

激光与光电子学进展

自适应光学在星地激光通信中的研究进展

徐月^{1,2,3}, 刘超^{1,2*}, 兰斌^{1,2}, 陈莫^{1,2}, 芮道满^{1,2}, 代天君^{1,2}, 鲜浩^{1,2}¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 星地激光通信技术能打破传统微波通信的频谱限制, 应对星地链路越来越高的通信需求。而自适应光学系统能有效地抑制大气信道中湍流的影响, 提高星地激光通信链路的稳定性和可靠性, 已经成为国内外星地激光通信系统中重要的组成部分。本文详细介绍了国内外典型星地激光通信地面站的自适应光学系统以及其主要参数指标。并结合目前光通信自适应光学技术的研究成果, 总结出自适应光学系统更强的波前探测能力、更高的校正能力、更稳定可靠的工作性能以及更加自动化的发展趋势。为星地激光通信中自适应光学系统的研制提供参考, 以保障星地激光通信链路的高可用度。

关键词 光通信; 星地激光通信; 自适应光学; 大气湍流抑制; 光学地面站

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220582

Research Progress of Adaptive Optics in Satellite-to-Ground Laser Communication

Xu Yue^{1,2,3}, Liu Chao^{1,2*}, Lan Bin^{1,2}, Chen Mo^{1,2}, Rui Daoman^{1,2}, Dai Tianjun^{1,2}, Xian Hao^{1,2}¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Satellite-to-ground laser communication (SGL) can address the spectrum limitation of traditional microwave communication and satisfy the increasing communication demand of satellite ground links. The adaptive optics (AO) system is an integral part of SGL, and it can effectively suppress the impacts of atmospheric turbulence and improve link stability and reliability. This paper introduces typical optical ground-station AO systems at home and abroad and its primary parameters. Based on the research results of AO in laser communication, the development trend followed by the AO system, including its improved wavefront detection ability, enhanced correction capability, stabilized and reliable operating performance, and improved automatic operation, is summarized. This study provides a reference for AO system development in SGL to ensure better availability of SGL link.

Key words optical communication; satellite-to-ground laser communication; adaptive optics; atmospheric turbulence suppression; optical ground station

1 引言

构建太空、天空、陆地、海洋一体化的立体空间通信网络是应对未来信息化社会发展的重要基础设施^[1]。日益增长的通信需求, 将促使空间通信网络朝着更大的数据容量、更高的传输速率发展。相比于传统的微波通信, 空间激光通信没有频谱限制, 具有更高

的通信容量和传输速率, 且系统轻便、发射功率小、保密性能高, 是目前实现海量信息高速无线传输的重要手段^[2]。

星地通信链路作为立体化空间通信网络中的关键链路, 一直是空间激光通信领域的研究重点和热点。由于星地信道中大气湍流的存在, 大气折射率会随时间和空间发生不规则的变化。无论是采用直

收稿日期: 2022-01-20; 修回日期: 2022-02-17; 录用日期: 2022-02-25; 网络首发日期: 2022-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(61901449)

通信作者: liuchao@ioe.ac.cn

接调制,还是相干调制的通信方案,光束在通过大气湍流的传输过程中发生的漂移、闪烁、抖动、波前相位畸变都会影响信号的承载功率、降低光纤耦合效率、增大通信误码率,严重损害了星地激光通信系统的性能^[3-5]。大气湍流成为星地激光通信链路中所面临的主要挑战。为了抑制大气湍流效应,目前有许多方法被提出并应用在星地通信中,主要有信道编码、孔径平均^[6]、少模前置放大^[7]、多输入多输出^[8]、自适应光学(AO)等。

AO技术能对发生畸变的光波前进行主动校正,已经在传统的天文观测和空间监测等领域得到了广泛的应用,被普遍认为是目前解决湍流干扰的最佳技术^[9]。近些年来,国内外学者和研究机构对AO技术在星地激光通信中的应用开展了大量的研究,并从理论和实验上证明AO系统改善星地激光通信系统性能的有效性和可行性^[10-17]。本文梳理了国外AO技术在星地激光通信领域的研究现状,并详细介绍了其典型地面站的AO系统及主要的参数指标。同时,结合本文课题组在星地激光通信系统中AO技术的研究工作,介绍了几套已经装配在地面站使用的AO系统及其相关性能的测试结果。最后,总结了AO技术在未来激光通信领域中的应用前景和发展趋势。

2 AO在星地激光通信系统中的应用成果

在星地激光通信链路中,AO系统为卫星与地面站的高速数据传输提供了稳定性和可靠性保障。如图1所示,在光学地面站中使用AO系统可对下行光束的波前进行测量,并通过波前校正器对发生畸变的波前进行实时补偿,从而达到改善下行链路接收端光信号的质量、提高通信系统性能的目的。国际上,以美国、欧洲和日本为代表的国家和地区率先开展了AO

系统在星地激光通信系统中的应用研究,并相继在光通信地面站上配备了AO系统。为了进一步提升光学地面站通信的可靠性,美国和欧洲还对地面站的AO系统进行了多次升级。近些年来,AO技术也被应用在我国星地激光通信地面站的研制中,保障了国内相关星地激光通信实验的顺利开展。

2.1 美国

早在1994年,美国就利用阿波罗15号(Apollo 15)进行了对地球-月球-地球反射激光链路的补偿实验^[18]。实验通过位于新墨西哥州空军基地的1.5 m望远镜系统,发射一束波长为1064 nm的激光经Apollo 15的反射器阵列反射回地面,地面站采用一台3.5 m的望远镜接收信号光,通过激光导星自适应光学系统(LGS-AO)对信号光进行补偿。实验表明,当1.5 m望远镜发出的光束经过AO系统校正后,可将返回信号平均增加2 dB。

2014年,美国开展了激光通信光学载荷实验(OPALS),将一段视频成功以50 Mbps的通信速率从国际空间站传回地面站^[19]。实验表明,在大气湍流较强的情况下,没有AO系统进行大气补偿,单模光纤耦合效率极低,不能进行有效通信。为了实现更高速率的通信链路,将信号耦合到更小的探测器与基于光纤的地面通信网络。2015年,美国国家航空航天局喷气推进实验室(NASA JPL)与波音公司在OPALS的1 m口径光学地面站上增加了一套AO实验台,系统结构如图2所示^[20-21]。该系统集成了一套特别设计的自参考干涉仪波前传感器(SRI-WFS)和1000单元的微机械系统变形镜(MEMS-DM)。AO系统闭环能使光学地面站接收光斑的Strehl比从平均小于0.02提升到平均0.60,将耦合进单模光纤的信号波动从30 dB降低到了8 dB,并将单模光纤的耦合均值功率提高了16 dB,实验结果如图3所示。该实验展示了通过AO系统补偿通信链路的能力,为低轨卫星的下行链路高速传输、耦合光纤与地面光纤网络的无缝连接铺平了道路。

2017年,美国在月地激光通信演示实验的基础上启动了激光通信中继演示(LCRD)计划^[22]。该计划将开展高轨道卫星与地面站之间的高速双向激光通信实验,验证相关空间激光通信网络技术,为未来深空探测通信网络和下一代跟踪和数据中继卫星网络建设提供依据。该项目分别在加利福尼亚州和夏威夷布置了两个地面站,且都配备有AO系统来进行信道的大气补偿。图4是位于加利福尼亚州光通信望远镜实验室(OCTL)的1 m口径光学地面站,其AO系统采用的传统Shack-Hartmann波前传感器(SH-WFS)的相机帧率可达到10 kHz。相比于OPALS任务中用到的SRI-WFS,SH-WFS对下行光功率的要求较低。在波前校正器方面,该AO系统采用低阶变形镜(LODM)和高阶变形镜(HODM)进行两级校正。其中LODM为12×12单元的变形镜,用来校正低频像差,最大行程

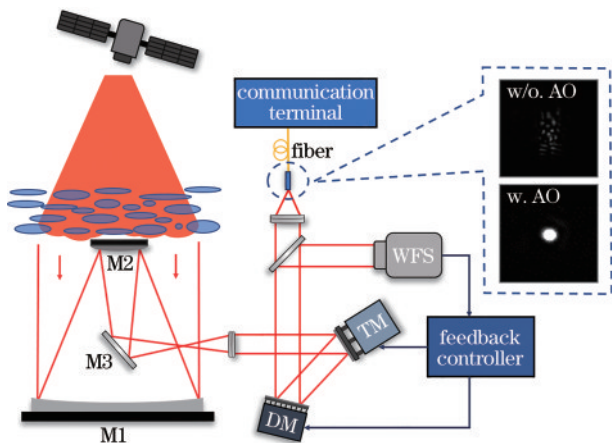


图1 AO系统开环/闭环下的光信号接收情况
Fig. 1 Optical signal reception with or without adaptive optics (AO) system

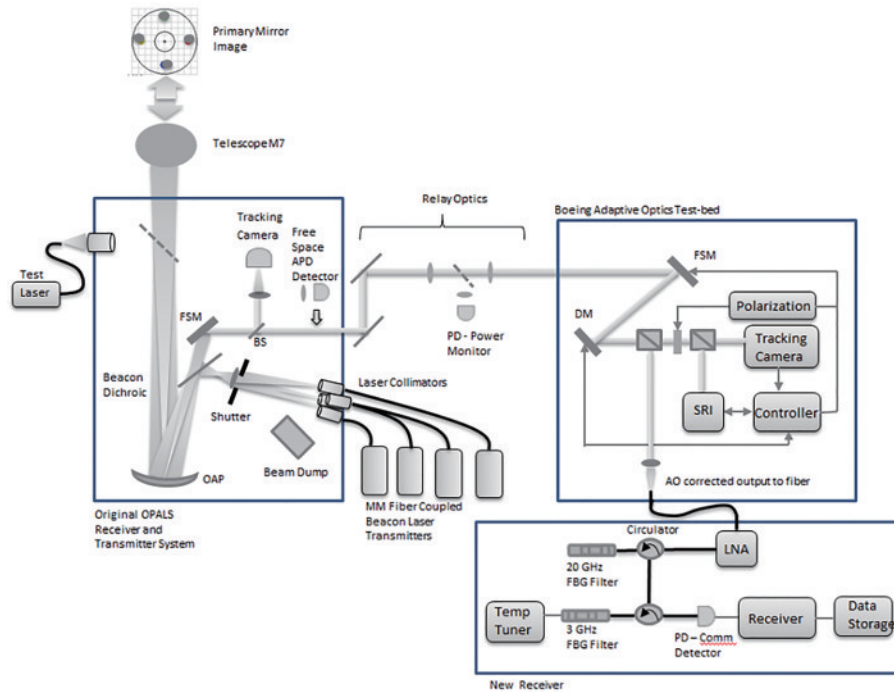


图 2 OPALS 地面站 AO 系统示意图^[20]

Fig. 2 Schematic diagram of AO system of OPALS ground station^[20]

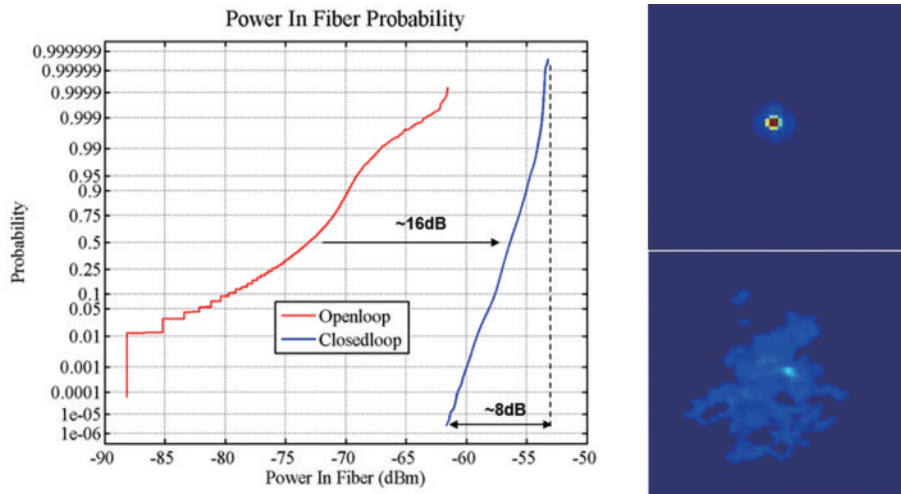


图 3 AO 系统开闭环时的实验结果^[20]

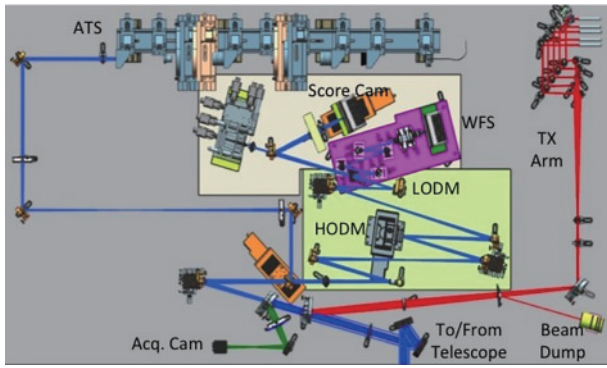
Fig. 3 Experimental results of AO system in open and closed^[20]



图 4 加利福尼亚州 1 m 口径光学地面站

Fig. 4 Optical ground station with 1 m aperture at California

为 $3.5 \mu\text{m}$ 。HODM 为 32×32 单元的变形镜,用来校正高频像差,其制动器行程为 $1.5 \mu\text{m}$ 。AO 系统的光机结构如图 5 所示^[23]。整套 AO 系统要求在大气相干长度 $r_0 = 5 \text{ cm}$ ($\lambda = 500 \text{ nm}$) 的情况下,将光斑的 Strehl 比提升至 0.7,光信号的耦合效率达到 55%。而位于夏威夷的地面站,则采用配备 140 单元 AO 系统的 $2 \times 60 \text{ cm}$ 望远镜作为地面接收端,保障在恶劣天气条件下的星地通信链路的可用度。最近,LCRD 激光通信终端搭载 STPSat-6 卫星发射至地球同步轨道,实现了将高分辨率实验数据以 1.2 Gbps 的速率从卫星回传到地面。

图 5 光学地面站接收端光机结构图^[23]Fig. 5 Structure of optical machine at receiver of optical ground station^[23]

2.2 日本

日本是国际上率先开展星地激光通信实验的国家之一。关于 AO 技术在星地激光通信系统上的应用研究,日本通信综合研究所(CRL)在 1996 年启动了应用 AO 技术进行地-空激光通信的研究和开发计划(R&D)^[24]。该计划利用日本国家空间发展署(NASDA)开发的地球同步轨道卫星(OICETS),与地面站之间建立了通信波长为 $1.5 \mu\text{m}$ 、数据传输速率达 Gbps 量级的高速光反馈链路。并开展了相关 AO 系统的原型设计,进行了仿真测试实验^[25]。AO 系统采用 36 个子孔径的 SH-WFS、13/19 单元变形镜。测试结果显示,AO 补偿技术能够将通信光功率提升至可

用范围。使用 AO 系统进行补偿时,下行链路的接收功率保持在较高水平,光信号的 Strehl 比从 0.023 提升至 0.340,接收信号的平均光功率增加了 10 倍。

最近,日本国家信息通信研究所(NICT)研制了一套应用在工程实验卫星 ETS-IX 上的超高速光学卫星通信设备(HICALI),计划搭载 HST 卫星发射。HICALI 的目标是实现地球同步轨道空间段(GND-GEO)之间的 10 Gbps 量级、近地轨道空间段(GND-LEO)之间的 40 Gbps 量级的数据传输速率,同时也将在地面站上测试 AO 系统对激光通信链路的补偿能力^[26]。

2.3 欧洲

欧洲的星地激光通信项目主要由欧洲空间局(ESA)和德国航空太空中心(DLR)主导。ESA 与 DLR 早期的 SILEX、NFIRE 星地激光通信实验都取得了较好的测试结果。为了提高星地通信链路光学地面站的性能,2010 年,ESA 在位于西班牙 Tenerife 的 1 m 口径光学地面站增加了 AO 系统^[27]。地面站如图 6 所示。AO 系统采用子孔径数为 11×11 的 SH-WFS,探测相机的最大读取帧率可达 20 kHz。波前校正器采用的是 140 个驱动单元的变形镜,最大行程可达 $5.5 \mu\text{m}$,其响应速率能满足较高的系统带宽。AO 系统闭环后,能实现在大气相干长度 $r_0 = 5 \text{ cm}$ ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) 的情况下,将信号光斑的 Strehl 比提升至 0.5 以上,系统最大 0 dB 带宽为 500 Hz,能够消除大部分由大气湍流效应引起的波前误差,提高星地激光通信的可靠性。

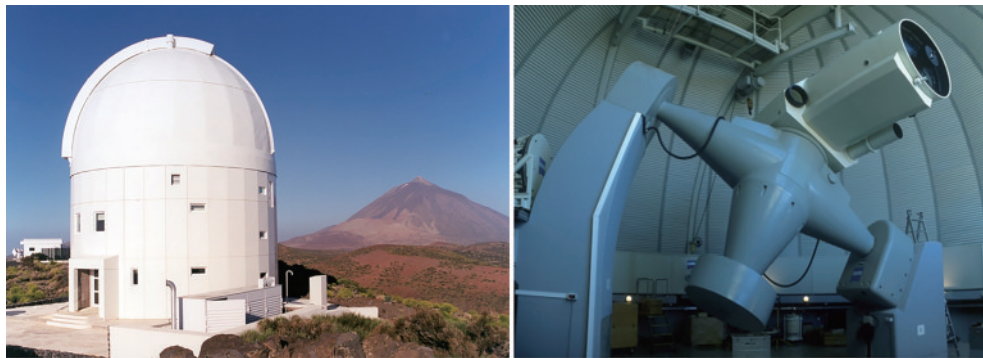


图 6 ESA 在 Tenerife 的 1 m 口径光学地面站

Fig. 6 ESA's optical ground station with 1 m aperture at Tenerife

为克服大气湍流扰动以及天气环境引起的通信链路限制,2015 年 DLR 建造了一个可用于与 Tesat 第一代和第二代星载激光通信终端(LCT)进行通信的移动式小口径自适应光学地面站(TAOGS),如图 7 所示^[28-30]。TAOGS 配备两种不同口径的望远镜(分别为 270 mm 和 100 mm)进行信号的收发,其 AO 系统的波前传感器(WFS)是一个 96 单元的 Shack-Hartmann 传感器(子孔径个数为 11×11),相机的帧率范围为 500 Hz~10 kHz,与之相配的是一个 12×12 单元驱动器的 MEMS 变形镜。该 AO 系统可保障 TAOGS 在

大气相干长度 $r_0 < 10 \text{ cm}$ ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) 的情况下运行。集成 AO 系统的 TAOGS 光学平台如图 8 所示。随后几年里,TAOGS 与位于同步轨道的 Alphasat 卫星的激光通信终端进行了多次通信波长为 1064 nm、通信制式为二进制相移键控(BPSK)的双向相干通信实验^[31-32]。TAOGS 实现了与 GND-LEO 和 GND-GEO 的用户进行数据传输速率分别为 5.625 Gbps 和 1.8 Gbps 的星地激光通信。

2017 年,ESA 对其 1 m 口径的光学地面站进行了升级。升级后的地面站将能在 1064 nm 和 1550 nm 两

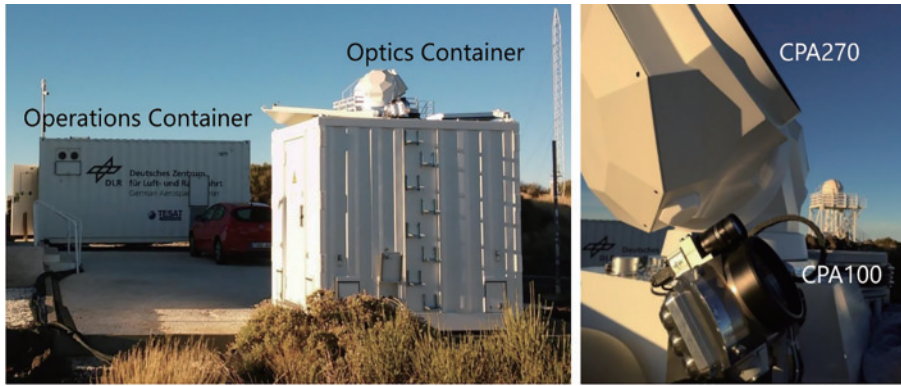


图 7 TAOGS 照片^[29]

Fig. 7 Pictures of transportable adaptive optics ground station (TAOGS)^[29]

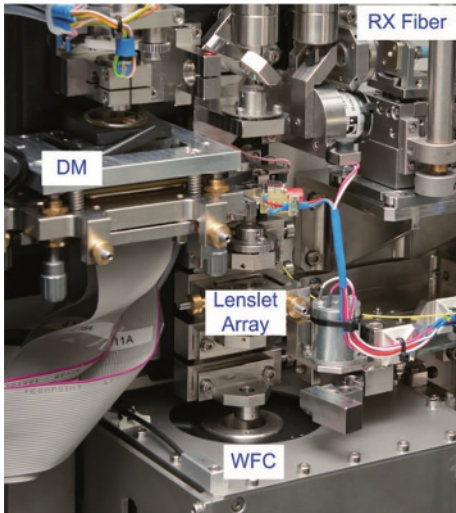


图 8 TAOGS 的自适应光学平台^[30]

Fig. 8 AO system of TAOGS^[30]

个波段与 GEO 卫星和 LEO 卫星建立星地相干光通信链路。地面站的接收端采用了卡塞格林自适应光学接

收系统 (CARO), 其光学平台的设计图如图 9 所示^[33-34]。其中, AO 部分使用 21×21 个子孔径的 SH-WFS, 以及一个 24×24 单元的变形镜进行动态像差校正, 系统的闭环频率超过 4 kHz。在没有湍流存在时, CARO 的光纤耦合效率在 0.34~0.39 之间。当有湍流存在时, CARO 可以在 $r_0=5$ cm ($\lambda=1064$ nm)、风速小于 50 km/h 的强湍流环境下, 使 Strehl 比达到 0.6, 保证光信号有较高的耦合效率。

AO 系统不只适用于下行链路, 根据互易原理, 也可以对上行光束进行有效的预校正来抑制大气湍流效应。2019 年, 为了实现用激光取代微波进行地面站与地球同步卫星之间的双向激光通信, 验证 AO 系统预校正的有效性。荷兰应用科学研究机构 (TNO) 和 DLR 针对高通量星地激光通信链路设计了一个光反馈链路的自适应光学预校正平台 (FEDELIO), 如图 10 所示。同时, 对该平台在 10 km 左右的范围进行了激光通信测试, 如图 11 所示^[16, 35-36]。其中 STB 为卫星终端试验平台, GTB 为地面终端试验平台。STB 用

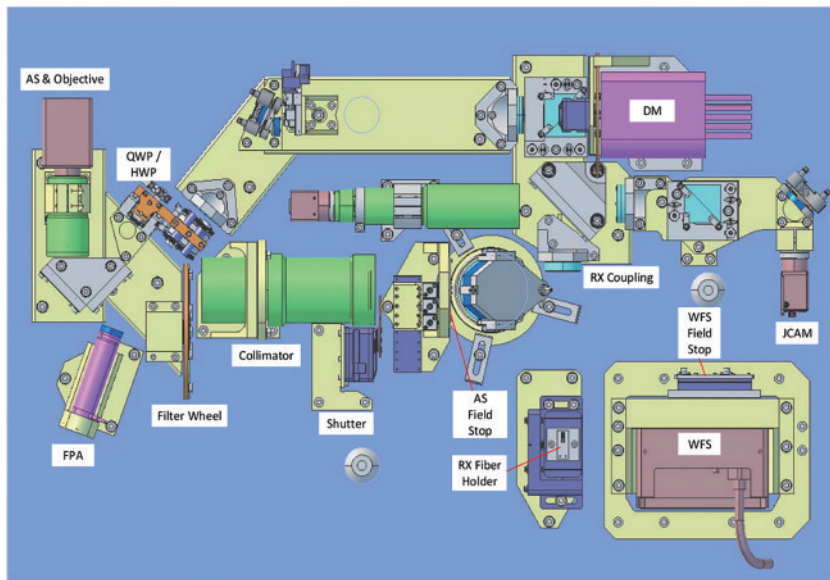


图 9 CARO 光学平台设计俯视图^[33]

Fig. 9 Top view of optical platform design of CARO^[33]

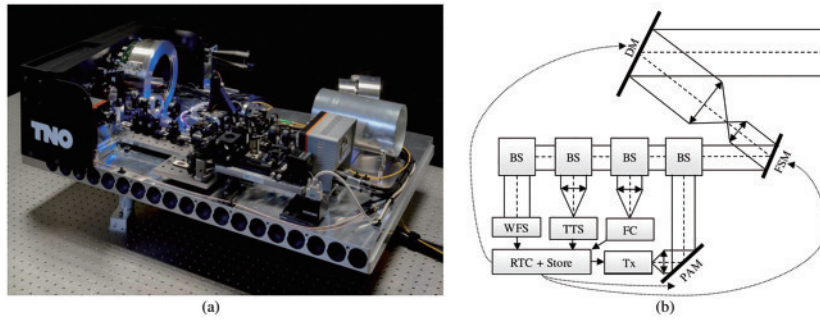


图 10 光反馈链路 AO 预校正实验^[16]。(a) FEEDELIO 实验板；(b) FEEDELIO 原理图

Fig. 10 Optical feeder link AO precession experiment^[16]. (a) FEEDELIO breadboard; (b) schematic overview of FEEDELIO



图 11 FEEDELIO 实验示意图

Fig. 11 Demonstration of FEEDELIO experiment

来模拟卫星上的通信终端发射 1550 nm 的先导下行光束,GTB 用来模拟光学地面站。GTB 中通过一个 10×10 子孔径的 WFS 进行波前探测,通过一个快反镜和一个 57 单元的变形镜对前 30 阶像差进行校正和预校正。实验结果显示,通过预校正可将上行光束的平均功率提高 2.5 倍,并使闪烁指数下降为原来的 $1/4$,说明了 AO 系统具有良好的上行链路补偿能力。

2.4 中国

由于星地激光通信巨大的应用前景,以及我国对该领域的大力支持。近些年,国内诸多高校和科研院所也积极开展了星地激光通信技术的研究并取得了重大的成果。为保障通信链路的高可用度,以中国科学院光电技术研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、长春理工大学等为代表的科研单位开展了大量激光通信 AO 技术的研究。长春理工大学利用 AO 系统在城市 1 km 的水平链路上进行了单模光纤耦合实验,结果表明,AO 系统闭环可将耦合效率提升 4 倍^[9]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所为北斗全球系统研制的激光通信与标校一体化设备中加入了 AO 系统,在与中轨和高轨卫星开展的光通信实验中,AO 系统的波前校正精度可优于 $\lambda/8$ ($\lambda =$

1550 nm),大幅提高了信号的光纤耦合效率,实现了在城市大气环境下的星地激光通信^[37]。中国科学院光电技术研究所与国内其他高校和兄弟单位共同建成和筹备了多个可用于星地激光通信的光学地面站,并研制了多套可应用于不同规模的激光通信地面站的 AO 系统,在星地激光通信在轨验证的实验中取得了良好的校正结果^[38]。其中,包括有应用于 $\Phi 0.6$ m 口径的固定/移动式地面站的 AO 系统,能用来解决空-地、星-地激光通信链路之间的大气湍流问题^[12]。如图 12 所示,AO 系统采用传统的 SH-WFS 传感器搭配一个具

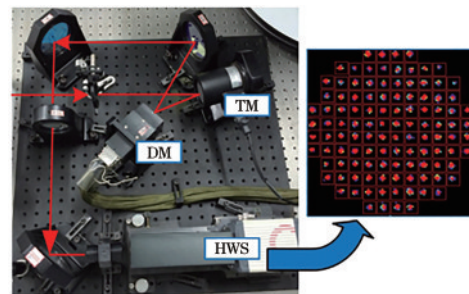


图 12 137 单元 OA 系统

Fig. 12 137-element AO system

有 137 单元的变形镜进行波前探测和波前校正,快反镜可以用来对跟踪误差进行补偿,系统的闭环频率在 1.6 kHz 以上。在中强大气湍流的环境下,AO 系统能有效地抑制跟踪误差和波前畸变。如图 13 所示,AO 系统闭环时,能将跟踪的角度误差校正到 $10 \mu\text{rad}$,波

前畸变校正至小于 $\lambda/14$,从而增强了信号平均功率、降低了误码率。经 AO 补偿后,信号的平均功率提高了近 35 倍,单模光纤的平均耦合效率达到 45%,相干光通信的误码率在 10^{-6} 以下。

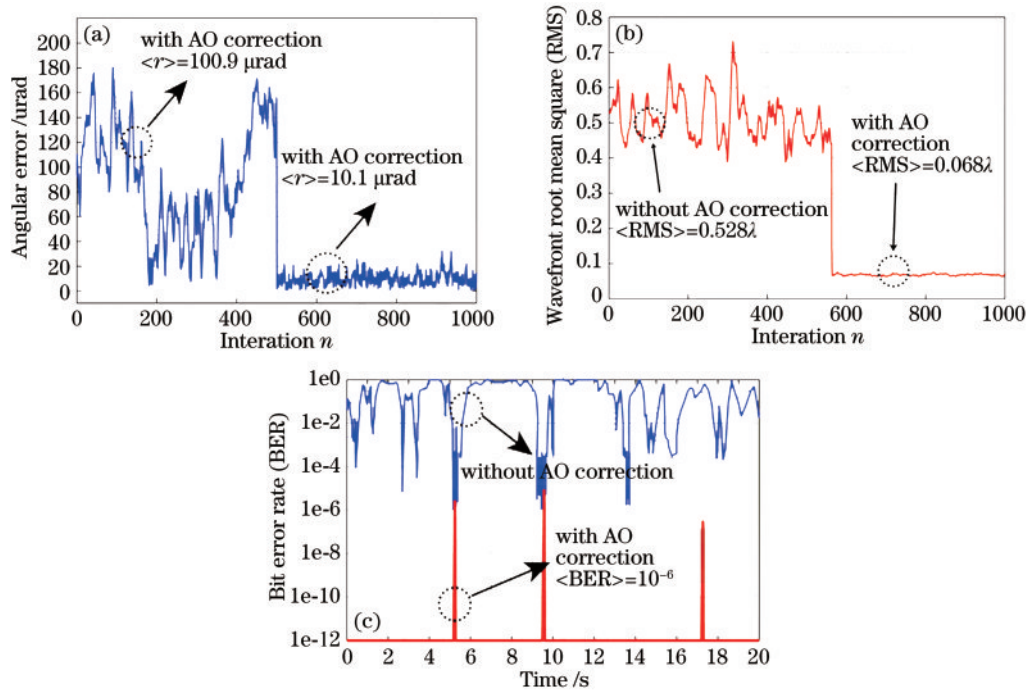


图 13 AO 系统开环/闭环时的误差测试结果。(a) 跟踪误差;(b) 波前误差;(c) 误码率

Fig. 13 Error test results with or without AO system. (a) Tracking errors; (b) wavefront distortion; (c) bit error rate

为了让地面接收端具有更强的集光能力、更短的捕获时间、更好的大气湍流抑制效果,能够更好地满足星地激光通信以及深空光通信等激光通信活动。中国科学院光电技术研究所激光通信团队结合快速建链技术、大口径望远镜接收技术、高精度 AO 校正技术以及单模光纤耦合技术,研制了目前国际上口径最大(1760 mm)的激光通信地面站——丽江站,如图 14 所示。



图 14 丽江 1.8 m 光通信地面站

Fig. 14 1.8 m-optical ground station in Lijiang

该地面站上装配了 357 单元的 AO 系统,该系统是目前国内光通信地面站中规模最大的 AO 系统。到目前为止,丽江站已经与低轨、中轨和高轨卫星进行了多次星地激光通信实验。2020 年,该地面站与“实践二十号”成功建立了通信率高达 10 Gbps@QPSK 的星地通信链路,这是目前世界上在轨验证的最高传输速率^[39]。如图 15 所示,在大气相干长度 $r_0 \geq 6.7 \text{ cm}$ ($\lambda = 550 \text{ nm}$) 时,经 AO 系统校正后,跟踪精度达到 $0.48 \mu\text{rad}$ (3σ),波前残差约 $\lambda/10$ ($\lambda = 1550 \text{ nm}$),进入单模光纤的耦合功率从约 -70 dBm 提升到了约 -45 dBm ,耦合效率从不足 1% 提升到 45% 以上。此外,系统还配备了高灵敏度自适应相干光纤耦合器(ACFC)对平台微小振动导致的残余抖动误差进行补偿。经过 ACFC 补偿后,还可以进一步提高光纤耦合效率。

2019 年,中国科学院光电技术研究所又新研制了一套 101 单元的短波红外 AO 系统,与新疆南山站的一个 $\Phi 500 \text{ mm}$ 的望远镜进行了对接。在中强大气湍流强度下($r_0 \geq 2.5 \text{ cm}$),经 AO 校正后,波前精度达到了 0.056λ ,卫星下行信号光束波前畸变和光束抖动得到了显著抑制,单模光纤平均接收功率从 0.2 nW 提高到 4.8 nW ,相比校正前提高了 13.8 dB,大幅提升了相干接收机的信噪比。实验结果如图 16 所示。

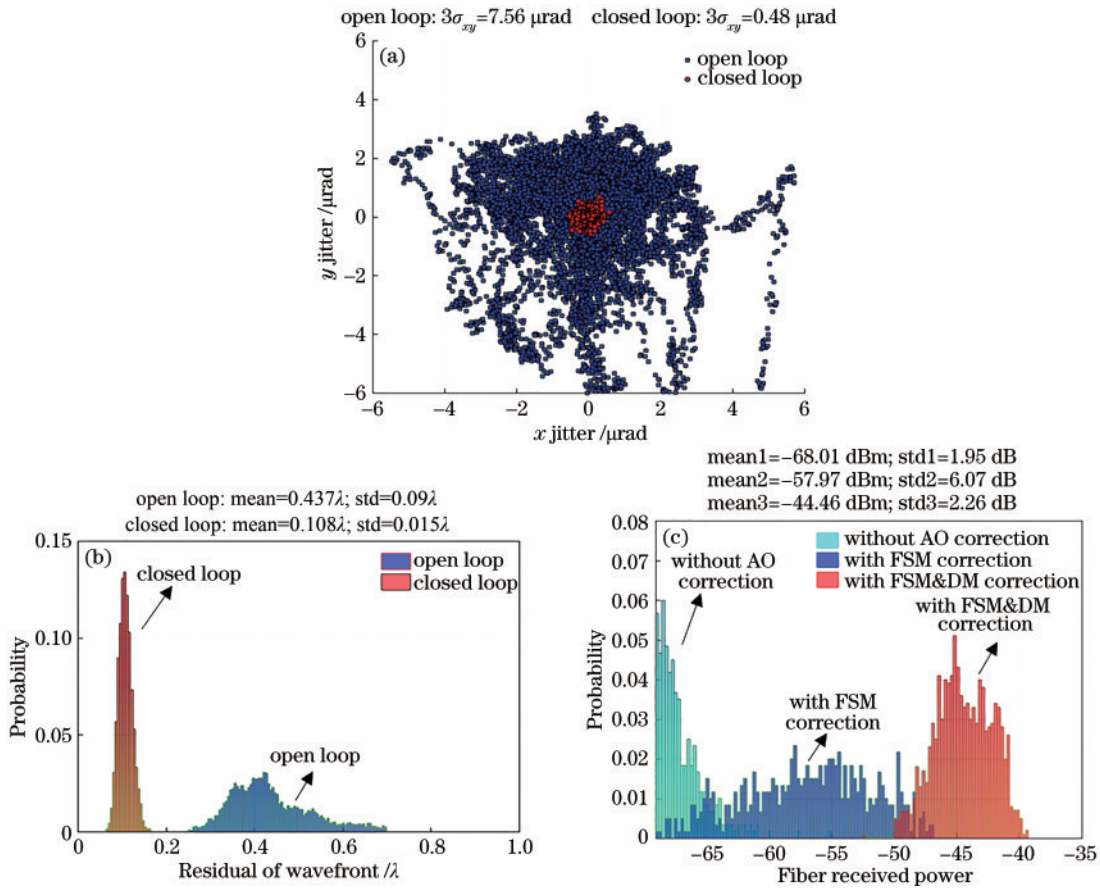


图 15 AO 补偿结果。(a) 跟踪精度;(b) 波前误差;(c) 耦合功率

Fig. 15 Compensation results with AO. (a) Tracking accuracy; (b) wavefront distortion; (c) coupling power

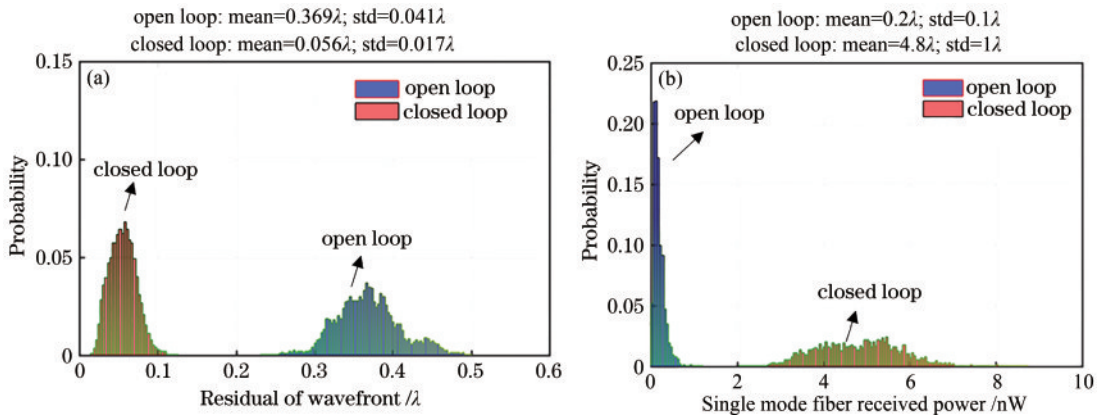


图 16 101 单元短波红外 AO 系统测试结果。(a) 波前;(b) 平均接收功率

Fig. 16 Test results of 101-element short wave infrared AO system. (a) Wavefront; (b) average received power

3 AO 在星地激光通信系统中的发展趋势与应用前景

目前,各种星地激光通信在轨实验不断地开展,月球-地、火星-地等深空激光通信活动相继被启动,各种商业卫星通信计划也开始实施。在星地激光通信领域各方面取得的重大进展,都预示着星地激光通信的大规模实用阶段即将来临。AO 系统作为大气信道湍流抑制的主要手段,直接影响到通信链路的可靠性和有

效性,是星地激光通信领域的重要研究方向之一。结合目前 AO 系统在星地激光通信链路中的应用现状和未来星地激光通信系统的发展需求,AO 技术及其应用呈现以下几个发展趋势:

1) 更强的湍流校正能力。目前大部分星地激光通信地面站的 AO 系统一般只有在大气相干长度 $r_0 \geq 10 \text{ cm}$ ($\lambda=1550 \text{ nm}$) 的中强湍流和弱湍流的大气环境下时,才能保证有良好的校正效果。即便是大气环境较好的地面站,也无法保证与卫星的通信链路能长时

间保持在良好的大气条件下。因此,需要 AO 系统具备更强的校正能力提高强湍流环境下的通信链路的可用度。一方面,需要使用更大单元数的变形镜最大限度地降低波前畸变的校正残差,提高光纤耦合效率。另一方面,亟需发展具有更高响应频率和更大动态范围的波前探测器,对更强大气湍流的信号光束波前依然能够准确地探测与校正,解决目前 AO 系统在强湍流的大气环境下校正有余、探测困难的问题。

2)更强的信号探测能力。一方面,与传统的天文观测不同,星地激光通信系统最终需要具备全时段运行的能力。但在白天,背景光噪声较强,信号光的探测困难。另一方面,对于通信距离较远的激光通信链路,地面站所能收集的光信号能量也十分有限。克服背景噪声、解决微弱光信号的探测与校正问题,也是未来 AO 系统重要的发展趋势。

3)更稳定可靠的系统性能。常态化运行的星地激光通信链路要求 AO 系统在长时间连续工作的情况下具有很高的稳定性。AO 系统的稳定性受限于系统机械结构的抖动、形变与温度的变化。室外工作环境昼夜温度的剧烈变化,机架跟踪导致的安装基面发生微小形变,均会导致 AO 系统的闭环零点与光纤零点发生漂移,影响光纤的耦合效率。可通过在 AO 系统中加入自适应光纤耦合器,对零点漂移误差进行校正,进而有效地解决该问题。

4)无人自动化运行。未来的星地激光通信链路以及整个空间光通信网络必然是在无人值守的状态下常态化运行的。这就要求 AO 系统也具备智能的判决能力,可自动确定开闭环条件,实现自动开闭环的操作和智能地进行故障定位与判决,并可自动采取相应措施。

此外,无波前 AO 技术也是一个重要的发展方向。相比于常规的 AO 系统,无波前 AO 系统不需要波前探测器,能更好地应对强闪烁的大气通信链路,在一定程度上降低了 AO 系统的复杂度,节约了系统的设计成本和体积。同时,无波前 AO 系统也不需要对接终端的光信号进行分光,使 AO 系统在光信号能量较弱的条件下也具备良好的工作性能。近些年,人工智能技术也被应用在无波前 AO 系统中,使得 AO 系统具备学习和记忆能力,更加智能化,解决了目前无波前 AO 系统所使用的优化算法收敛速度较慢以及出现局部收敛的问题。为无波前 AO 系统在星地激光通信领域的应用和发展提供了新的研究思路。

4 结 论

AO 技术作为一种主动补偿技术,已经成为美国、欧洲等国家和地区用来解决星地激光通信系统中大气湍流问题的主要手段,在其主要的光通信地面站上都装配了 AO 系统,并对系统进行了多次验证实验与升级。同时,还研制了可应用于移动地面站的 AO 系统来保障星地激光通信链路的高可用度。

国内以中国科学院光电技术研究所为代表的研究机构,针对不同的星地激光通信链路特点,研制了多套适用于不同口径的激光通信 AO 系统,相关进展与国外保持一致。国内外多次星地激光通信的演示验证实验表明,AO 系统已成为高可用度星地激光链路必不可少的重要组成部分。光通信 AO 系统可高效校正大气湍流导致的波前畸变,提高单模或多模光纤耦合效率,降低光纤内接收光信号的光强闪烁,达到提高信噪比、降低误码率的目的。

目前,星地激光通信正朝着高速化、网络化、常态化方向发展,也促使着激光通信 AO 技术朝着更强的探测能力、更高的校正能力以及更稳定的工作性能方向发展,以实现大气湍流更强的抑制能力,保障星地链路的高可用度。

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] "我国激光技术与应用发展战略研究"项目综合组.我国激光技术与应用 2035 发展战略研究[J].中国工程科学,2020,22(3):1-6.
Research Group of Strategic Research on China's Laser Technology and Its Application by 2035. Strategic research on China's laser technology and its application by 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 1-6.
- [3] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE, 2005.
- [4] 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, July 25-25, 2008, Graz, Austria. New York: IEEE Press, 2008: 540-543.
- [5] Belmonte A, Kahn J M. Capacity of coherent free-space optical links using diversity-combining techniques[J]. Optics Express, 2009, 17(15): 12601-12611.
- [6] Andrews L C. Aperture-averaging factor for optical scintillations of plane and spherical waves in the atmosphere[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9(4): 597-600.
- [7] Sampson R, Liu H Y, Su X Z, et al. Turbulence-resistant free-space communication using few-mode pre-amplifiers[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10947: 1094707.
- [8] Nicolas P, Daniel F. Aperture averaging: theory and measurements[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2004, 5338: 233-242.
- [9] 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.
- [10] Rui D M, Liu C, Chen M, et al. Probability enhancement of fiber coupling efficiency under turbulence with adaptive optics compensation[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 60: 102343.
- [11] Liu C, Chen M, Chen S Q, et al. Adaptive optics for the free-space coherent optical communications[J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 21-24.
- [12] Chen M, Liu C, Rui D M, et al. Experimental results of 5-Gbps free-space coherent optical communications with adaptive optics[J]. *Optics Communications*, 2018, 418: 115-119.
- [13] Chen M, Liu C, Rui D M, et al. Highly sensitive fiber coupling for free-space optical communications based on an adaptive coherent fiber coupler[J]. *Optics Communications*, 2019, 430: 223-226.
- [14] Osborn J, Townson M J, Farley O J D, et al. Adaptive Optics pre-compensated laser uplink to LEO and GEO [J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 6113-6132.
- [15] Wu J L, Ke X Z. Development of adaptive optical correction and polarization control modules for 10-km free-space coherent optical communications[J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(3): 189-195.
- [16] Saathof R, den Breeje R, Klop W, et al. Pre-correction adaptive optics performance for a 10 km laser link[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10910: 109101H.
- [17] Védrenne N, Conan J M, Petit C, et al. Adaptive optics for high data rate satellite to ground laser link[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9739: 119-128.
- [18] Wilson K E, Leatherman P R, Cleis R, et al. Results of the compensated earth-moon-earth retroreflector laser link (CEMERLL) experiment: TDA Progress Report 42-131[R]. Washington, D.C.: NASA, 1997.
- [19] Oaida B V, Wu W, Erkmén B I, et al. Optical link design and validation testing of the Optical Payload for Lasercomm Science (OPALS) system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8971: 235-249.
- [20] Wright M W, Morris J F, Kovalik J M, et al. Adaptive optics correction into single mode fiber for a low Earth orbiting space to ground optical communication link using the OPALS downlink[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33705-33712.
- [21] Wright M W, Kovalik J, Morris J, et al. LEO-to-ground optical communications link using adaptive optics correction on the OPALS downlink[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9739: 19-28.
- [22] Israel D J. Laser communications relay demonstration: introduction for experimenters[M]. Washington, D. C.: NASA, 2017.
- [23] Roberts L C, Jr, Burruss R, Fregoso S, et al. The adaptive optics and transmit system for NASA's Laser Communications Relay Demonstration project[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9979: 99790I.
- [24] Hayano Y, Arimoto Y, Klaus W. Ground-to-satellite laser communication program at CRL using adaptive optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3126: 208-215.
- [25] Hayano Y, Klaus W, Arimoto Y. Prototype adaptive optics system for ground-to-satellite laser communication [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3353: 726-734.
- [26] Kubo-Oka T, Kunimori H, Suzuki K, et al. Development of "HICALI": high speed optical feeder link system between GEO and ground[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11180: 2158-2165.
- [27] Berkefeld T, Soltau D, Czichy R, et al. Adaptive optics for satellite-to-ground laser communication at the 1 m Telescope of the ESA Optical Ground Station, Tenerife, Spain[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7736: 1539-1546.
- [28] Gregory M, Troendle D, Muehlnikel G, et al. Three years coherent space to ground links: performance results and outlook for the optical ground station equipped with adaptive optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8610: 17-29.
- [29] Saucke K, Seiter C, Heine F, et al. The Tesat transportable adaptive optical ground station[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9739: 973906.
- [30] Fischer E, Berkefeld T, Ferencik M, et al. Development, integration and test of a transportable adaptive optical ground station[C]//2015 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, October 26-28, 2015, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2015.
- [31] Heine F, Pimentel P M, Rochow C, et al. The European data relay system and Alphasat to T-AOGS space to ground links, status, and achievements in 2017 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10524: 105240T.
- [32] Saucke K, Mahn R, Pimentel P M, et al. Three years of optical satellite to ground links with the T-AOGS: data transmission and characterization of atmospheric conditions [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11180: 111801D.
- [33] Fischer E, Ferencik M, Kudielka K, et al. (Invited) Upgrade of ESA optical ground station with adaptive optics for high data rate satellite-to-ground links[C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, November 14-16, 2017, Naha, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 63-70.
- [34] Fischer E, Ferencik M, Kudielka K, et al. ESA optical ground station upgrade with adaptive optics for high data rate satellite-to-ground links-test results[C]//2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications, October 14-16, 2019, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2019.
- [35] Bonnefois A M, Conan J M, Petit C, et al. Adaptive optics pre-compensation for GEO feeder links: the FEDELIO experiment[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11180: 889-896.
- [36] Védrenne N, Conan J, Bonnefois A, et al. Adaptive optics pre-compensation for GEO feeder links: Towards an experimental demonstration[C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), November 14-16, 2017, Naha, Japan. New York: IEEE Press, 2017: 77-81.
- [37] 长春光机所为北斗全球系统研制的大型激光通信标校

- 设备完成星地试验 [EB/OL]. (2021-11-26). https://www.cas.cn/syky/202111/t20211126_4815982.shtml.
- The large-scale laser communication calibration equipment developed by Changchun Institute of Optics and mechanics for Beidou global system has completed satellite ground test [EB/OL]. (2021-11-26). https://www.cas.cn/syky/202111/t20211126_4815982.shtml.
- [38] 芮道满, 刘超, 陈莫, 等. 自适应光学技术在星地激光通信地面站上的应用 [J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170647.
- Rui D M, Liu C, Chen M, et al. Application of adaptive optics on the satellite laser communication ground station [J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 170647.
- [39] 崔岳, 唐勇. 实践二十号卫星在轨核心试验全部完成 [J]. 国际太空, 2020(7): 38-41.
- Cui Y, Tang Y. The in-orbit core test of practical satellite No. 20 was completed [J]. Space International, 2020(7): 38-41.