	LEO-GEO	↓ 1 064.0	↓ 1.8 G	实现常态化激光中继服务
	2025	HydRON	LEO-GEO	1 064.0/1550.0	100 G	ESA 下一代光通信旗舰项目,将首次在欧洲系统中集成星地激光下行链路,迈向全光空间网络
中国	2011	海洋二号	LEO	↓ 1 550.0	↓ 504 M	国内首次星地激光通信在轨链路试验
	2016	墨子号	LEO	↑ 1 064.0 ↓ 1 550.0	↑ 20 M ↓ 5.12 G	全球首颗量子卫星,技术指标达到国际先进水平
	2023	吉林一号	LEO	↓ 1 550.0	↓ 10 G	中国首个业务化星地激光通信链路
	2024	吉林一号	LEO	↓ 1 550.0	↓ 100 G	国内首次星地 100 Gbit/s 超高速激光通信试验成功

注: ↑表示上行链路,指地面站到卫星; ↓表示下行链路,指卫星到地面站; TBIRD 为太字节红外传输。

由表可知,星地激光通信技术正朝着更高通信速率、更远传输距离和业务化应用方向快速发展。从早期 Mbit/s 级的在轨验证,到如今实现百 Gbit/s 级的通信试验,星地激光通信速率显著提升;链路距离也从近地轨道拓展至地月空间,验证了深空光通信的可行性。同时,各国的关注点正由技术试验转向业务运行,如欧洲 EDRS 和中国“吉林一号”已开展常态化激光中继服务。此外,各国普遍采用 1 550 与 1 064 nm 波段组合,兼顾大气透过率与器件成熟度,体现出技术路线的趋同性。

## 1.2 标准进展

随着星地激光通信技术从在轨验证迈向工程应用与规模化部署,其标准化工作日益成为支撑产业协同、保障系统互操作性、推动国际兼容与市场准入

的关键基础。近年来,国内外科研机构、标准化组织及航天企业围绕激光通信开展了大量标准预研与体系构建工作。如表 2 所示,本文归纳了近年来国内的标准研究现状与已正式发布或立项的相关标准清单。

当前我国的星地通信发展正朝着激光微波融合的方向演进,研究热点聚焦于空间光通信的工程化与系统集成等工作。激光器和微波激光一体化终端等核心器件性能成为突破星地链路性能极限的关键,空间激光链路组网架构和光器件的标准化为空地一体化光网络的部署运维奠定了基础。这些关键技术和标准体系将共同支撑下一代星地激光通信系统,加速 6G 时代全域覆盖的实现。

表 2 近年相关标准研究现状

Table 2 Current research status of relevant standards in recent years

类别	名称	类型	TC/WG/ 标准号	牵头单位	计划完成时间/ 发布日期
关键 器件	微波激光一体化的星地通信设备及关键技术研究	研究课题	TC12/WG4, TC6/WG1	中兴通讯股份有限公司、上海垣信卫星科技有限公司、中国信息通信科技集团有限公司、博鼎实华(北京)技术有限公司	2027-09-02
	空间光通信用光器件第1部分：窄线宽激光器	行业标准	TC6/WG4, TC12/WG3	中国信息通信科技集团有限公司、中国信息通信研究院、中国移动通信集团有限公司	2026-12-12
	空间光通信用关键光器件技术研究	研究课题	TC6/WG4	中国信息通信研究院、中国电信集团有限公司、中国信息通信科技集团有限公司	2026-02-02
组网架 构与网 络技术	基于空间光传送网的星地融合组网架构与关键技术研究	研究课题	TC12/WG3, TC6/WG1	中国移动通信集团有限公司、中国信息通信研究院	2027-02-24
	星地融合网络确定性传送技术研究	研究课题	TC12/WG3	航天恒星科技有限公司、中国联合网络通信集团有限公司、北京邮电大学、中国移动通信集团有限公司	2026-08-22
	星地融合网络实时通信技术研究	研究课题	TC12/WG2	中国移动通信集团有限公司、中国联合网络通信集团有限公司、中国电信集团有限公司、中国移动通信集团设计院有限公司	2026-08-22
星地链 路传输 技术	低轨卫星 ka 频段星地间信道模型	协会(团体) 标准	TC12/WG1	银河航天(北京)科技有限公司、北京邮电大学、中国信息通信研究院	2025-08-31
	大气激光通信的安全隔离设备技术要求	行业标准	YD/T 6490- 2025	郑州信大捷安信息技术股份有限公司、中国信息通信研究院、中国信息通信科技集团有限公司	2025-07-02
	空间光通信关键技术及应用研究	研究课题	SR 511-2025	中国信息通信研究院、中国移动通信集团有限公司、中国联合网络通信集团有限公司、中国卫星网络集团有限公司	2025-06-24
行业应 用与业 务适配	面向电力行业的星地融合无线通信技术研究	研究课题	TC12/WG1	中国电力科学研究院有限公司、北京邮电大学、中国电信集团有限公司、中国信息通信研究院	2026-08-22
	北斗短报文星地融合通信业务总体要求	行业标准	TC12/WG3	中国移动通信集团有限公司、中国信息通信研究院、华为终端有限公司、中国电信集团有限公司	2025-10-23
	基于物联网低轨星座的星地融合与短消息互通技术方案研究	研究课题	TC12/WG3	中国联合网络通信集团有限公司、北京邮电大学	2025-08-15
	面向多种应用场景的星地融合终端技术研究	研究课题	TC12/WG1	北京紫光展锐通信技术有限公司、中国信息通信科技集团有限公司、中国电信集团有限公司、中国卫通集团股份有限公司	2024-10-28

## 2 关键技术分析

### 2.1 抗大气湍流技术

地球大气中温度、压力和风速的不均匀分布,导致空气微团发生无规则的三维随机流动,造成大气湍流现象。在星地激光通信链路中,这种大气湍流对通过大气传输的激光光束的质量有显著影响。湍流会导致光束的漂移、强度闪烁、指向抖动和波前畸变,进而导致接收信号功率起伏、信噪比下降和

误码率升高,严重影响通信系统的运行<sup>[25]</sup>。

作为FSOC的核心应用场景之一,星地链路对高可靠性与高稳定性提出了极高要求。为了有效抑制大气湍流给系统带来的负面影响,目前已经有许多技术方案被提出并成功应用于实际系统中,包括AO系统、孔径平均、空间分集、信道编码和大气湍流预测与补偿算法等。表3系统梳理了当前主流的大气湍流抑制技术。

表3 当前主流的大气湍流抑制技术

Table 3 Current mainstream atmospheric turbulence suppression technologies

名称	基本原理	优势	局限
AO	实时探测波前畸变,通过波前校正进行动态补偿。	效果显著。	系统复杂,成本高。
孔径平均 <sup>[26-28]</sup>	利用大接收孔径对光强闪烁进行空间平均。	结构简单有效。	存在饱和效应,制造难度高,增加了接收机的尺寸和重量。
空间分集 <sup>[26,29-31]</sup>	通过多天线/多路径接收各路信号并合并。	可突破孔径平均的饱和限制,工程灵活,成本低,支持多用户。	合并复杂度高,光纤耦合损耗,接收端尺寸要求大,在热噪声受限场景下效果有限。
信道编码 <sup>[32-37]</sup>	在发送端添加冗余比特,接收端利用纠错码检测并纠正误码。	与调制兼容性好,成本低,显著降低误码率,不牺牲尺寸重量开销等。	延迟大,占用额外的功率和带宽,无法改善信号波形失真。
大气湍流预测与补偿算法	利用历史数据训练模型,预测湍流并预补偿。	可与AO/FEC融合,具有前瞻性和实时性。	依赖高质量训练数据,泛化能力待验证。

注:FEC为前向纠错。

在众多策略中,AO系统是目前最成熟、最直接且工程应用最广泛的补偿手段,大气湍流预测算法则代表了近年来人工智能与大气物理模型结合的新兴方向。二者直接针对星地激光通信中光束畸变与闪烁的核心挑战,具有技术代表性与研究前瞻性,因此下文将主要探讨这两种关键手段。

#### 2.1.1 AO系统

在星地相干光通信中,大气湍流使接收到的光波相干性下降,严重破坏了入射光场与单模光纤基模之间的空间和相位匹配,导致耦合效率骤降至个位数甚至更低,从而导致较高的误码率。随着近年来技术的发展进步,AO系统逐渐成为抗大气湍流问题的主流技术。AO系统能够实时探测大气引起的波前畸变,并通过波前校正进行动态补偿,恢复光束质量。

根据波前传感器的类型不同,AO系统可分为有波前传感和无波前传感两种。前者利用夏克哈特曼波前传感器(Shack-Hartmann Wavefront Sensor, SHWFS)、曲率波前传感器或剪切干涉波前传感器等直接测量畸变相位;后者则无需传感器,通过优化接收光强和耦合功率等性能指标,由优化算法间接

实现对波前误差的校正,适用于信标光缺失或波前传感困难的场景。其原理如图3所示。AO系统包括波前传感/波前探测、波前控制和波前校正3个主要环节,其中波前传感/波前探测用于探测波前畸变误差,波前控制根据探测的误差计算相应的校正指令,最后驱动波前校正器高频调整镜面形状以进行相应的补偿<sup>[38]</sup>。

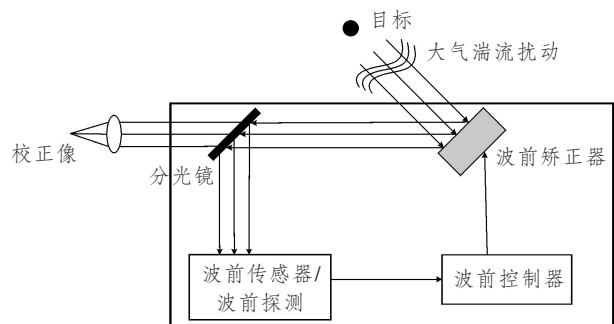


图3 AO原理图

Figure 3 Schematic of AO

通过AO这一机制,可有效校正由大气湍流引起的波前相位畸变,显著提升入射光场与接收单模光纤基模之间的模式匹配度,从而大幅提高耦合效率。这一过程不仅有效抑制了大气湍流导致的信号

衰落<sup>[39-40]</sup>,还显著增强了FSOC链路的稳定性与接收性能。

近期实验表明,一种新型二元相位混合(Binary Phase Hybrid,BPH)-SHWFS结合神经网络在强湍流条件下展现出了优越性能<sup>[41]</sup>:相比传统传感器,其在相同空间采样率下能更准确地感知高阶波前畸变;即使子孔径稀疏排布,仍可实现精确重构,显著提升波前校正精度与后续光纤耦合效率。该方法突破了传统波前传感的空间分辨率限制,为高鲁棒性星地光通信中的AO校正提供了有效技术路径。

在无波前传感的AO系统研究方向上,高世杰等人引入了一种改进的蜚螂优化算法<sup>[42]</sup>,在达到相同校正效果的前提下,基于改进蜚螂优化算法的波前校正系统在各种湍流条件下均表现出显著优势,校正速度最低提高了80%。此外,改进后的算法展现出更强的全局搜索能力,有效抑制了陷入局部最优解的问题,同时表现出更高的收敛稳定性和鲁棒性,进而显著提升了相干FSOC系统的整体通信性能。

### 2.1.2 大气湍流预测算法

为应对大气湍流扰动而发展起来的另一种技术是大气湍流预测算法,其核心原理是利用历史或者实时观测到的大气湍流引起的光信号畸变信息,通过数学建模与算法预测未来短时间内信道的状态变化,将预测结果预报给星地通信传输系统,从而提前开展例如星地通信链路优化和AO系统调度等工作,以减轻甚至抵消大气湍流带来的负面影响。大气湍流预测的工作主要集中在预测折射率结构常数 $C_n^2$ 廓线以及其他相关的参数上,例如大气视宁度、波前相干时间和等晕角等。为构建可靠的预测模型,通常需依赖湍流的统计先验知识,其中最基础的是Kolmogorov湍流理论所给出的折射率起伏三维功率谱密度 $\Phi_n(\kappa)$ :

$$\Phi_n(\kappa) = 0.033C_n^2\kappa^{-\frac{11}{3}}, \quad (1)$$

式中, $\kappa$ 为三维空间波数。该表达式虽描述的是静态统计特性,却为建立时间相关模型提供了物理依据,是当前主流湍流预测算法的重要起点。

随着硬件设备的升级与软件算力的提升,现阶段大气湍流预测的几种技术手段有:较为成熟与广泛应用的中尺度数值预报方案、依托人工神经网络和深度学习的数据驱动预报方案、面向短时高精度应用的混合建模策略等<sup>[43]</sup>。使用中尺度数值天气预报模型预报大气湍流,如天气研究与预报模式(Weather Research and Forecasting Model,WRF)、非静力中尺度模式(Mesoscale Non-Hydrostatic model,Meso-NH)和第5代中尺度模式(Fifth-Generation Mesoscale Model,MM5)等<sup>[44-46]</sup>,这一方案具备坚实的理论基础和大范围适用性,在全球范围内得到了广泛应用。随着深度学习方法的日渐成熟,利用深度学习进行大气湍流预测工作已成为研究的热门话题。此类技术方案是利用卷积神经网络<sup>[47]</sup>、混沌神经网络、最小绝对收缩与选择算子(Least Absolute Shrinkage and Selection Operator,LASSO)回归、随机森林和第3代气象网络(Meteorological Network version 3, MetNet-3)等模型<sup>[48-51]</sup>从历史气象与实测湍流数据中学习非线性映射关系,但跨区域泛化能力有待提升。

针对AO系统固有延迟导致补偿滞后的问题,Wang等人首次在3km真实激光传输链路中部署了深度学习时空预测网络(Spatiotemporal Prediction Network,STP-Net)模型<sup>[52]</sup>,实验系统如图4所示。该方法能够将残余波前均方根(Root Mean Square,RMS)降至 $0.0603\lambda$ ( $\lambda$ 为系统所用激光的波长),与传统比例-积分(Proportional-Integral,PI)控制策略相比,闭环性能提高了约33.9%,光束质量因子 $\beta$ 提升至1.57,显著增强了校正带宽与能量集中度。

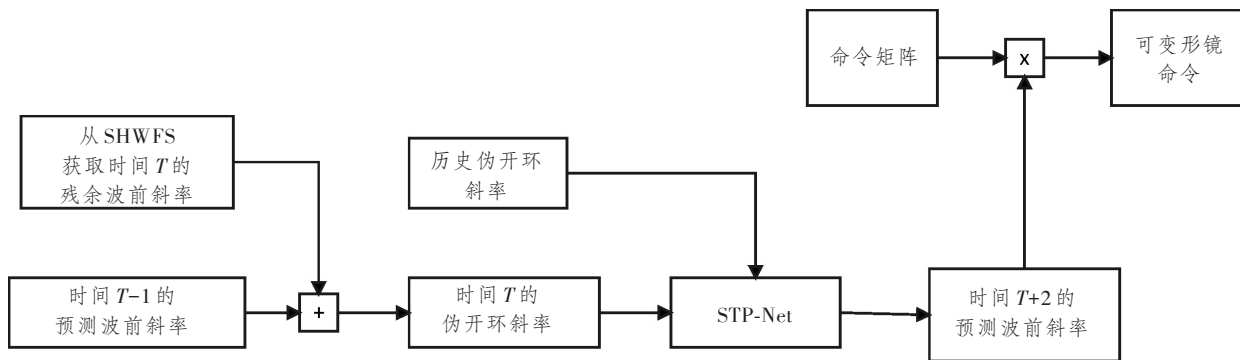


图4 带有STP-Net模型的闭环AO系统的一次迭代流程

Figure 4 One iteration of the closed-loop AO system with the STP-Net model

同年,Guo 等人开发的光场式广域波前传感器<sup>[53]</sup>(Wide-field Wavefront Sensor, WWS)可实现 1 100 角秒视场、30 Hz 帧率的湍流直接观测,并基于广域数据利用卷积神经网络成功预测了未来 33 ms 的湍流动态,为星地链路提供了高精度前馈预补偿所需的全域时空先验信息。

### 2.2 ATP 技术

由于星地激光通信光束束散角极窄,通常在微弧度量级,能量几乎集中于传输方向上,加之有卫星的相对飞行运动、平台微振动和大气湍流的扰动等多重干扰,极易使光轴失准,发射光斑无法持续对准远端接收口径,导致通信链路的中断。因此,星地跟踪系统的设计尤为关键,即 ATP 系统,是对星地激光链路的可用性、稳定性和通信速率的重要保障。ATP 系统的核心需求是迅速建立通信链路,维持通信链路的长期稳定,并具备断链后快速重建的能力,其基本工作流程如图 5 所示,为了快速建立并稳定维持可靠的星地通信链路,关键技术有瞄准、快速捕

获和高精度跟踪,其中各阶段的主要误差来源与抑制手段如表 4 所示。

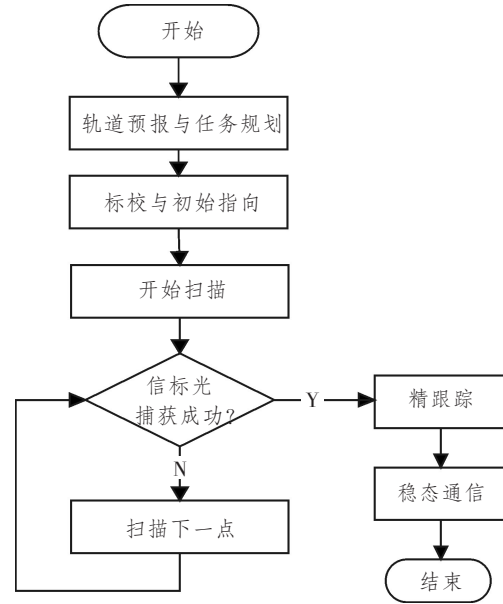


图 5 ATP 系统工作流程图

Figure 5 ATP system workflow

表 4 ATP 系统各阶段主要误差

Table 4 Main errors in each stage of the ATP system

阶段	误差源	误差影响	抑制手段
瞄准	星历表/轨道预测误差	带来初始指向方向误差。	精密单点定位和实时轨道修正。
	时间不同步	瞄准失准。	高精度时间同步。
	姿态测量误差	本体姿态失准。	多传感器融合和在轨姿态标定。
捕获	大气衰减与散射	信标光强度衰减,终端难以探测,接收率下降,引入噪声带来波前像差。	提升信标光功率、建立模型与修正算法。
	背景光干扰	降低信标光信噪比。	窄带滤光片、时域滤波、偏振滤波器和编码调制。
	扫描策略不匹配	搜索效率低,捕获用时长。	研究高效率扫描算法。
跟踪	平台抖动干扰	影响激光视轴的稳定性,捕获成功率将大大降低。	加隔振台、减震器和高闭环带宽控制系统补偿。
	大气湍流	光束发生随机漂移、扩展和闪烁,脱靶量增大。	AO、差分探测和高闭环带宽控制。
	探测器误差和光斑位置检测误差	引入脱靶量精度误差。	改善器件性能和优化光斑检测算法。
	机械摩擦力矩误差	引入误差,降低跟踪精度。	改进伺服机构控制算法。
	终端相对运动	带来动态滞后误差。	引入预测算法和提高采样率。

#### 2.2.1 星地激光瞄准技术

在跟踪初始阶段,星上终端和地面终端根据星历表和轨道动力学模型、自身姿态参数等计算出对方的大致方位,调整光学天线实现粗对准。在此瞄准阶段,星历表或光学仪器本身的误差、卫星的相对运动和大气湍流扰动等都会对瞄准造成影响,由此造成的瞄准偏离不仅会增加通信建立链路的时间,

也会增加光信号的能量损耗。为了解决这些问题,通常需要采用多种标校与瞄准技术。例如利用已知恒星位置进行指向校正的恒星标校<sup>[54-55]</sup>、借助邻近卫星信标实现的星间标校以及结合全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)数据辅助等。针对相对运动产生的附加移动,发射机必须提前附加一个预瞄准量,即将光束指向接收机的

超前预计点才能保证准确瞄准,此过程称为超前对准(Point Ahead)<sup>[56]</sup>,其示意图如图 6 所示。

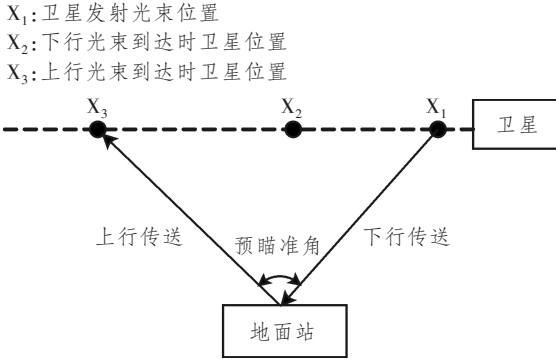


图 6 预瞄准示意图

Figure 6 Schematic of pre-targeting

### 2.2.2 快速捕获

在完成预瞄准后,星地双方虽已大致指向彼此,但由于星历表误差、姿态测量偏差、大气湍流及超前对准计算残余误差等因素,实际光轴仍可能存在毫弧度量级的偏差,尚不足以直接进入稳定跟踪。此时需要启动扫描捕获流程,以在通信窗口内高效建立光通信链路。

捕获流程通常由一终端发射信标光,由另一终

端在不确定域内进行扫描,捕获来自目标的信标光。根据参与扫描的终端数量,该过程可分为单端扫描(即仅接收端扫描和发射端凝视)和双端扫描(即收发双方同时进行协同扫描)。扫描方式主要有光栅扫描、螺旋扫描、螺旋光栅复合式扫描、玫瑰形扫描和李萨如扫描等<sup>[57]</sup>,如图 7 所示。各种扫描方式的优劣对比如表 5 所示,其中光栅扫描和螺旋扫描是最常用的扫描方式<sup>[58]</sup>。

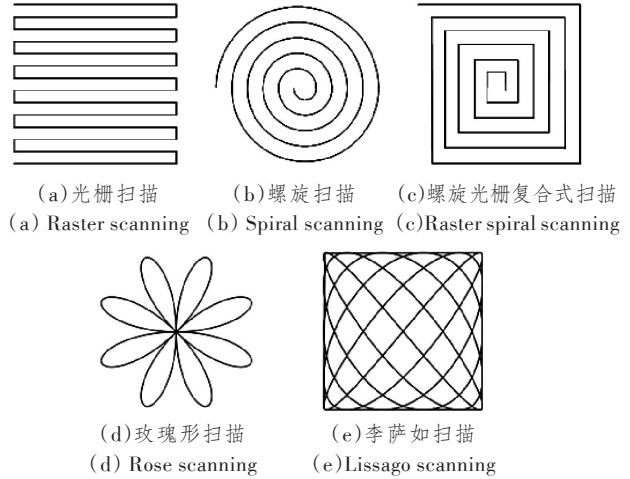


图 7 扫描方式

Figure 7 Scanning method

表 5 扫描方式对比

Table 5 Comparison of scanning methods

扫描方式	优势	劣势
光栅扫描	覆盖规则和实现简单。	拐角存在盲区 and 效率低。
螺旋扫描	中心优先和效率高。	边缘覆盖稀疏 and 扫描盲区随圈数的增大而增大。
螺旋光栅复合式扫描	中心优先、高效和边缘完整无盲区。	实现难度大 and 控制逻辑复杂。
玫瑰形扫描	中心优先和受平台振动影响小。	参数敏感、轨迹易重叠 and 遗漏及实现复杂度高。
李萨如扫描	轨迹对称和填充性强。	参数敏感 and 需要精确时间同步。

除了以上扫描轨迹外,捕获扫描还涉及扫描模式的区别。经典的扫描模式包括兼顾覆盖效率与响应速度的跳步扫描以及虽牺牲速度但可显著提升弱信标识别的可靠性的停-等扫描。这些方式和策略的选择需综合考虑平台机动能力、探测器性能、信噪比及不确定区域大小等因素,以实现快速稳定的初始链路建立。

若捕获成功,能够稳定探测到对方的信号光,即停止扫描过程并进入到闭环跟踪阶段。

### 2.2.3 高精度跟踪

在瞄准与扫描捕获工作完成后,星地之间建立了初始光链路,系统随即进入高精度跟踪阶段。此时传感器误差、大气湍流的扰动以及平台抖动等可能导致光斑偏离探测器视场的中心位置,是影响链

路的关键因素。其中,大气湍流引起的光强闪烁在中强湍流条件下通常采用 Gamma-Gamma 分布进行建模,来描述大气湍流影响下的接收端光强衰减,接收端光强  $h_c$  的概率密度函数  $f_{h_c}(h_c)$  可表示为

$$f_{h_c}(h_c) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\gamma} \left(\frac{h_c}{\gamma}\right)^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta h_c}{\gamma}}\right), \quad (2)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; $K_x(\cdot)$ 为  $x$  阶第 2 类修正 Bessel 函数; $\gamma$  为尺寸参数; $\alpha$  和  $\beta$  分别为大尺度和小尺度湍流有效数。

为实现稳定跟踪,典型高精度跟踪系统采用误差感知和误差补偿的闭环架构。误差感知方面,四象限探测器(Four-Quadrant Detector, FQD)具备响

应快、灵敏度高和结构简单等优势,因其良好的性能和出色的性价比成为首选传感器之一<sup>[59]</sup>。当接收光斑偏离视场中心时,FQD 迅速感知,通过差分电流信号实时解算质心偏移量,生成误差信号。误差补偿方面,FQD 生成的误差信号经高通与低通滤波分离后,馈入由快速转向镜(Fast Steering Mirror, FSM)构成的高精度跟踪回路,驱动反射镜面快速偏转,动态调整光束指向,使激光中心回归探测器中心,实现补偿校正。2024年,陈加文等人提出了一种基于最小二乘平滑优化的卡尔曼滤波多步预测方法<sup>[60]</sup>,在合理设定采样、控制和预测步长后,数据利用率最高可达100%,系统稳定性提升了16.7%,并显著提升了系统的跟踪精度。此外,误差隔离也是保障跟踪性能的关键手段,如采用二级隔振技术可以提高系统对平台动态特性的适应性。

### 3 发展趋势

面向未来高速、可靠和常态化运行的星地激光通信系统,抗大气湍流技术将朝着智能化、多技术融合与高实时性方向协同发展,具体而言:

①AO系统将持续向更高校正能力、更强探测灵敏度、更简化的结构和更高稳定性演进。器件层面,传统的波前传感器,如曲率传感、剪切干涉和四棱锥传感及哈特曼波前传感技术等,其系统部署成本高、动态测量范围有限,难以准确测量大幅度的波前畸变,在弱光、高阶像差及紧凑系统中的表现也尤为受限。为了应对上述挑战,新型波前传感器和无波前传感AO系统正快速发展,如基于四波横向剪切干涉的器件,具有精度高、动态范围大、分辨率高和抗干扰能力强的优势<sup>[61]</sup>。对于波前校正器,持续提升精度和单元密度、响应速度与形变范围是研究的关键方向。算法层面,无波前传感AO技术借助深度学习等人工智能方法,有望突破传统优化算法收敛慢、易陷局部最优的瓶颈。通过端到端图像优化策略,系统可直接从成像质量指标映射至校正器控制信号,绕过传统波前重建环节,降低计算延迟;同时,强化学习与多模态数据融合能够增强系统在复杂或未知环境下的自适应能力。

②大气湍流预测算法通过融合中尺度数值模式、高分辨率遥感观测和深度时序神经网络等机制,可构建分钟级和百米级精度的短临预报能力,为AO系统提供先验引导,实现预测校正一体化的主动抗扰机制。算法方面,中尺度数值预报方法较为

成熟且应用广泛,能够刻画近地面至平流层低层的大气动力与热力结构,然而其计算开销大、更新频率受限,且对小尺度、快速演变的湍流结构解析不足,需发展更高时空分辨率、更快速和更高更新频率的预报流程,并强化对边界层内小尺度过程的参数化表达。基于深度学习的时序建模技术可从历史波前或差分图像序列中高效提取湍流动态特征,在不依赖完整物理方程的前提下快速生成未来数帧的畸变预测,具备低延迟和高吞吐的优势。但其泛化能力易受训练数据分布限制,在极端或未见过的大气条件下可能出现预测失稳。未来,预测与自适应的协同框架或将成为主流。湍流预报提前优化通信窗口与AO初始参数,AO系统则在链路建立后进行精细补偿,二者深度融合,共同支撑星地激光通信在复杂大气环境下的高可用度、高吞吐量与无人值守自动化运行。

同时,星地激光通信ATP系统将朝着高精度、轻量化、智能化、低成本化与工程实用化方向演进,具体而言:

①在瞄准跟踪方面,面对低轨卫星高速运动带来的强动态特性,现有基于FQD或互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)相机的闭环系统在大气湍流扰动或平台微振动下易发生失锁。未来需进一步提升探测器帧频与信噪比,并构建多速率复合控制架构,配合抗扰动自适应滤波算法,实现亚微弧度级连续稳定跟踪。此外,传统依赖高精度星历与开环超前对准的模式正逐步向融合多源信息前馈与实时闭环修正的智能动态预瞄架构演进,基于状态估计的智能预测算法或成为关键技术支撑。

②在捕获方面,传统大视场、粗跟踪系统受限于信标光功率弱、背景杂散光强及初始指向误差大等问题,可发展多波段协同探测、宽视场高灵敏度凝视成像与智能目标识别相结合的快速捕获策略,并融合轨道预报与地面站先验指向信息,提升首次捕获成功率。

③在工程化方面,为克服信标功率受限与终端小型化的约束,无独立信标ATP<sup>[62]</sup>成为重要趋势。其以信号光兼作信标,结合优化的单场或多场<sup>[63-68]</sup>扫描策略,显著降低了捕获时间、功耗与系统复杂度。然而,无独立信标ATP较为依赖高精度的初始指向,且在捕获阶段缺乏强引导信号,其与高精度在轨自主标校、轨道预报和自适应扫描优化等技术

的融合或将成为新挑战。

## 4 结束语

全球正加速迈向 6G 时代,面对激增的通信数据量和日益多样化的全域连接需求,星地激光通信作为打通空天地信息流的关键高速通道,其战略价值愈发凸显。未来,面对更高传输速率、更大通信容量和更强稳定性等需求,星地激光通信的发展包含以下几个方面:光电器件方面,激光器、光探测器和波前传感器等关键器件逐渐向高性能、小体积重量和低功耗方向演进,提供硬件基础;星地建链方面,新一代 ATP 系统将融合多源信息引导、粗精复合控制架构和亚微弧度级稳定平台等,旨在提升初始捕获效率与动态扰动下的跟踪精度,支撑可靠建链;抗大气湍流的手段方面,传统系统的被动校正将向主动预测后提前校正的方向发展,实现对大气湍流的短期预测和实时感知,提升强湍流下的系统性能;协议体系与标准规范方面,相关组织正加速推进星地激光的规范制定与研究,奠定多机构合作与业务化运行的基础。综上,随着人工智能技术产业的迅猛发展,星地激光通信系统与之深度融合是关键趋势,其在 ATP 系统、AO 和湍流预报等多个环节将发挥关键作用。

### 参考文献:

- [1] 姜会林,付强,赵义武,等. 空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 1-8.  
Jiang H L, Fu Q, Zhao Y W, et al. Development Status and Trend of Space Information Network and Laser Communication [J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(2): 1-8.
- [2] Wilson K E. An Overview of the GOLD Experiment between the ETS-6 Satellite and the Table Mountain Facility[R]. Wrightwood, CA, USA: The Telecommunications and Data Acquisition Report, 1996.
- [3] Boroson D M, Robinson B S. The Lunar Laser Communication Demonstration: NASA's First Step Toward very High Data Rate Support of Science and Exploration Missions [M]//The Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer Mission (LADEE). Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2015: 115-128.
- [4] 赵方,刘兴,罗广军,等. NASA激光通信中继演示项目技术[J]. 光通信技术, 2020, 44(8): 49-54.  
Zhao F, Liu X, Luo G J, et al. NASA Laser Communication Relay Demonstration Project Technology [J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(8): 49-54.
- [5] 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]//Free-Space Laser Communications XXXVI. San Francisco, USA: SPIE, 2024: 3008354.
- [6] Roberts W T, Piazzolla S. LCRD Optical Ground Station 1 [C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). Naha, Japan: IEEE, 2017: 8357216.
- [7] Israel D J, Edwards B L, Butler R L, et al. Early Results from NASA's Laser Communications Relay Demonstration (LCRD) Experiment Program [C]//Free-Space Laser Communications XXXV. San Francisco, USA: SPIE, 2023: 2655481.
- [8] 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.
- [9] Roberts W T, Antsos D, Croonquist A, et al. Overview of Ground Station 1 of the NASA Space Communications and Navigation Program [J]. Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII, 2016, 9739: 97390B.
- [10] Roberts L C, Burruss R, Fregoso S, et al. The Adaptive Optics and Transmit System for NASA's Laser Communications Relay Demonstration Project [J]. Laser Communication and Propagation Through the Atmosphere and Oceans V, 2016, 9979: 99790I.
- [11] Park E A, Cornwell D, Israel D. NASA's Next Generation  $\geq 100$  Gbps Optical Communications Relay [C]//2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2019: 8742247.
- [12] 高铎瑞,谢壮,马榕,等. 卫星激光通信发展现状与趋势分析[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 1-21.  
Gao D R, Xie Z, Ma R, et al. Development Current Status and Trend Analysis of Satellite Laser Communication (Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4): 1-21.
- [13] Hauschildt H, le Gallou N, Mezzasoma S, et al. Global Quasi-Real-Time-Services back to Europe: EDRS Global [C]//International Conference on Space Optics-ICSO 2018. Chania, Greece: SPIE, 2019: 2536001.
- [14] Calzolaio D, Curreli F, Duncan J, et al. EDRS-C - the Second Node of the European Data Relay System is in Orbit [J]. Acta Astronautica, 2020, 177: 537-544.
- [15] Hauschildt H, Elia C, Moeller H L, et al. HyDRON: High Throughput Optical Network [C]//2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and

- Applications (ICSOS). Portland, OR, USA: IEEE, 2020: 8978985.
- [16] Perdignes J, Hauschildt H, El-Dali W, et al. HYDRON: The ESA Initiative towards Optical Networking in Space[C]//2021 European Conference on Optical Communication (ECOC). Bordeaux, France: IEEE, 2021: 9605702.
- [17] Vasko C A, Arapoglou P D, Acar G, et al. Optical High-Speed Data Network in Space - an Update on HyDRON's System Concept[C]//2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). Kyoto City, Japan: IEEE, 2022: 9749744.
- [18] 王睿, 徐浩, 张欢, 等. 海洋二号卫星特点及应用[J]. 中国航天, 2012(10): 7-11.  
Wang R, Xu H, Zhang H, et al. Characteristics and Application of Haiyang-2 Satellite[J]. Aerospace China, 2012(10): 7-11.
- [19] 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.  
Zhang Q J, Zhang J, Zhang H, et al. The Study of HY-2A Satellite Engineering Development and In-Orbit Movement[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(7): 12-18.
- [20] Chen W, Sun J, Hou X, et al. 5.12 Gbps Optical Communication Link between LEO Satellite and Ground Station [C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). Naha, Japan: IEEE, 2017: 260-263.
- [21] 王行行, 霍占伟, 牟洪元, 等. 吉林一号卫星激光通信数据传输试验及应用[J]. 国际太空, 2024(2): 42-49.  
Wang H H, Huo Z W, Mu H Y, et al. Data Transmission Test and Application of Jilin-1 Satellite Laser Communication[J]. Space International, 2024(2): 42-49.
- [22] Schieler C, Robinson B, Guldner O, et al. NASA's Terabyte Infrared Delivery (TBIRD) Program: Large-Volume Data Transfer from LEO [C]//33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Logan, UT, USA: AIAA/USU, 2019: SSC19-VI-02.
- [23] 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]//Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXX. San Francisco, USA: SPIE, 2018: 2295023.
- [24] Chang J, Schieler C M, Riesing K M, et al. Body Pointing, Acquisition and Tracking for Small Satellite Laser Communication [C]//Free-Space Laser Communications XXXI. San Francisco, USA: SPIE, 2019: 2295023.
- [25] Motlagh A C, Ahmadi V, Ghassemlooy Z, et al. The Effect of Atmospheric Turbulence on the Performance of the Free Space Optical Communications [C]//2008 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing. Graz, Austria: IEEE, 2008: 4610725.
- [26] Guo M, Lu Z, Wang Y, et al. Experimental Investigation of Transmission Diversity and Reception Aperture Averaging for Terrestrial Near-Field Long-Distance Free-Space Optical Turbulence Resilience [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 188: 112979.
- [27] Mukherjee S, Wasif S, Satvaya P. Comparative Analysis of Aperture Averaging & Receiver Diversity Schemes in FSO Channel Performance under High Scintillation Regime [J]. Discover Electronics, 2025, 2(1): 95.
- [28] 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.
- [29] 付玉龙, 杨董, 张博翔, 等. 非柯湍流对星地激光通信分集接收系统性能影响 [J]. 先进小卫星技术(中英文), 2025, 2(4): 33-39.  
Fu Y L, Yang D, Zhang B X, et al. Impact of Non-Kolmogorov Turbulence on the Performance of Satellite-to-Ground Laser Diversity Reception System [J]. Advanced Small Satellite Technology, 2025, 2(4): 33-39.
- [30] 蒋攀攀, 鲁航, 云超, 等. 一种适用于空间相关信道的分集接收方法 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(8): 888-892.  
Jiang P P, Lu H, Yun C, et al. A Diversity Reception Method for Spatial Correlated Channel [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(8): 888-892.
- [31] Anit Monisha M H, Geetha M R, Kavitha M R, et al. Turbulence-Resilient Multi-Adaptive Optical Model for High-Performance Wireless Transmission in FSO Communication under Varying Turbulence Environments [J]. Optical and Quantum Electronics, 2025, 57(8): 486.
- [32] 蒋青芳, 姚海峰, 刘智, 等. Gamma-Gamma信道下基于并行交织极化码的误码性能研究 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2024, 36(1): 145-152.  
Jiang Q F, Yao H F, Liu Z, et al. Research on Error Performance of Parallel Interleaved Polar Codes in Gamma-Gamma Channels [J]. Journal of Chongqing Uni-

- iversity of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2024, 36(1): 145–152.
- [33] Mohan N, Ghassemlooy Z, Li E, et al. The BER Performance of a FSO System with Polar Codes under Weak Turbulence[J]. IET Optoelectronics, 2022, 16(2): 72–80.
- [34] Helal M, Kandouci C, Bouziani M. Mitigating Atmospheric Turbulence in FSO Communications Using Reed-Solomon Coding: a Performance Analysis[J]. Opto-Electronics Review, 2025, 33(4): 157331.
- [35] Teklu M B, Chung Y H. MMSE-SIC-based Detection for Mode-Dependent Loss Impaired OAM-MIMO Free Space Optical Wireless Communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025:3617286.
- [36] Rajput S J, Patel M B, Patel S H. Analysis of 25 Gbps 4-QAM-Modulated Coherent OFDM-FSO Link Employing LDPC Channel Coding across Diverse Atmospheric Scenarios[J/OL]. Journal of Optical Communications. (2025-09-15)[2026-01-31]. <http://degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/joc-2025-0198/html>.
- [37] 张晓乐, 谭晓川, 李哲. 空间激光通信中带LDPC编码的网络业务传输设计[J]. 光通信研究, 2024(6): 230100.  
Zhang X L, Tan X C, Li Z. Design of Network Service Transmission with LDPC Coding in Space Laser Communication [J]. Study on Optical Communications, 2024(6): 230100.
- [38] 王志冲. 强湍流下激光通信波前光场传感技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2022.  
Wang Z C. Research on Plenoptic Wavefront Sensing Technique of Free Space Laser Communication under Strong Turbulence [D]. Changchun, China: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [39] Huang J, Deng K, Liu C, et al. Effectiveness of Adaptive Optics System in Satellite-to-Ground Coherent Optical Communication [J]. Optics Express, 2014, 22(13): 16000–16007.
- [40] Jiang L, Dai Z, 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.
- [41] Guan H, Zhao W, Yang K, et al. Improving Wavefront Reconstruction Performance with a Binary Phase Hybrid Shack-Hartmann Wavefront Sensor [J]. Optics Express, 2025, 33(5): 9756–9774.
- [42] 高世杰, 王振, 傅星鑫, 等. 改进的蜣螂优化算法及其在无波前自适应系统波前校正中的应用[J]. 光子学报, 2025, 54(3): 0306001.
- Gao S J, Wang Z, Fu X X, et al. An Improved Dung Beetle Optimization Algorithm and its Application in Wavefront Correction for Sensor-Less Adaptive Optics System [J]. Acta Photonica Sinica, 2025, 54(3): 0306001.
- [43] 郭盈池, 李浪, 李晨, 等. 面向星地激光通信的大气湍流预报研究进展[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(3): 20230729.  
Guo Y C, Li L, Li C, et al. Atmospheric Optical Turbulence Prediction Method for Satellite-Ground Laser Communication [J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(3): 20230729.
- [44] Jiménez P A, Dudhia J, González-Rouco J F, et al. A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation [J]. Monthly Weather Review, 2012, 140(3): 898–918.
- [45] Tapp M C, White P W. A Non-Hydrostatic Mesoscale Model [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1976, 102(432): 277–296.
- [46] Chen F, Dudhia J. Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity [J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(4): 569–585.
- [47] Li J, Zhang M, Wang D, et al. Joint Atmospheric Turbulence Detection and Adaptive Demodulation Technique Using the CNN for the OAM-FSO Communication [J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10494–10508.
- [48] Qiu M, Zhao P, Zhang K, et al. A Short-Term Rainfall Prediction Model Using Multi-Task Convolutional Neural Networks [C]//2017 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM). New Orleans, LA, USA: IEEE, 2017: 8215512.
- [49] 孙全德, 焦瑞莉, 夏江江, 等. 基于机器学习的数值天气预报风速订正研究[J]. 气象, 2019, 45(3): 426–436.  
Sun Q D, Jiao R L, Xia J J, et al. Adjusting Wind Speed Prediction of Numerical Weather Forecast Model based on Machine Learning Methods [J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(3): 426–436.
- [50] Sønderby C K, Espenholt L, Heek J, et al. MetNet: a Neural Weather Model for Precipitation Forecasting [EB/OL]. (2020-03-24) [2026-01-31]. <https://arxiv.org/abs/2003.12140>.
- [51] Andrychowicz M, Espenholt L, Li D, et al. Deep Learning for Day Forecasts from Sparse Observations [EB/OL]. (2023-06-06) [2026-01-31]. <https://arxiv.org/abs/2306.06079>.
- [52] Wang N, Zhu L, Yuan Q, et al. Performance of the

- Neural Network - based Prediction Model in Closed - Loop Adaptive Optics[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(11): 2926–2929.
- [53] Guo Y, Hao Y, Wan S, et al. Direct Observation of Atmospheric Turbulence with a Video-Rate Wide-Field Wavefront Sensor[J]. *Nature Photonics*, 2024, 18(9): 935–943.
- [54] 常俊德, 邢斯瑞, 李鑫. 低轨卫星激光载荷恒星标校方法的研究 [J/OL]. *激光杂志*. (2025-12-30) [2026-01-29]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1085.tn.20251230.1501.002>.
- Chang J D, Xing S R, Li X. Research on Star Calibration Method for Low Earth Orbit Satellite Laser Payloads [J/OL]. *Laser Journal*. (2025-12-30) [2026-01-29]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1085.tn.20251230.1501.002>.
- [55] 邢琳, 侯铭泽. 恒星标校技术在两轴观测设备中的应用[J]. *光电技术应用*, 2019, 34(2): 65–68.
- Xing L, Hou M Z. Application of Star Calibration Technology in Double Spindle Observation Equipment [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2019, 34(2): 65–68.
- [56] 刘智, 卢益民, 罗萌. 星间光通信中的瞄准、捕获和跟踪[J]. *计算机与数字工程*, 2006, 34(5): 71–74.
- Liu Z, Lu Y M, Luo M. Pointing, Acquisition and Tracking Technology in Inter - Satellite Optical Communication [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2006, 34(5): 71–74.
- [57] Scheinfeild M, Kopeika N S, Melamed R. Acquisition System for Microsatellites Laser Communication in Space[J]. *Free-Space Laser Communication Technologies XII*, 2000, 3932: 166–175.
- [58] 杨森. 星地激光通信无独立信标高精度捕获跟踪关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- Yang S. Research on Key Technologies of Satellite-to-Ground Laser Communication without Independent Signal Elevation Accuracy Capture and Tracking [D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2025.
- [59] 李树德, 刘彩霞, 徐林, 等. 星间激光通信中四象限探测器的定位精度研究[J]. *光通信研究*, 2021(4): 61–65.
- Li S D, Liu C X, Xu L, et al. Research on Positioning Accuracy of Four Quadrant Detector in Inter - Satellite Laser Communication[J]. *Study on Optical Communications*, 2021(4): 61–65.
- [60] 陈加文, 孙凝, 刘建国. 一种提升单探测器复合跟踪中粗跟瞄子系统预测精度和稳定性的方法[J]. *半导体光电*, 2024, 45(4): 658–661.
- Chen J W, Sun N, Liu J G. Method for Improving Prediction Accuracy and Stability in Coarse-Aiming Subsystem of Single-Detector Composite Tracking[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2024, 45(4): 658–661.
- [61] 刘克, 张孝天, 钟慧, 等. 四波前横向剪切干涉仪的关键技术研究[J]. *光学学报*, 2023, 43(15): 1512001.
- Liu K, Zhang X T, Zhong H, et al. Key Technologies of Quadri - Wave Lateral Shearing Interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(15): 1512001.
- [62] Hindman C, Robertson L. Beaconless Satellite Laser Acquisition-Modeling and Feasibility [C]//IEEE MIL-COM 2004. Monterey, CA, USA: IEEE, 2004: 41–47.
- [63] 于思源, 马晶, 谭立英, 等. 激光星间链路中天线扫描捕获技术实验室模拟研究[J]. *中国激光*, 2002, 29(6): 498–502.
- Yu S Y, Ma J, Tan L Y, et al. Experimental Study of Acquisition with Antenna Scanning in Intersatellite Laser Links[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(6): 498–502.
- [64] 张敏, 佟首峰, 滕云杰. 激光通信系统中的捕获技术及扫描策略研究[J]. *激光杂志*, 2019, 40(10): 139–142.
- Zhang M, Tong S F, Teng Y J. Research on Acquisition Technology and Scanning Strategy for Laser Communication System[J]. *Laser Journal*, 2019, 40(10): 139–142.
- [65] 于志亮, 周乃新, 陈兴林, 等. 星间激光通信系统粗精复合扫描技术[J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(5): 158–162.
- Yu Z L, Zhou N X, Chen X L, et al. Research on Coarse-Fine Composite Technology for Scanning in Inter - Satellite Laser Communication[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(5): 158–162.
- [66] Teng Y, Zhang M, Tong S. The Optimization Design of Sub - Regions Scanning and Vibration Analysis for Beaconless Spatial Acquisition in the Inter - Satellite Laser Communication System[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 7909611.
- [67] Zhang M, Li B, Tong S. A New Composite Spiral Scanning Approach for Beaconless Spatial Acquisition and Experimental Investigation of Robust Tracking Control for Laser Communication System with Disturbance [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(6): 7906212.
- [68] 李鑫. 星间激光通信中链路性能及通信性能优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Li X. Optimization Research on Link and Communication Performance for Intersatellite Laser Communications[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2013.