

引用本文:于帅北,曹艳波,徐彩前,等.轻量化量子激光通信跟踪系统[J].光通信技术,2025,49(4):72-76.

轻量化量子激光通信跟踪系统

于帅北,曹艳波*,徐彩前,王芳,孙景旭

(季华实验室,广东佛山528200)

摘要:为了提升自由空间卫星量子激光通信地面终端的跟踪精度并实现轻量化设计,设计了一种基于双探测器复合轴跟踪技术的轻量化量子激光通信跟踪系统。该系统采用T型铝合金跟踪架和碳化硅主镜结构,结合粗-精跟踪分级控制策略,通过压电陶瓷快反镜补偿残余误差,并引入智能调参比例积分微分(PID)控制算法优化参数。实验结果表明:系统在星地外场测试中,粗跟踪精度标准差为4 arcsec(方位轴)和6.3 arcsec(俯仰轴),精跟踪闭环后综合误差标准差降至1.4 arcsec(方位轴)和1.2 arcsec(俯仰轴),同时系统重量较传统设计减轻50%。

关键词:量子激光通信;复合轴控制;自动调参;比例积分微分控制;主元分析神经网络

中图分类号:TP273.1;TN384 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)04-0072-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Lightweight quantum laser communication tracking system

YU Shuaipei, CAO Yanbo*, XU Caiqian, WANG Fang, SUN Jingxu

(Ji Hua Laboratory, Foshan Guangdong 528200, China)

Abstract: To improve the tracking accuracy of free-space satellite quantum laser communication ground terminals and achieve a lightweight design, a lightweight quantum laser communication tracking system based on dual-detector compound-axis tracking technology is designed. The system adopts a T-shaped aluminum alloy tracking frame and a silicon carbide primary mirror structure, combined with a coarse-fine tracking hierarchical control strategy. Residual errors are compensated by a piezoelectric fast steering mirror, and an intelligent parameter-tuning proportional-integral-derivative (PID) control algorithm is introduced to optimize parameters. Experimental results show that during the satellite-to-ground field test, the standard deviation of coarse tracking accuracy is 4 arcsec (azimuth axis) and 6.3 arcsec (elevation axis). After fine tracking closed-loop correction, the composite error standard deviation is reduced to 1.4 arcsec (azimuth axis) and 1.2 arcsec (elevation axis). Meanwhile, the system weight is reduced by 50% compared with traditional designs.

Key words: quantum laser communication, compound-axis control, automatic parameter tuning, proportional-integral-derivative control, principal component analysis neural network

0 引言

相较于传统的射频通信,自由空间卫星激光通信具有传输速率高、通信带宽大、功耗低、重量轻、抗干

收稿日期:2024-09-20。

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2018B030328001)资助。

作者简介:于帅北(1978—),男,吉林长春人,硕士,副研究员,现任职于广东省季华实验室光电科学与技术研究部,主要从事光电精密跟踪与瞄准设备光机结构开发研究工作。

* **通信作者:**曹艳波(1984—),男,湖北黄石人,硕士,副研究员,主要从事激光与光学系统开发研究工作。



扰性强以及保密性高等优势,被认为是未来实现星间高码率通信的优选方案,在军用和民用领域均受到广泛关注^[1-3]。然而,要实现卫星量子加密激光通信,激光与信息终端的光电跟瞄系统必须满足高精度跟踪瞄准的技术要求^[4-6]。

近年来,国内外已开展大量基于量子加密的星地激光通信实验。星载光学载荷通过轻量化设计和微重力环境适应性优化,实现了百公斤级的大口径系统,提升了整体系统的部署灵活性。然而,地面终端由于复杂的环境条件和防护需求,其轻量化设计面临更多挑战。轻量化可能导致运动平台跟踪架刚度降低,甚至影响局部结构强度,因此,如何在保证高精度跟踪

的同时实现轻量化设计,成为地面终端光学系统的关键难点之一^[7]。

为满足弧秒级跟踪精度需求,同时兼顾轻量化设计要求,本文采用双探测器复合轴跟踪技术,结合先进光学架构和特种材料,构建一套轻量化量子激光通信跟踪系统(下文简称为轻量化量子跟踪系统)。

1 轻量化量子跟踪系统

轻量化量子跟踪系统主要由 T 型跟踪架和复合轴跟踪系统(包含粗跟踪与精跟踪模块)构成,如图 1 所示。

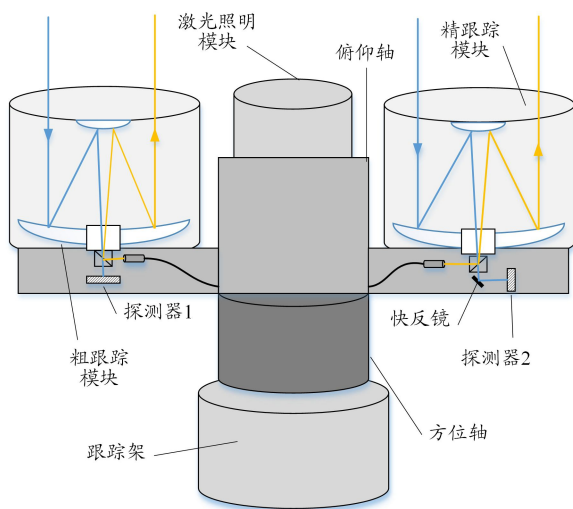


图 1 轻量化量子跟踪系统组成原理示意图

1.1 T 型跟踪架

T 型跟踪架采用模块化设计,方位轴与俯仰轴均采用机械轴承支撑方式,方位轴可实现 $\pm 270^\circ$ 旋转运动,俯仰轴具备 $-5^\circ \sim 95^\circ$ 的超半球转动范围。T 型结构主体采用铝合金材料,整体重量控制在 200 kg 以内。通过有限元分析计算,该跟踪架的一阶模态谐振频率

低于 60 Hz,这一特性限制了跟踪系统的控制带宽。

T 型跟踪架上的粗跟踪与精跟踪模块均采用卡塞格林式反射结构。主镜有效通光口径大于 300 mm,采用轻量化碳化硅材料设计。其余组件基于配重原则进行对称布局和模块化设计。与传统 U 型结构的 300 mm 通光口径光电经纬仪相比(重量超过 300 kg),本系统的轻量化率提升 50%以上^[7]。

1.2 复合轴跟踪系统

1.2.1 系统架构与控制原理

复合轴跟踪系统采用双级控制架构,由粗跟踪和精跟踪子系统组成,系统控制原理框图如图 2 所示。粗跟踪子系统首先完成目标捕获,随后精跟踪子系统实现目标的精确锁定与稳定跟踪,最终保障自由空间量子激光通信的可靠性。为抑制大气湍流和地基振动等干扰,系统在精跟踪光路中集成快反镜装置,形成复合控制结构。该设计结合了跟踪架的大范围运动能力和快反镜的高带宽特性,可有效补偿低频扰动和高频噪声。

复合轴跟踪系统属于二维关联控制系统,其动态特性可通过传递函数描述,控制系统的闭环等效传递函数 $G(s)$ 如式(1)所示。

$$G(s) = \frac{A_1 D_1(s) G_1(s) + A_2 D_2(s) G_2(s)}{[1 + A_1 D_1(s) G_1(s)][1 + A_2 D_2(s) G_2(s)]} + \frac{A_1 A_2 D_1(s) D_2(s) G_1(s) G_2(s)}{[1 + A_1 D_1(s) G_1(s)][1 + A_2 D_2(s) G_2(s)]} \quad (1)$$

其中, A_1 、 A_2 分别为粗跟踪和精跟踪图像探测器的输出特性, s 为拉普拉斯变换域中的频率, $D_1(s)$ 、 $D_2(s)$ 分别为粗跟踪系统的控制器和被控对象(跟踪架和快反镜)的传递函数, $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 分别为精跟踪系统的控制器和被控对象的传递函数。

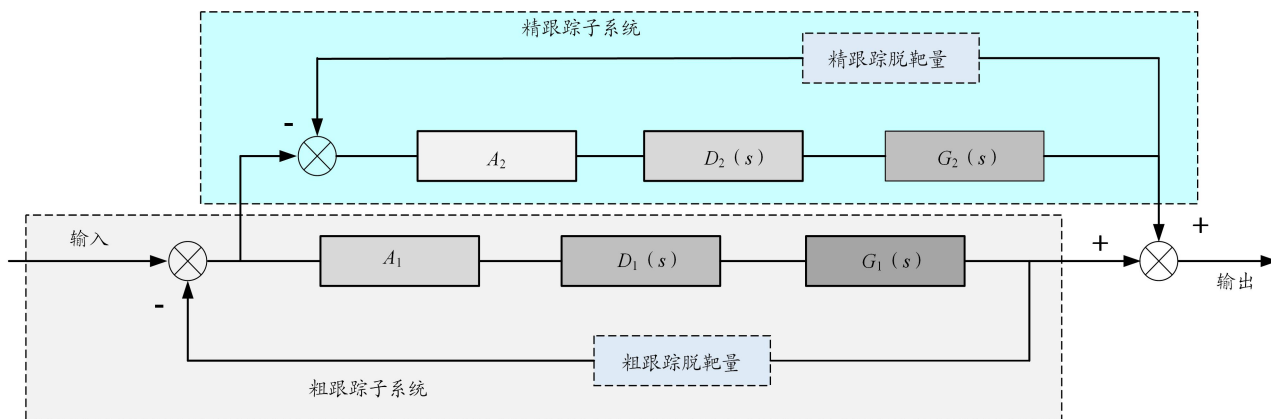


图 2 复合轴跟踪系统控制原理框图

于帅北,曹艳波,徐彩前,等:轻量化量子激光通信跟踪系统

复合轴跟踪系统采用双探测器结构,当粗跟踪误差超出精跟踪视场时,系统仅运行粗跟踪模式;当误差进入精跟踪视场后,快反镜闭环开始工作,补偿残余误差。为实现高动态响应,系统选用压电陶瓷驱动快反镜^[8-9]。

1.2.2 快反镜设计与建模

快反镜主要由反射镜体、精密柔性铰链、压电陶瓷(PZT)触电器、支撑结构、紧凑型位移传感器及硬件电路等部分组成。本文设计的轻量化量子跟踪系统采用PZT驱动快反镜,具备绕 x 、 y 轴转动的自由度。快反镜结构及驱动示意图如图3所示,其工作原理如下:当对PZT X1和PZT X2这2组PZT触电器施加电压信号时,其中一组触电器伸长,另一组缩短,通过柔性铰链的传动作用,将直线位移转换为镜面绕 y 轴的旋转运动;绕 x 轴旋转的机制与之类似。应变片作为间接测角元件,用于实时监测镜面偏转角度。该快反镜系统具有结构紧凑、转动惯量小的特点,因而能够实现较高的控制带宽。然而,受限于PZT触电器的行程范围,其角度调节范围相对较小。

在精跟踪光路中,快反镜的动力学特性可用二阶惯性系统描述,其控制传递函数为

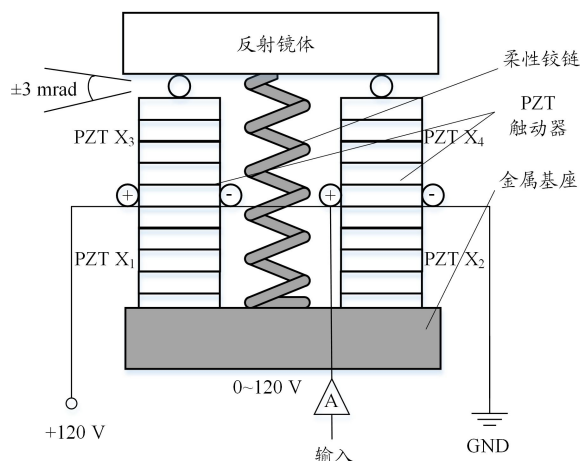


图3 快反镜结构及驱动示意图

$$G_F(s) = \frac{k_F}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

其中, k_F 为快反镜的合成机械电气常数, ξ 为控制系统阻尼系数, ω_n 为谐振频率对应的角频率。

2 高精度跟踪指向自动调参控制策略

2.1 精跟踪闭环控制系统

轻量化量子跟踪系统采用粗-精复合轴控制架构实现高精度跟踪^[10-12]。该系统中,粗跟踪子系统以T型跟踪架为控制对象,具有较大的动态范围,但由于其谐振频率较低导致控制带宽有限,适用于激光通信光轴的初步指向与粗跟踪;精跟踪子系统则以快反镜为执行机构,通过对粗跟踪残留误差进行二次校正,最终满足系统对跟踪精度和响应速度的严格要求^[13-14]。得益于高控制带宽和高增益特性,精跟踪子系统可有效抑制宽频带振动干扰,确保实现快速、高精度的目标跟踪。

精跟踪闭环控制系统架构如图4所示,是精跟踪子系统的核心,主要由以下核心组件构成:

控制单元:基于脱靶量数据生成电压控制信号;
电压放大电路:放大控制信号以驱动快反镜偏转;
快反镜:执行高精度偏转调整;

精密光学相机探测器:实时捕获光斑图像并提取脱靶量数据。

精跟踪闭环控制系统的工作流程如下:

- 1) 光学采集:激光经快反镜反射后成像于精密光学相机探测器;
- 2) 数据处理:图像处理单元实时解算光斑脱靶量;
- 3) 闭环控制:经智能调参器优化后的伺服参数送入控制单元,经数字处理后通过电压放大电路驱动快反镜偏转,使光斑稳定保持在探测器目标位置^[15-16]。

2.2 智能调参比例积分微分(PID)控制算法原理与实现

复合轴跟踪系统的精跟踪子系统采用智能调参

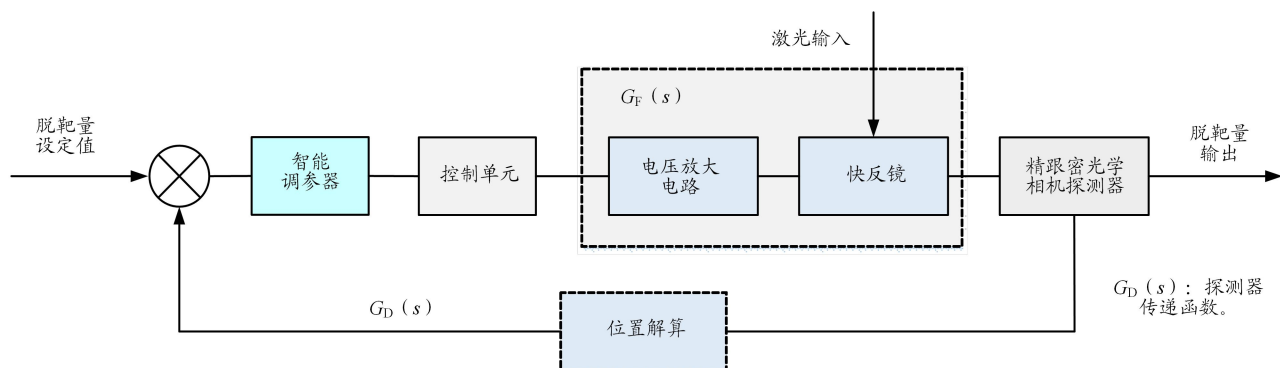


图4 精跟踪闭环控制子系统结构图

PID 控制算法实现闭环光路控制。该算法在传统 PID 控制的基础上进行优化升级,通过引入智能参数调节机制显著提升了系统性能。智能调参 PID 控制框图如图 5 所示,主要由以下 2 个核心模块构成:智能调参器(实时动态优化控制参数)和 PID 控制器(执行精确的误差校正)。

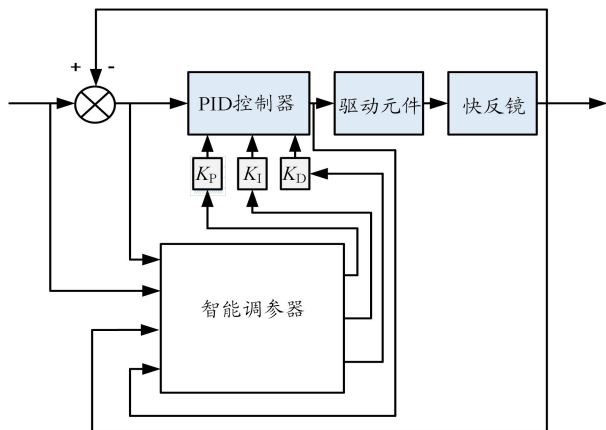


图 5 智能调参 PID 控制系统框图

智能调参 PID 控制算法通过融合机器学习算法与传统 PID 控制方法,在电机控制领域展现出优异的稳定性和可靠性。该算法的核心在于:首先利用机器学习对目标误差进行识别分类,随后通过多输入多输出控制模型实现参数在线调整。针对低速稳定跟踪区间的线性系统特性,算法采用迭代反馈调谐方法进行参数更新,其具体实现过程包含以下关键步骤:

1)参数敏感度分析:通过主元分析(PCA)提取神经网络控制模型中灵敏度较高的关键参数,有效降低调参复杂度;

2)稳定控制建模:采用区间线性多变量计算模型,在保证系统稳定性的同时维持控制带宽;

3)智能参数优化:基于神经网络参数分类算法结合 PCA 分析实现自动调参,通过迭代输出优化控制参数如下:

①误差变化率:在采样周期内动态更新,确保控制时效性;

②增益参数:调节下一轮迭代的误差输出;

③误差累积量:减少迭代过程中的误差累计。

该算法采用主元神经网络工具^[17-18],通过上述优化机制实现了精跟踪子系统的自动调参功能。

3 激光通信跟踪应用数据分析

本文在激光通信量子加密的星地外场对设计的轻量化量子跟踪系统进行了测试。测试在夜间室外环

境下进行,存在地面振动和大气湍流干扰。根据卫星引导数据,系统在指定时间窗口内完成对目标星的跟踪和激光传输。粗跟踪运动轨迹如图 6 所示。可以看出,方位角度约 150° ,俯仰角度约 40° ,方位轴转动速度不超过 $1^\circ/\text{s}$,俯仰轴转动速度不超过 $0.5^\circ/\text{s}$,属于慢速跟踪过程。

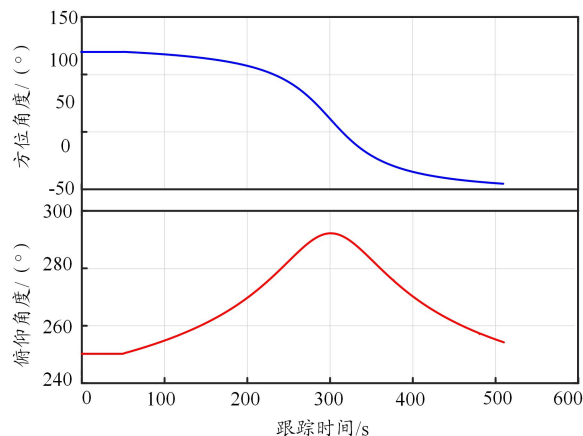


图 6 粗跟踪运动轨迹图

通过引导数据与跟踪架方位轴、俯仰轴编码器的差分数据,结合粗跟踪探测器的脱靶量数据,可获得粗跟踪动态误差。截取近似通信窗口时间周期的粗跟踪误差数据如图 7 所示。可以看出,方位误差、俯仰误差均随时间波动。经计算,粗跟踪方位误差的标准差和俯仰误差的标准差,不能满足信息传输的要求。

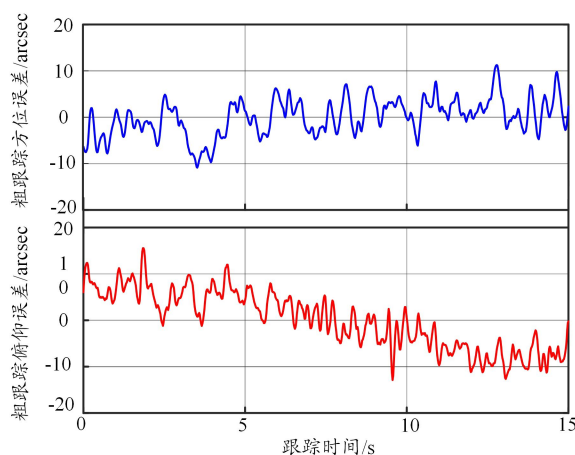


图 7 粗跟踪误差图

精跟踪子系统开启后,获得的精跟踪误差如图 8 所示。可以看出,复合轴控制方位误差、俯仰误差均随时间波动。经计算,系统跟踪精度提高了 3 倍以上(与传统 U 型结构的 300 mm 通光口径光电经纬仪相比),并能够满足量子激光通信的信息传输要求。

于帅北,曹艳波,徐彩前,等:轻量化量子激光通信跟踪系统

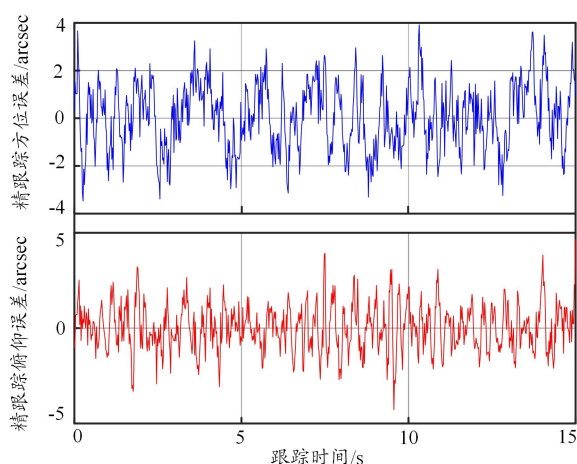


图8 精跟踪误差图

4 结束语

本文设计了一种基于双探测器复合轴跟踪技术的轻量化量子跟踪系统,该系统已成为自由空间卫星激光通信中提高跟踪精度的有效解决方案。通过设计便于布站的轻量化量子跟踪架系统,并结合高带宽快反镜控制,使得极窄的激光束能够在2个终端之间实现精确对准及高精度跟踪。系统采用了双探测器复合轴控制架构,不仅支持基于量子加密的高带宽激光通信试验,还验证了使用PCA神经网络进行自动调参控制方法在轻量化地面跟踪光学终端中的有效性。与传统U型结构的300 mm通光口径光电经纬仪相比,实验结果表明,本文所设计的跟踪系统精度可以提高3倍以上,能够有效抑制地面振动和大气湍流等扰动因素,确保高带宽数据通信的稳定性与可靠性。此外,采用低重量、低功耗的设计方案,不仅能提供更高带宽的数据传输,同时也增强了系统的安全保密性和抗干扰能力。

参考文献:

- [1] GUELMAN M, KOGAN A, KAZARIAN A, et al. Acquisition and pointing control for inter-satellite laser communications[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4): 1239–1248.
- [2] 李聪,倪小龙,于信,等. 500 mm口径星地激光通信地面接收端系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(7): 210–219.
- [3] AMITA S, MARTIN B. Transportable optical ground station for high-speed free-space laser communication [EB/OL]. [2024–09–20]. <https://elib.dlr.de/78398/1/8517-5.pdf>
- [4] 闫爱民,周煜,孙建锋,等. 卫星激光通信复合轴光跟踪技术及发展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(4): 1–6.
- [5] GILLMER S R, SMEATON C V, BURNSIDE J W, et al. Demonstration of a modular, scalable, laser communication terminal for manned spaceflight missions[EB/OL]. [2024–09–20]. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11816/118160E/Demonstration-of-a-modular-scalable-laser-com-munication-terminal-for-human/10.1117/12.2599014.short>.
- [6] ANTONELLOR, 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.
- [7] 康永斌,艾志伟,陈振荣,等. 两轴水平框架式粗跟踪结构及其控制系统设计[J]. 红外技术, 2022, 44(7): 732–740.
- [8] 文江华,赵创社,姜粉娥,等. 基于压电陶瓷的快速反射镜驱动与控制研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(8): 59–64.
- [9] FANG C, GUO J, YANG G Q, et al. Design and performance test of a two-axis fast steering mirror driven by piezoelectric actuators[J]. 光电子快报(英文版), 2016, 12(5): 333–336.
- [10] 杨光海,王宏宇,周通,等. 高精度光电伺服稳定平台控制技术[J]. 兵工自动化, 2021, 40(8): 9–11, 29.
- [11] 马佳光,唐涛. 复合轴精密跟踪技术的应用与发展[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 218–227.
- [12] DONG Y H, LIU H S, LUO Z R, et al. Principle demonstration of fine pointing control system for inter-satellite laser communication[J]. 中国科学:技术科学(英文版), 2015, 58(3): 449–453.
- [13] 唐涛,马佳光,陈洪斌,等. 光电跟踪系统中精密控制技术研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 3–31.
- [14] ZHANG F R, RUAN P, HAN J F. Optical path pointing error and coaxiality analysis of APT system of space laser communication terminal[J]. Optica Applicata, 2021, 51(2): 203–222.
- [15] YOSHIHISA T, TAKASHI J, MORIO T, et al. Tracking and pointing characteristics of OICETS optical terminal in communication demonstrations with ground stations[J]. Free-space Laser Communication Technologies XIX and Atmospheric Propagation of Electromagnetic Waves, 2007, 6457: 1–9.
- [16] 马佳光. 复合控制及等效复合控制原理及应用[J]. 光学工程, 1988(5): 1–16.
- [17] HERNANDEZ-ALVARADO R, GARCA-VALDOVINOS L G, SALGADO-JIMNEZ T, et al. Neural network-based self-tuning PID control for underwater vehicles[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1429–1429.
- [18] FUJIWARA Y, SATORU S, MU S L. Study on variable gain PID control of pneumatic servo systems using PSO based neural networks[EB/OL]. [2024–09–20]. https://www.jstage.jst.go.jp/article/prociiae/2024/0/2024_45/_pdf/-char/ja.