

## 超小型单模光纤耦合动态激光通信终端

于笑楠, 石家玮, 赵佰秋, 代超, 徐立, 林鹏, 王天枢, 佟首峰

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对空间激光通信场景中激光通信终端网络化、标准化需求, 提出一种超小型单模光纤耦合动态激光通信终端构型, 以促进空间激光通信与光纤通信网络快捷融合。首先考虑楼宇、车辆、无人机间激光建链需求, 分析建立超小型激光通信链路模型。其次, 针对动态平台、单模光纤耦合等方面的需求, 提出基于二维摆镜和笼式结构的快捷激光通信终端模型。此外, 针对此模型, 设计了复合式捕获跟踪和收敛算法, 能够高效实现双端扫描捕获与耦合。外场实验结果表明, 相较于传统终端, 所提构型在保证误码率的前提下, 以更小的天线尺寸 (20 mm) 实现了更快的扫描捕获, 达到了更远的作用距离 (1 km) 和更高的传输率 (10 Gbit/s), 轻量化效能为 53.46 dB。

**关键词:** 激光通信终端; 光纤耦合; 动态通信; 捕跟算法

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025247

## Ultra-compact single-mode fiber-coupled dynamic laser communication terminal

YU Xiaonan, SHI Jiawei, ZHAO Baiqiu, DAI Chao, XU Li, LIN Peng, WANG Tianshu,  
TONG Shoufeng

School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China

**Abstract:** To address the networking and standardization needs of laser communication terminals in space laser communication scenarios, an ultra-compact single-mode fiber-coupled dynamic laser communication terminal configuration was proposed, with the aim of promoting the rapid integration of space laser communication and fiber optic communication networks. First, considering the demand for laser link establishment among buildings, vehicles, and unmanned aerial vehicles, an ultra-compact laser communication link model was analyzed and established. Second, to meet the requirements of dynamic platforms and single-mode fiber coupling, a fast laser communication terminal model based on two-dimensional pendulum mirrors and a cage structure was put forward. Subsequently, for this model, a composite acquisition, tracking, and convergence algorithm was designed, enabling efficient implementation of double-end scanning, acquisition, and coupling. External field experiments were conducted, and the results showed that, compared with traditional terminals, the proposed configuration under the premise of ensuring the bit error rate, achieved faster scanning and acquisition with a smaller antenna size (20 mm), a longer operating distance (1 km), and a higher transmission rate of 10 Gbit/s. The lightweight performance is 53.46 dB.

**Keywords:** laser communication terminal, fiber coupling, dynamic communication, catch-and-follow algorithm

收稿日期: 2025-08-15; 修回日期: 2025-12-13

通信作者: 于笑楠, yuxiaonan@cust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62401085); 科技部重点研发计划基金资助项目 (No.2022YFB3902500); 吉林省科技发展计划基金资助项目 (No.YDZJ202301ZYTS413); 中国工程院科技战略咨询基金资助项目 (No.2025-XZ-14)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62401085), The Key Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology (No.2022YFB3902500), Jilin Province Science and Technology Development Plan Project (No.YDZJ202301ZYTS413), Science and Technology Strategic Consulting Project of the Chinese Academy of Engineering (No.2025-XZ-14)

## 0 引言

空间激光通信经过近 30 年的发展, 关键技术相继突破, 系列产品逐步应用。但是, 网络化和标准化仍然是其重要的且待完善的技术方向。对于网络化, 包含两重含义, 一方面是空间激光链路间快速组网, 另一方面是与商用光纤网络无缝融合。而满足网络化特征的轻小型快捷低成本激光通信终端, 则是标准化的基础。

激光通信凭借其带宽大、抗干扰能力强、保密性优的技术特性, 已成为空天通信、应急通信等关键领域的核心支撑技术, 其建链效率、跟踪精度与耦合性能直接决定通信系统的实战效能与应用边界。当前主流激光通信功能机在实际部署中仍面临诸多技术瓶颈, 传统链路建链依赖复杂的时间同步机制、交互链路及相互导引流程, 导致对准流程烦琐、导引工作量巨大, 建链时间与传输延迟居高不下, 难以满足动态场景下的快速通信需求。赵奇等<sup>[1]</sup>在无线激光通信初始捕获外场实验中, 其捕获的时间在 213~365 s; 滕云杰等<sup>[2]</sup>在空间激光通信系统无信标捕获实验中, 其平均捕获时间为 49.1 s。在跟踪环节, 现有系统多采用单一跟踪模式或多模光纤耦合方案, 不仅跟踪精度有限, 且多模耦合存在信道容量受限、信号损耗较大等问题, 无法实现高密度数据的高效传输。赵馨等<sup>[3]</sup>在动态空间激光通信系统视轴初始指向实验中, 其指向精度为 2.7 mrad。同时, 传统系统硬件架构固化、软件适配性差, 缺乏灵活重构能力, 难以应对多样化通信场景的动态需求。

针对上述出现的问题, 本文提出一种基于双向协同与可重构的高密度动态激光通信系统, 核心优势包括以下 2 个方面。首先在链路建立方面, 突破传统建链逻辑, 采用双向协同同步对准技术, 不需要额外时间同步机制、交互链路及相互导引流程, 大幅简化导引环节, 显著缩短对准时间与传输时延, 实现动态场景下的快速建链; 在跟踪与耦合性能上, 通过多维度协同控制实现超高精度跟踪, 直接将激光信号高效耦合至单模光纤, 实现高耦合效率的动态激光通信, 为高密度数据传输提供核心支撑。其次在硬件系统灵活性上, 基于笼式结构实现硬件与软件的可重构, 可根据通信距离、数据速率、场景环境等动态需求, 灵活调整系统配置, 显著提升系统的环境适配性与功能扩展性。

本文聚焦单模光纤高密度动态激光通信的核心技术突破, 通过双向协同对准、二级高精度跟踪与可重构架构的融合, 解决传统激光通信系统建链慢、跟踪精度低、耦合效率不足、适配性差等问题, 为激光通信技术在更广泛动态场景中的应用提供新的技术路径。

根据调研显示, 国内外对激光通信终端小型化、轻量化都进行了设计<sup>[4-6]</sup>, 具体参数如表 1 所示。

表 1 典型近地面 FSO 性能分布

光端机型号	重量/kg	功耗/W	通光口径/mm	传输速率/(Gbit·s <sup>-1</sup> )	传输距离/km
英国 CF1500 型号光端机	9	60	150	0.622	1.5
英国 Tere-Scope 4000 型号光端机	9	35	200	0.155	3.0
加拿大 SON-Abeam 1250-E+光端机	8	40	100	1.25	4.5
加拿大 SON-Abeam 2500E+光端机	8	40	—	2.5	3.4
俄罗斯 M1-GE-L 型号光端机	9.4	40	100	1.25	4.4
俄罗斯 M1 10GE 型号光端机	9.4	46	88	10	1.5
南京大学 LIU Huaying 团队光端机	9.5	10	90	9.16	1
长春理工大学便携式光端机	3	15	20	10	1

随着激光通信系统在近地面、机载以及空间等多种应用场景中的推广, 通信终端正朝着轻量化、小型化、便携化方向快速发展。为了更直观地评估激光通信终端在不同设计参数下的效能<sup>[7]</sup>, 本文提出如下性能评价模型。

$$\text{FOM}(\text{dB}) = 10\lg \left[ \frac{L^2 \cdot \text{BPS}_{\text{MAX}}}{\text{Mass} \cdot \text{Power}} \cdot \frac{L_1^2 \cdot \text{BPS}_{\text{MAX}1}}{\text{Mass}_1 \cdot \text{Power}_1} \right] \quad (1)$$

其中,  $\text{BPS}_{\text{MAX}}$  为通信速率 (Gbit/s),  $L$  为通信距离 (m),  $\text{Mass}$  为终端重量 (kg),  $\text{Power}$  为端机功耗 (W)。为了实现参量归一化, 将通信终端的实际值

除以参考值,得到无量纲比值。式(1)中  $BPS_{MAX1}$  为常量 1 Gbit/s,  $L_1$  为常量 1 m,  $Mass_1$  为常量 1 kg,  $Power_1$  为常量 1 W。在光通信终端设计中, FOM 是从参考文献[7]中引用的轻量化指标,量化了单位资源消耗所支撑的通信能力。该性能指标 FOM 数值越大,代表终端综合性能越好,尤其在便携性与小型化设计方面表现更佳。该模型可作为便携式激光通信终端设计方案对比与选型的参考依据。

经计算得:英国 CF1500 型号光端机的效能是 34.13 dB,英国 TereScope 4000 型号光端机的效能是 36.46 dB,加拿大 SONAbeam 1250-E+光端机的效能是 48.98dB,加拿大 SONAbeam 2500E+光端机的效能是 49.55 dB,俄罗斯 M1-GE-L 型号光端机的效能是 48.08 dB,俄罗斯 M1 10GE 型号光端机的效能是 47.16 dB,南京大学 Hua-Ying Liu 团队光端机的效能是 49.84 dB,长春理工大学便携式光端机的效能是 53.46 dB。

本文主要研究了一种超小型空间激光通信终端,以 20 mm 口径,实现 1 km 链路下的双端动态 10 Gbit/s 信息传输,首先论述这种超小型激光通信终端的链路裕量和效率问题,其次给出笼式结构的动态激光通信终端构型,接下来讨论快捷瞄准捕获与跟踪策略以及章动耦合收敛过程,最后开展外场捕跟和传输试验,验证理论构型的准确性。

## 1 系统模型

### 1.1 链路模型

超小型单模光纤耦合的激光通信终端研究,首先需要建立该系统的链路裕量模型<sup>[8]</sup>。

链路裕量表达式为

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta_{ot} \cdot L_s \cdot L_{APT} \cdot G_r \cdot \eta_{or} \quad (2)$$

其中,  $P_r$ 、 $P_t$  分别是接收和发射光功率,  $G_t$ 、 $G_r$  分别是发射和接收天线增益,  $\eta_{ot}$ 、 $\eta_{or}$  分别是发射和接收光学系统效率,  $L_s$  是空间损耗,  $L_{APT}$  是跟瞄失配损耗。

发射光路损耗是由发射光学系统效率直接决定的,接收光路损耗是由接收光学系统效率直接决定的。

发射天线增益是指光束从全向空间压缩到指定空间的比率,接收天线增益是指接收天线通过聚焦特性,将特定方向的入射光能量汇聚到探测器上的

能力,其表达式均为

$$G = \frac{8}{\left(\frac{\theta}{2}\right)^2} \quad (3)$$

其中,  $\theta$  是发射端与接收端光学天线束散角。

发射与接收天线增益都与光学天线束散角有关,光学天线束散角表达式为

$$\theta = \frac{MFD}{f} \quad (4)$$

其中, MFD 是模场直径,  $f$  是准直器的焦距。

束腰直径是指高斯光束在其传播路径中横截面最小的直径,束腰直径与光学天线束散角成反比,束腰直径表达式为

$$d = \frac{4\lambda}{\pi\theta} \quad (5)$$

其中,  $\lambda$  是激光波长。

接收口径是与计算自由空间损耗的重要参数,其与束腰直径成正比,接收口径表达式为

$$D = \sqrt{8} d \quad (6)$$

空间损耗是指电磁波在理想的均匀、无损耗介质中传播时,因波束自然扩散导致的能量衰减,其表达式为

$$L_s = \left(\frac{\lambda}{4\pi L}\right)^2 \quad (7)$$

其中,  $\lambda$  是通信光的波长,  $L$  是发射天线到接收天线的距离。

跟瞄失配损耗是指由于发射端与接收端的对准偏差,发射波束无法完全覆盖接收孔径或耦合进接收光路,从而造成的信号功率损失,其表达式为

$$L_{APT} = e^{-8 \cdot \left(\frac{\theta_{off}}{\theta_{div}}\right)^2} \quad (8)$$

其中,  $\theta_{off}$  离轴的角度,  $\theta_{div}$  为激光束散角,  $\frac{\theta_{off}}{\theta_{div}}$  为跟瞄失配因子,对应实际系统的跟踪误差。

经过最初的光学设计和后期的光功率测试得到发射效率  $\eta_{ot}=80\%$ ,接收效率  $\eta_{or}=10\%$ ,经计算可得发射光路损耗为 -0.96 dB,接收光路损耗为 -10 dB。这个通信终端的光学系统采用的是单模光纤耦合,所以计算时模场直径采用 10.4  $\mu\text{m}$ ,准直器的焦距为 37.13 mm,经计算得  $\theta=280 \mu\text{rad}$ 。从式(4)可以得到,光学天线的束散角为 280  $\mu\text{rad}$ ,经计算得  $G_t=86.11 \text{ dB}$ ,  $G_r=86.11 \text{ dB}$ 。通信光波长是 1 550 nm,经计算得  $d=7 \text{ m}$ ,  $D=20 \text{ mm}$ 。这次激光通信实验的

设定距离是 1 km, 通信光链路裕量如表 2 所示, 使用波长为 1 550 nm 的红外光进行通信, 经计算得  $L_s = -198$  dB。已知  $\theta_{\text{off}} = 100 \mu\text{rad}$ ,  $\theta_{\text{div}} = 280 \mu\text{rad}$ , 经计算得  $L_{\text{APT}} = -4.43$  dB。

表 2 1 km 通信光链路裕量

参量名称	取值	备注
发射功率/dBm	23	经主放大器, 发射功率达 200 mW
发射损耗/dB	-0.96	$\eta_{\text{ot}} = 80\%$
发射天线增益/dB	86.11	$\theta_t = 280 \mu\text{rad}$
空间损耗/dB	-198	$\lambda = 1\ 550\ \text{nm}$ , $L = 1\ \text{km}$
接收天线增益/dB	86.11	$\theta_r = 280 \mu\text{rad}$
跟瞄失配损耗/dB	-4.43	$\theta_{\text{off}} = 100 \mu\text{rad}$ , $\theta_{\text{div}} = 280 \mu\text{rad}$
接收损耗/dB	-10	$\eta_{\text{or}} = 10\%$
到达接收端光功率/dBm	-18.17	
接收端探测灵敏度/dBm	-23	
链路裕量/dB	4.83	

在 1 km 通信链路的情况下, 发射端加了主放大器, 使出射通信光的光功率达到 23 dBm, 接收端的探测灵敏度为 -23 dBm。最终理论上链路裕量为 4.83 dB, 满足通信需求。

## 1.2 终端模型设计

系统采用通信光路与信标光路共口径设计, 有效口径尺寸为 20 mm。跟踪执行机构为 2 个垂直叠放的二维振镜, 构成方位、俯仰两轴跟踪系统。终端采用二维振镜与笼式结构相结合的方式, 笼式结构以轻质高强度材料搭建多轴框架, 形成封闭或半封闭的笼体结构, 能抵御振动、冲击和温度变化带来的形变, 将光路偏差控制在微米级, 确保远距离通信的光路对准精度, 大大增加了通信终端的稳定性, 减轻了通信终端的负载。此外, 笼式结构的运用实现了通信终端的轻量化和可重构化, 笼式结构可通过对硬件模块化设计与资源的灵活配置, 实现硬件系统对通信需求的适配, 最大化生命周期价值。此次二维振镜选用的是检流计振镜, 相较于传统的微机电系统扫描镜 (MEMS, micro-electro-mechanical system)、快反镜和二轴跟踪架反射镜, 检流计振镜具有温漂补偿、快速响应的优势, 且兼具  $\pm 20^\circ$  大行程、30 mm 大负载能力, 可实现大行程、高速响应的工作需求。

相较于传统通信终端, 二维振镜与笼式结构相结合的方式在提升系统稳定性的同时进一步提高光纤耦合效率, 从而满足单模光纤耦合对于耦合效率的需求, 一定程度上减轻系统装调对于伺服性能和通信质量的影响, 且大大减小了通信终端的体积与重量, 满足了通信终端的轻量化和小型化的需求。系统的通信光收发波段为 1 550 nm, 信标光波段分别为 520 nm 与 658 nm。光路设计如图 1 所示, 端机三维模型如图 2 所示。

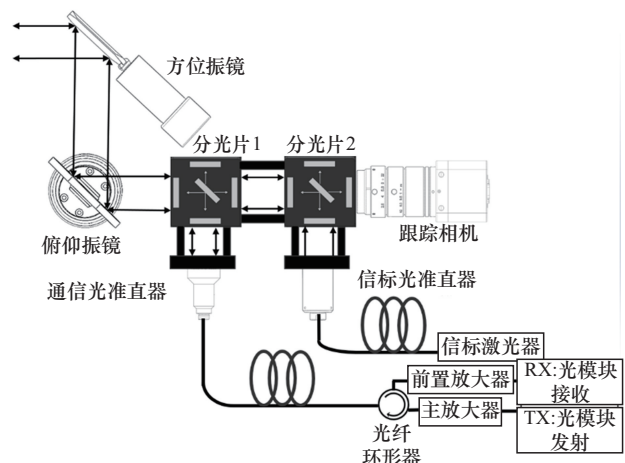


图 1 光路设计

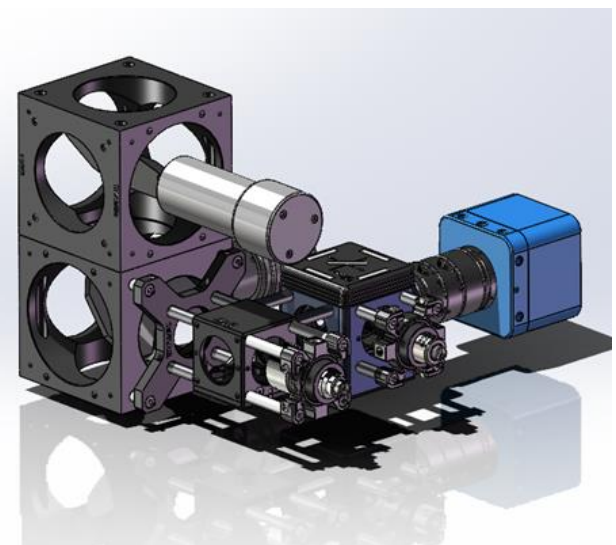


图 2 端机三维模型

在光端机系统中, 俯仰振镜与方位振镜作为光路调节的核心执行部件, 通过接收相机反馈的信标光脱靶量信息, 实时调整偏转角度, 从而实现对光路的精准捕获、稳定跟踪以及章动控制, 确保光束始终保持在预设的传输路径上。通信光准直器有着

接收和发射通信光双重作用,一方面将接收的发散通信光耦合汇聚,另一方面将待发送的通信光准直为平行光束发射出去,保障通信光在传输过程中的方向性和能量集中度。信标光准直器发射具有大束散角的可见光光束,这种光斑能够在较大空间范围内形成可探测区域,可降低初始捕获阶段的对准难度。分光片1采用起始波长为950 nm的短波通二向色镜,其光谱选择性使得1550 nm波长的通信光能够被高效反射,而低于900 nm的信标波长则有效透射,从而在光路中实现通信光与信标光的分离。分光片2为起始波长567 nm的短波通二向色镜,可透过520 nm的绿色可见光,同时反射658 nm的红色可见光,进一步对不同波长的信标光进行分离与筛选,满足系统对特定波长信标光的处理需求。相机与镜头共同构成信标光的探测与成像单元,捕捉信标光光斑的位置,生成脱靶量信息,反馈给总控系统进行振镜调节。光纤环形器在光路中起到单向导光的作用,它能控制光信号的传输方向,避免反射光对发射端造成干扰,保障光信号传输的单向性和稳定性。主放大器则用于对发射的通信光进行放大处理,通过提升光功率来弥补传输过程中的损耗。前置放大器主要是用于对接收到的微弱通信光进行放大处理,以此尽快达到接收端的灵敏度,快速完成捕获。

## 2 快速捕获跟踪收敛策略

### 2.1 系统快速捕获

终端系统在结构层面,主要由4个核心部分构成,它们分别是总控系统、终端伺服控制系统、图像处理系统以及激光终端,这4个部分相互配合,共同保障终端系统的稳定运行<sup>[2]</sup>。

总控系统在整个终端系统中有着指令处理与协调的作用。总控系统首先会接收来自上位机下达的各项指令,并依据这些指令完成初始指向操作,为后续的系统运行奠定基础。总控系统通过串口将相关指令精准发送给伺服控制系统,以此实现对振镜位置的有效调控,确保振镜能够按照预期进行动作。其次总控系统还有操控伺服系统的职责,其目的是让通信光在存在不确定性的区域内顺利完成扫描动作,从而扩大通信光的覆盖范围,提高通信的可靠性。在图像处理系统中,相机发挥着关键作用,监测视场里光斑的变动情

况,并根据这些变动精确计算出脱靶量、像元等一系列重要信息。同时图像处理系统会依据探测器所接收的功率数据,运用收敛算法控制振镜逐步向接收中心靠近。经过这一系列的操作,最终能够使发射光轴与接收光轴保持一致,成功实现捕获,进而搭建起稳定的通信链路。该激光通信终端的瞄准机构采用的是二维振镜,这种振镜能够实现灵活的角度调整。在工作过程中,瞄准机构采用连续扫描的方式,以确保能够快速、准确地捕捉到目标。2个终端分别被标记为终端A和终端B,其具体的捕获步骤如下。

如图3(a)所示,通信终端按照设定好的控制参数,终端A与终端B发射信标光,将初始指向点对准对方的激光通信终端<sup>[9]</sup>。双端不断调试方位和俯仰双轴振镜后,当信标光光斑出现在各自的相机视场中后,初始指向结束,随后进入双端扫描程序。如图3(b)所示,首先终端A进行单周矩形螺旋扫描,终端A在扫描模式下开始在不确定区域内开展全域扫描,每个扫描点的驻留时长设定为1 ms。当终端A完成单次一个周期的扫描后,会控制信标光束移动到相机视场之外,终端A的信标光束在视场之外的驻留时间为50 ms。在这段时间里,终端B的视场中原本存在的光斑会消失,脱靶量也会随之产生变化,终端B随之开启矩形螺旋跳步扫描。即在扫描周期内移动一个扫描步长,随后终端A的信标光束会重新进入终端B相机的视场并开始扫描,而终端B则从扫描模式切换到凝视状态,如图3(c)所示,通过这样的循环往复。直到终端A的探测器接收到的光功率高于-45 dBm,终端A停止扫描,双端交互开启收敛模式,如图3(d)所示,直到最终收敛到双端接收功率的峰值所在位置。当达到这一状态时,整个收敛过程就正式结束,相应的捕获工作也随之完成。

本文运用的矩形螺旋扫描方法是从不确定区域的中心位置朝着边缘区域进行扫描的,即先在光功率覆盖率较高的区域进行快速扫描,再逐步扫描到光功率覆盖率较低的区域。这样的扫描路径,能够实现对整个不确定区域的全面扫描,不会遗漏任何一个不确定区域,从而大大提升了捕获的概率。如图3所示,每次扫描的不确定区域大小是 $\theta_{ua}$ ,所以矩形螺旋扫描所覆盖的范围就是一个边长为 $\theta_{ua}$ 的正方形区域<sup>[10-11]</sup>。

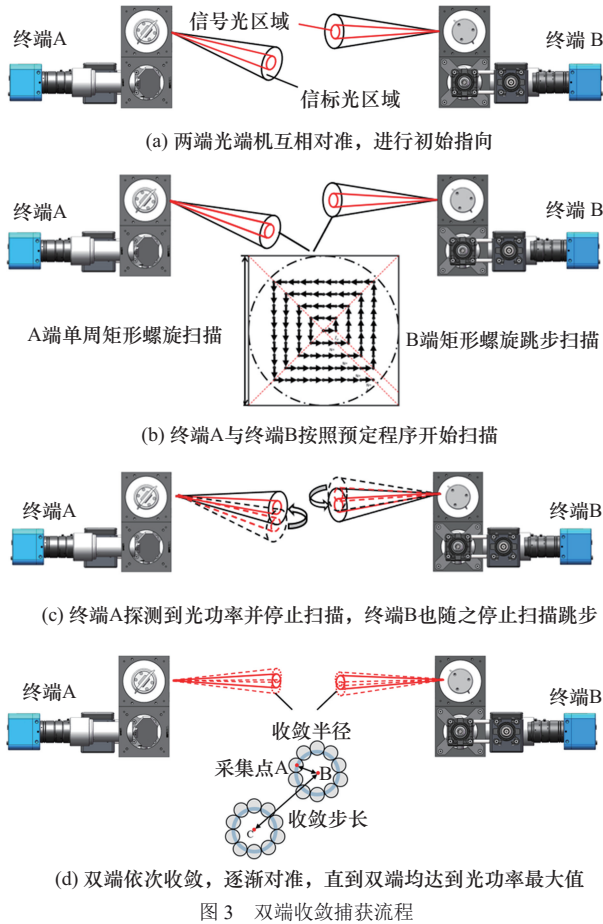


图 3 双端收敛捕获流程

根据矩形螺旋扫描规律，经计算得单独完整扫描第  $i$  圈所需的步数为  $8i$ ，则从起始点开始扫描至全部完成时，共扫描了  $N$  圈，总扫描步数  $M$  可表示为

$$M = \sum_{i=1}^N 8i = 4N^2 + 4N \quad (9)$$

其中， $i$  是具体第几圈的圈数序号， $N$  是扫描不确定区域的整圈次数。

为避免扫描过程中出现抖动导致的漏扫以及扫描区域重叠等问题，在确定实际扫描步长时，需要考虑扫描光束的束散角，并在其中引入一个重叠系数  $K$ 。扫描步长为

$$I_\theta = (1 - K)\theta \quad (10)$$

其中， $\theta$  为束散角，通信束散角为  $280 \mu\text{rad}$ ，选取的重叠系数为  $0.107$ ，扫描步长为  $250 \mu\text{rad}$ 。

扫描光束从中心开始扫描，每扫描一点扫描路径增加一个扫描步长  $I_\theta$ ，因此完成  $N$  圈的完整扫描时，扫描总路径的长度  $I_N$  为

$$I_N = I_\theta M = 4I_\theta N(N + 1) \quad (11)$$

其中， $\theta_u$  为捕获不确定区半角， $\theta_u = \frac{\theta_{ua}}{2}$ 。当扫描光束采用矩形螺旋扫描方式对整个捕获不确定区进行扫描时，扫描的最大圈数  $N_{\max}$  为

$$N_{\max} = \left\lceil \frac{\theta_u}{I_\theta} \right\rceil \quad (12)$$

其中， $\Delta t$  是扫描一个步长的时间，所以对整个不确定区域的扫描时间  $t_U$  为

$$t_U = \Delta t (4N_{\max}^2 + 4N_{\max} + 1) \quad (13)$$

## 2.2 章动耦合收敛

在扫描进行时，由于单模光纤无法达成完全的耦合状态<sup>[11]</sup>，这一情况会引发一定程度的损耗，同时为了保证发射端与接收端的视轴能够精准匹配，所以进一步执行收敛操作。收敛扫描的工作原理如图 3 所示。即发射端会把当前的指向位置设定为原点，随后利用振镜的快速摆动让光斑以一个固定的半径开展扫描工作。点  $B$  是扫描的中心位置，点  $A$  和点  $B$  之间的距离被定义为收敛半径，而在整个扫描周期中，总共会选取  $N$  个采样点。当一个完整的扫描周期结束后，总控系统会对所有采样点所对应的功率进行比较分析，将其中功率最大的那个点所在的方向确定为收敛方向。如图 3 所示，把扫描中心  $B$  沿着这个收敛方向移动一个固定的步长  $|BC|$ ，到达点  $C$  的位置，随后开启下一次扫描。通过这样的一次次章动扫描，发射端会不断朝着接收功率更高的点靠近。这个过程会持续进行，当整个收敛扫描区域内扫描点接收的功率值均低于当前收敛扫描周期原点时，收敛扫描正式完成。通过这样的方式，能够让发射光轴和接收光轴尽可能地重合，进而使视轴实现最大程度的匹配。在章动收敛过程中，双轴振镜执行量的计算式为

$$S_x = A_r \cos\left(2\pi \frac{i}{N}\right) + X_{\text{set}} + \sum_{i=0}^N K \cos\left(2\pi \frac{i_{\max}}{N}\right) \quad (14)$$

$$S_y = A_r \sin\left(2\pi \frac{i}{N}\right) + Y_{\text{set}} + \sum_{i=0}^N K \sin\left(2\pi \frac{i_{\max}}{N}\right) \quad (15)$$

其中， $S_x$  为方位振镜在方位轴的执行量， $S_y$  为俯仰振镜在俯仰轴的执行量， $A_r$  为收敛半径， $i$  是每个单次扫描周期第  $i$  个采样点 ( $i=0,1,2,\dots,N-1$ )， $N$  是单次周期采样点总数， $X_{\text{set}}$  与  $Y_{\text{set}}$  是收敛扫描中心初始坐标， $K$  是收敛步长， $i_{\max}$  是单周最大功率点计

数索引,  $\cos(2\pi \frac{i_{\max}}{N})$  是收敛方向单位向量的方位轴分量;  $\sin(2\pi \frac{i_{\max}}{N})$  是收敛方向单位向量的俯仰轴分量。

### 3 实验与结果

#### 3.1 外场捕跟耦合

为了更全面地验证便携式光端机捕跟终端的性能,开展地面外场实验进行验证。此次系统实验测试是在室内外场环境中进行的,激光通信终端 A 和终端 B 分别被放置在场地的两侧。借助卫星地图对 2 个终端之间的距离进行了精确标定,最终将 2 台激光通信终端的间距设定为 1 km。本次实验测试的具体场景如图 4 所示。



图 4 终端实验场景测试

##### 3.1.1 捕获时间分析

双端建链的过程中,捕获时间  $t_B$  主要由 2 个部分组成<sup>[12]</sup>,第一个部分是扫描时间  $t_S$ ,第二个部分是双端收敛的时间  $t_L$ 。

扫描时间的表达式为

$$t_S = (t_U + t_Z) \cdot m \quad (16)$$

其中,  $t_U$  是终端 A 扫描整个不确定区域的时间,  $t_Z$  是终端 A 每扫描一个周期后跳出终端 B 视场所驻留的时间,  $m$  是终端 A 扫描不确定区域的次数。

在扫描系统中,  $t_Z$  设置为 50 ms,  $t_U$  设置为 169 ms。经过 10 次的扫描捕获实验,  $m$  的平均数为 62.1, 所以系统的扫描平均时间为 13.5 s。

在收敛过程中,收敛时间主要由收敛步长以及

收敛半径决定。此外,在收敛之前,收敛时间还与双端扫描结束时停留的位置有关,收敛前对应位置的接收功率高,距离峰值功率近,则会缩短双端收敛时间,由于每次捕获时的光功率大小不一,双端收敛的时间具有一定的差异。

##### 3.1.2 跟踪精度分析

双端的跟踪精度主要通过成像系统的脱靶量体现,核心是通过几何关系将像素级的光斑偏移量转换为角度偏差<sup>[13]</sup>。

在跟踪状态下时,当双端光斑未能到达预设的光斑脱靶量区域,双端就会产生角度失调。角度失调会在空间激光通信链路裕量中产生额外的跟瞄失配损耗。这将对信号功率产生不利影响,导致系统信噪比下降,误码率增加,影响通信质量和最远通信距离,从而影响光端机的品质因数 (FOM, figure of merit)。

经过多次测量得到相机的视场大小,方位轴的偏转角度是  $6.4^\circ$ , 仰轴的偏转角度是  $4.5^\circ$ 。方位轴对应的像素范围是 -928~840, 俯仰轴对应的像素范围是 -710~531。经计算得,方位轴上一个单位像素代表方位轴振镜的执行角度  $63.17 \mu\text{rad}$ , 俯仰轴上一个单位像素代表俯仰轴振镜的执行角度  $63.26 \mu\text{rad}$ 。

在跟踪的条件下,以每 1 ms 的速度采集一次,采集 10 000 个点的方位俯仰脱靶量。方位轴与俯仰轴的脱靶量如图 5 所示。方位轴的跟踪均方差在像素的条件下经计算为 0.985 个像元,所以方位轴的跟踪精度是  $62.22 \mu\text{rad}$ 。俯仰轴的跟踪均方差在像素的条件下经计算为 0.379 个像元,所以俯仰轴的跟踪精度是  $23.97 \mu\text{rad}$ 。

### 3.2 大气信道传输

#### 3.2.1 光强闪烁方差

激光通信中的湍流闪烁方差,是用来量化描述大气湍流引起的激光光强闪烁程度的一个重要参数。它通过计算激光光强相对于其平均值的偏离程度的平方的统计平均值得到<sup>[14-15]</sup>。湍流闪烁方差越大,表明光强的起伏越剧烈,也就意味着大气湍流对激光传输的影响越显著。方差越小,说明光强相对稳定,湍流的影响较弱。这一参数为评估大气湍流对激光通信系统性能的影响提供了重要的量化依据。大气光强闪烁方差为

$$\sigma_I^2 = \frac{I^2 - \bar{I}^2}{\bar{I}^2} \quad (17)$$

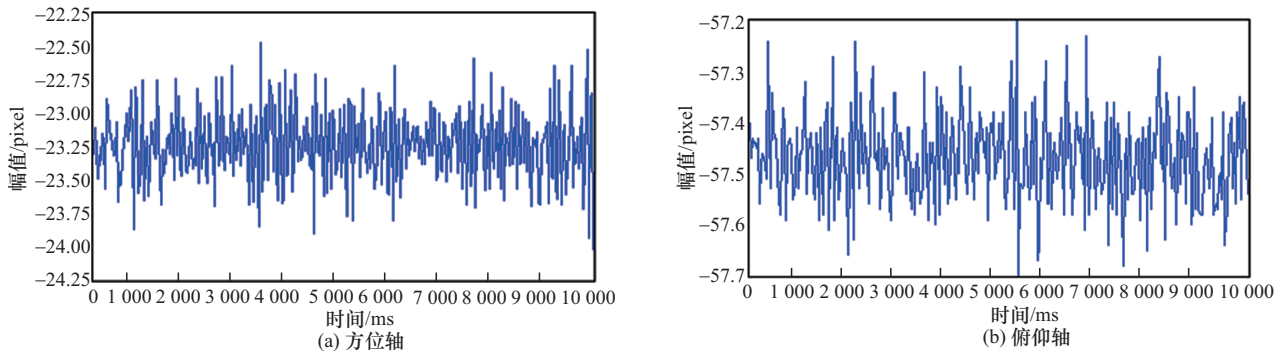


图5 方位轴与俯仰轴的脱靶量

其中,  $\sigma_i^2$  为大气光强闪烁方差,  $I$ 、 $\bar{I}$  分别用于描述激光通信过程中的实际和平均光强分布。

如图 6 所示, 在 1 km 大气链路下, 图 6(a) 和图 6(c) 分别为终端 A 接收到的光电流和其概率密度分布, 图 6(b) 和图 6(d) 分别为终端 B 接收到的光电流和其概率密度分布。其中图 6(a) 和图 6(b) 的纵坐标表示的是处于采集点所接收到的光电流大小, 横坐标则表示的是采集点的次序, 采集点的相邻时间间隔为 5 ms。由图 6 可知, 终端 A 接收的分布值范围为 20 000~160 000 nA, 闪烁方差为 0.077。终端 B 接收的分布值范围为 25 000~225 000 nA, 闪烁方差为 0.081。

### 3.2.2 通信传输性能

在长春理工大学科技大厦 16 楼对第二教学楼九楼进行 1 km 激光通信传输实验, 本次实验是在

大气光强闪烁方差为 0.077~0.081 的情况下测试通信误码率。如图 7 所示, 本次实验测量通信速率为 10 Gbit/s。经统计得出平均误码率为  $1.29 \times 10^{-5}$ 。由于光强闪烁方差是大气湍流扰动的体现, 当大气扰动过大时, 光强闪烁方差的数值也会随之增加, 这将使得通信难度增大, 从而导致通信质量变差, 通信误码率激增。若要保持原有的通信性能, 则要增大初始发射光功率, 从而增大两端的功耗负载, 影响光端机的 FOM 参数指标。

本次实验误码率选用的是 K7325TFFG900-2I 开发板, K7325TFFG900-2I 开发板通过小型可插拔 (SFP, small form-factor pluggable) 封装光模块采集通信误码率。该采集系统基于伪随机二进制序列 (PRBS, pseudorandom binary sequence) 比对法, 通过现场可编程门阵列 (FPGA, field-program-

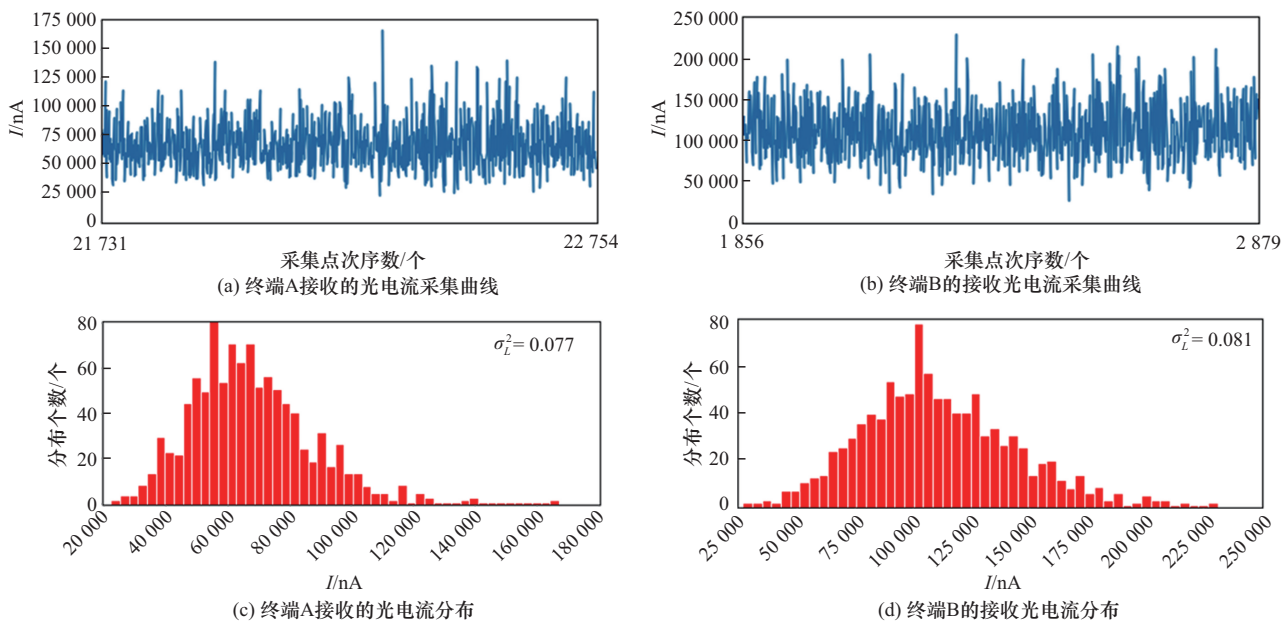


图6 1km链路光强闪烁方差

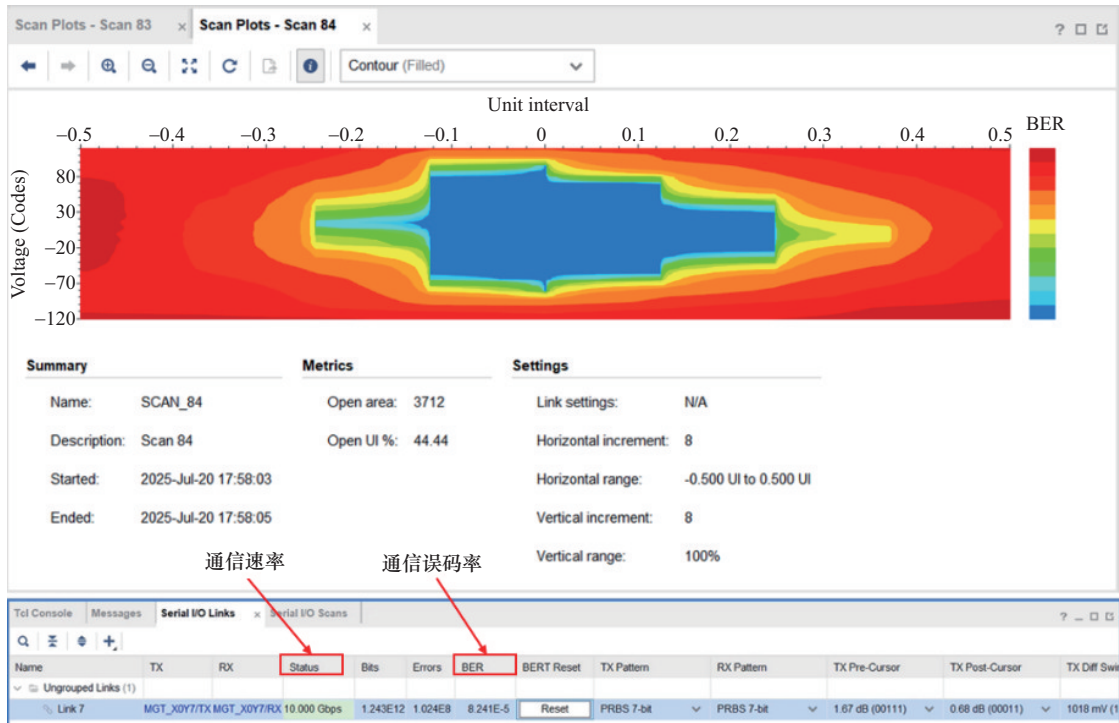


图7 跟踪状态下误码

mable gate array) 内置的集成误码率测试仪 (IB-ERT, integrated bit error ratio tester intellectual property core) 与 SFP 光模块的数字诊断监控功能协同工作。1.29×10<sup>-5</sup> 的误码率指标优于工业级基本通信的误码率阈值要求, 结果可复现性强, 证实开发板在 10 Gbit/s 速率下能稳定满足光纤通信、工业控制等场景的基本通信性能需求。

为了进一步检测双端通信质量, 如图 8 所示, 双端换上视频光传输设备进行通信光的发射与接收。长春理工大学第二教学楼作为发射端, 长春理工大学科技大厦 16 楼作为接收端。双端实现图像传输,

稳定传输时间达 10 min。

#### 4 3 km 等效链路

为了进一步论证本文系统的性能和应用场景, 为后续开展 3 km 通信实验做好理论基础, 现阶段先开展 3 km 等效链路裕量计算。在等效链路裕量核算过程中, 由于降低通信速率, 增大通信距离, 需重新核算光端机的功耗、重量、接收端探测灵敏度等参数及空间损耗, 并计算光端机的轻量化效能。在链路预算表中加入 3 km 场景下的大气湍流损耗<sup>[16]</sup>, 表 3 旨在直观体现 3 km 等效链路的链路裕量水平。



(a) 发射端



(b) 接收端

图8 1 km 视频图像传输实验

表3 3km通信光链路裕量

参量名称	取值	备注
发射功率/dBm	23	经主放大器, 发射功率达200 mW
发射损耗/dB	-0.96	$\eta_{ot}=80\%$
发射天线增益/dB	86.11	$\theta_t=280 \mu\text{rad}$
空间损耗/dB	-207	$\lambda=1\ 550\ \text{nm}$ , $L=3\ \text{km}$
接收天线增益/dB	86.11	$\theta_r=280 \mu\text{rad}$
大气湍流损耗/dB	-4	
跟瞄失配损耗/dB	-4.43	$\theta_{off}=100 \mu\text{rad}$ , $\theta_{div}=280 \mu\text{rad}$
接收损耗/dB	-10	$\eta_{or}=10\%$
到达接收端光功率/dBm	-31.17	
接收端探测灵敏度/dBm	-35	通信速率由10 Gbit/s变为1.25 Gbit/s
链路裕量/dB	3.83	

在3 km通信链路的情况下, 通过改变通信速率, 接收端的探测灵敏度可达-35 dBm。最终理论上链路裕量为3.83 dB, 满足通信需求。经过充分核算, 3 km情况下的光端机重量为5 kg, 功耗为20 W, 其轻量化指标FOM值为50.51 dB, 性能优于前文提及的各类光端机。

## 5 结束语

本文研制的超小型激光通信终端, 以20 mm通光口径实现1 km链路下10 Gbit/s信息传输。相较于现有同类设备, 该终端在保证一定通信性能的前提下, 在更小口径达成更高传输速率, 且具备更远通信潜力, 轻量化效能达53.46 dB, 优于英国CF1500、加拿大SONAbeam系列及俄罗斯M1系列等主流光端机。终端重量3 kg, 功耗15 W, 轻量化与小型化程度在当前同类设备中属于较高水平, 顺应了近地面激光通信终端向便携化、集成化发展的趋势, 验证了超小型化设计在提升通信效能上的可行性, 为便携式激光通信终端的选型与优化提供了重要参考。

## 参考文献:

[1] 赵奇. 无线激光通信初始捕获系统设计与实现[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.

- ZHAO Q. Design and implementation of initial acquisition system for wireless laser communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [2] 滕云杰. 空间激光通信系统无信标捕获与跟踪技术[D]. 吉林: 长春理工大学, 2020.
- TENG Y J. Beacon-free acquisition and tracking technology for space laser communication systems[D]. Jilin: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [3] 赵馨, 刘云清, 佟高峰. 动态空间激光通信系统视轴初始指向建模及验证[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 151-156.
- ZHAO X, LIU Y Q, TONG S F. Line-of-sight initial alignment model and test in dynamic space laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 151-156.
- [4] LIU H Y, ZHANG Y, LIU X Y, et al. High-speed free-space optical communication using standard fiber communication components without optical amplification[J]. Advanced Photonics Nexus, 2023, 2(6): 065001.
- [5] 王天枢, 林鹏, 董芳, 等. 空间激光通信技术发展现状及展望[J]. 中国科学工程, 2020(3): 92-99.
- WANG T S, LIN P, DONG F, et al. Development status and prospect of space laser communication technology[J]. Engineering Sciences in China, 2020(3): 92-99.
- [6] 李征, 韩旭, 柯熙政. 无线光通信一对多发射天线研究进展[J]. 激光杂志, 2024, 45(4): 1-15.
- LI Z, HAN X, KE X Z. Research progress of one-to-many transmitting antenna for optical wireless communication[J]. Laser Journal, 2024, 45(4): 1-15.
- [7] FIELHAUER K B, BOONE B G, RAIBLE D E. Concurrent system engineering and risk reduction for dual-band (RF/optical) spacecraft communications[C]//Proceedings of the 2012 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-7.
- [8] 姜会林, 佟高峰, 张立中, 等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- JIANG H L, TONG S F, ZHANG L Z. Space laser communication technology and system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [9] 邢振冲, 王伟, 张露鹤, 等. 小型无线光通信终端大视场扫描捕获光学天线设计[J]. 激光与红外, 2022, 52(11): 1707-1712.
- XING Z C, WANG W, ZHANG L H, et al. Design of large field of view scanning optical antenna for small laser optical communication terminals[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(11): 1707-1712.
- [10] 赵佰秋, 孟立新, 于笑楠, 等. 空间光到单模光纤章动耦合技术研究[J]. 2019(11): 238-246.
- ZHAO B Q, MENG L X, YU X N, et al. Study on nutation coupling technology from space light to single-mode fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019(11): 238-246.
- [11] 张宇航, 于笑楠, 赵佰秋, 等. 百微弧度级双端窄视场激光通信捕获方法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2025, 48(2): 34-44.
- [12] ZHANG Y H, YU X N, ZHAO B Q, et al. Research on the capture method of double-ended narrow-field-of-view laser communication at 100-micro radian level[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 48(2): 34-44.
- [13] 赵雪. 空间激光通信 APT 初始捕获及误差分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- ZHAO X. Initial capture and error analysis of apt in space laser communication[D]. Changchun: Changchun University of Science and

Technology, 2012.

- [14] 赵乌吉斯古楞, 李延风. 大气湍流和大气闪烁对激光通信性能的影响分析[J]. 激光杂志, 2024, 45(11): 164-169.

ZHAO W J S G L, LI Y F. Analysis of the influence of atmospheric turbulence and atmospheric scintillation on laser communication performance[J]. Laser Journal, 2024(11): 164-169.

- [15] 王一诺. 近地大气激光通信系统设计研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2018.

WANG Y N. Research on the design of near-earth atmosphere laser communication System[D]. Jilin: Jilin University, 2018.

- [16] 万玲玉. 气象条件对近地视距光通信链路的影响研究[D]. 南宁: 广西大学, 2002.

WAN N Y. Research on the impact of meteorological conditions on near-earth line-of-sight optical communication links[D]. Nanning: Guangxi University, 2002.

#### [作者简介]



于笑楠 (1989-), 男, 吉林长春人, 博士, 长春理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为空间激光通信与测量。



石家玮 (2002-), 男, 湖南长沙人, 长春理工大学硕士生, 主要研究方向为空间激光通信。



赵佰秋 (1993-), 男, 辽宁开原人, 长春理工大学博士生, 主要研究方向为激光探测与测距。



代超 (2002-), 男, 四川泸州人, 长春理工大学硕士生, 主要研究方向为空间激光通信、自适应光学。



徐立 (1990-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 长春理工大学助理研究员、硕士生导师, 主要研究方向为空间激光通信、自适应光学等。



林鹏 (1994-), 男, 吉林延边人, 博士, 长春理工大学副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为空间激光通信、液晶偏振光束控制等。



王天枢 (1975-), 男, 吉林长春人, 博士, 长春理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为光通信技术、光纤激光器及应用技术、光纤传感技术等。



佟首峰 (1972-), 男, 内蒙古乌兰浩特人, 博士, 长春理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为空间激光通信、现代光电测试技术、光电技术与系统等。