

·测试、试验与仿真·

基于四象限探测器的光束稳定系统有效带宽测试(特邀)

刘永凯^{1*}, 吕福睿^{1,2}, 郭 烽^{1,2}, 金玳冉¹, 吴 昊¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 2.中国科学院大学, 北京)

摘 要 详细探讨了一种基于四象限探测器的光束稳定系统的带宽测试。文章首先介绍了光束稳定系统的工作原理、重要性以及主要应用场景。随后, 对光束倾角传感器, 尤其是四象限探测器的工作原理、优势以及在光束稳定系统中的应用进行了详细的阐述。接着, 文章详细介绍了光束稳定系统的组成、工作原理及其在实际应用中的重要性。在系统测试部分, 详细描述了测试环境、方法以及测试结果。测试结果显示, 基于四象限探测器的光束稳定系统, X 轴有效抑制带宽为138.35 Hz, Y 轴有效抑制带宽为131.96 Hz。最后, 对测试结果进行了总结, 并提出了未来工作的展望。

关键词 光束稳定; 精密跟踪; 扰动抑制; 四象限探测器; 有效抑制带宽

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2024)-01-0053-07

Effective Bandwidth Testing of Beam Stabilization System Based on Four-quadrant Detector (Invited)

LIU Yongkai^{1*}, LYU Furui^{1,2}, GUO Feng^{1,2}, JIN Dairan¹, WU Hao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China)

Abstract: The bandwidth testing of a beam stabilization system based on a four-quadrant detector is discussed in detail. At first, the working principle, importance, and main application scenarios of the beam stabilization system are introduced. And then, a detailed explanation is given on the working principle, advantages, and application of beam inclination sensors, especially four quadrant detectors, in beam stabilization systems. Next, a detailed introduction to the composition, working principle, and importance of beam stabilization systems in practical applications are provided. In the system testing section, a detailed description of the testing environment, methods, and analysis of the testing results are provided. The testing results indicate that the beam stabilization system based on the quadrant detector has an effective suppression bandwidth of 138.35 Hz for the X -axis and 131.96 Hz for the Y -axis. At last, the testing results are summarized and future work prospects are proposed.

Key words: beam stability; precision tracking; disturbance suppression; four-quadrant detector; effectively suppress bandwidth

在现代科技领域, 光束稳定系统扮演着重要的角色, 尤其是在对精度和稳定性要求极高的应用中, 如精密测量^[1-3]、光电跟踪^[4-5]、遥感探测^[6]以及激光通信^[7]等领域。这些系统能够有效地抵御各种外界因素(如气流扰动、机械振动等)对光束路径的影响, 从而确保光束传输的精确性和稳定性。随着技术的不断发展, 对光束稳定系统的性能要求也越来越高, 尤其是在带宽、响应速度和稳定性等方面。

因此, 深入研究和测试这些系统的性能对于提高它们的实用性和可靠性至关重要。

旨在探究一种基于四象限探测器的光束稳定系统的带宽测试。该系统使用四象限探测器作为光束倾角传感器, 结合快速反射镜作为执行机构, 并采用PID控制算法, 实现了高效的光束跟踪和稳定。将通过在一个特定的测试平台上模拟不同频率的扰动, 来评估该系统在各个频率点下的光束稳

收稿日期: 2024-01-29

定能力,从而得出整个频谱下的光束稳定能力和有效抑制带宽。

1 光束稳定系统核心部件

1.1 四象限探测器

光束角度变化的有效探测对于光束稳定系统至关重要。常见的光束角度探测方法包括:光斑质心法、干涉测量法和自准直测试法等。其中,光斑质心法因其实时性好、便于集成等优势在光束稳定、动态目标跟踪等领域广泛应用。光斑质心法是利用光斑角度变化正比于光斑在测量系统焦面上的位移量这一原理,进而把对光束角度的测量转化为对光斑质心位移的测量。常见的光束倾角传感器包括位置敏感探测器^[8](position sensitive detector, PSD)、四象限探测器^[9](quadrant detector, QD)、阵列式图像传感器等。在众多传感器中,四象限探测器不仅能够精确地检测和定量光束的倾斜角度,而且响应速度极快,非常适合用于需要快速动态响应的系统中。图1为某四象限探测器的实物。



图1 四象限探测器实物

当光束中心偏离探测器中心时,各个象限接收到的光强会发生变化。系统通过精确测量这些变化,能够迅速计算出光束的实际倾斜角度,这种传感器的高速和准确性对于实现光束控制至关重要^[10-12]。

图2为四象限探测器测量光斑质心的示意图。当光束入射到光敏面上时,会形成一个光斑。如果该光斑的中心与探测器坐标原点重合,那么各个象限接收到的光强相等,从而产生的位移信号为零。然而,如果光斑中心发生偏移各个象限接收到的光强就会不相等,导致输出信号的差异。通过计算这

些输出信号的差异,可以确定光斑中心的位移量,从而实现对光斑中心位置的定位。在不考虑噪声的情况下,假设光斑在I~IV象限形成的光强分别为 I_a, I_b, I_c, I_d ,位置误差信号分 $\Delta x, \Delta y$ 分别表示光斑在 x 轴和 y 轴上的归一化偏移量,可以用以下公式计算光斑的位移。

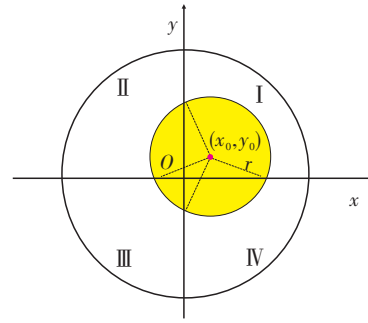


图2 四象限探测器质心测量示意图

$$\Delta x = \frac{(I_a + I_d) - (I_b + I_c)}{I_a + I_b + I_c + I_d} \quad (1)$$

$$\Delta y = \frac{(I_a + I_b) - (I_c + I_d)}{I_a + I_b + I_c + I_d} \quad (2)$$

通过式(1)和式(2)可知,如果该光斑的中心与探测器坐标原点重合,那么各个象限接收到的光强相等,从而产生的位移信号为零。然而,如果光斑中心发生偏移,各个象限接收到的光强就会不相等,导致输出信号的差异。在不考虑噪声的情况下,假设各象限光强与光斑面积成正比,若入射光在探测器各象限上形成的光斑面积分别为 S_a, S_b, S_c, S_d ,式(1)和式(2)可改写为

$$\Delta x = \frac{(S_a + S_d) - (S_b + S_c)}{S_a + S_b + S_c + S_d} \quad (3)$$

$$\Delta y = \frac{(S_a + S_b) - (S_c + S_d)}{S_a + S_b + S_c + S_d} \quad (4)$$

假设探测器接收到的光斑是均匀分布的圆形光斑, (x_0, y_0) 为光斑中心点的真实坐标, r 为光斑半径。根据几何关系,计算四个象限的光斑面积,公式如下

$$S_a = \frac{\pi r^2}{4} + x_0 y_0 + \frac{x_0}{2} \sqrt{r^2 - x_0^2} + \frac{y_0}{2} \sqrt{r^2 - y_0^2} + \frac{r^2}{2} (\arcsin \frac{x_0}{r} + \arcsin \frac{y_0}{r}) \quad (5)$$

$$S_b = \frac{\pi r^2}{4} - x_0 y_0 - \frac{x_0}{2} \sqrt{r^2 - x_0^2} + \frac{y_0}{2} \sqrt{r^2 - y_0^2} - \frac{r^2}{2} (\arcsin \frac{x_0}{r} + \arcsin \frac{y_0}{r}) \quad (6)$$

$$S_c = \frac{\pi r^2}{4} + x_0 y_0 - \frac{x_0}{2} \sqrt{r^2 - x_0^2} - \frac{y_0}{2} \sqrt{r^2 - y_0^2} - \frac{r^2}{2} (\arcsin \frac{x_0}{r} + \arcsin \frac{y_0}{r}) \quad (7)$$

$$S_d = \frac{\pi r^2}{4} - x_0 y_0 + \frac{x_0}{2} \sqrt{r^2 - x_0^2} - \frac{y_0}{2} \sqrt{r^2 - y_0^2} + \frac{r^2}{2} (\arcsin \frac{x_0}{r} + \arcsin \frac{y_0}{r}) \quad (8)$$

将上述公式带入到式(5)和式(6)中则有

$$\Delta x = \frac{1}{\pi r^2} (2r^2 \arcsin \frac{x_0}{r} + 2x_0 \sqrt{r^2 - x_0^2}) \quad (9)$$

$$\Delta y = \frac{1}{\pi r^2} (2r^2 \arcsin \frac{y_0}{r} + 2y_0 \sqrt{r^2 - y_0^2}) \quad (10)$$

上述计算方法的灵敏度和线性范围等指标都较为适中,是四象限探测器的经典计算方法,因此得到了广泛的应用。

1.2 快速反射镜

光束稳定系统的另一个核心元件是快速反射镜(fast steering mirror, FSM),它是一种小型精密光学仪器,用于调整目标光源到接收器之间的光束传播方向^[13]。作为光束稳定系统的重要组成部分,快速反射镜以其高精度、大带宽、快速响应速度和高分辨率等特点,在航天航空相机、激光通信、光电跟踪以及视轴稳定等领域得到了广泛应用。为了确保快速反射镜的高精度和响应频率,对系统的驱动器提出了极高的要求,包括精度、分辨率和响应速

度等方面。根据不同的驱动器类型,快速反射镜系统可分为音圈电机驱动和压电陶瓷驱动两种。

音圈电机具有工作电压低,行程大、摩擦小等优势,适用于大行程、大口径的FSM系统^[14]。压电陶瓷的谐振频率高达几百到上千赫兹,所以采用压电陶瓷驱动的FSM系统可以做到很高的带宽,常被用于频带要求高的场合^[15-16]。选用带宽更高的压电式FSM作为光束稳定系统的执行机构,其工作原理图如图3所示。

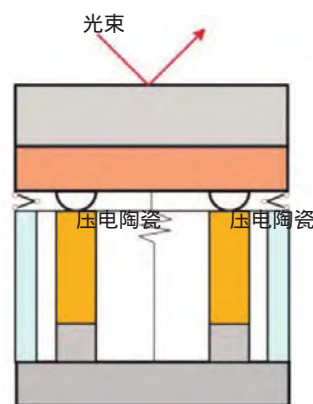


图3 压电式FSM示意图

2 光束稳定系统介绍

所讨论的光束稳定系统组成如图4所示,该系统由几个关键组件组成:接收光路、四象限倾角传感器、控制系统和跟踪FSM。

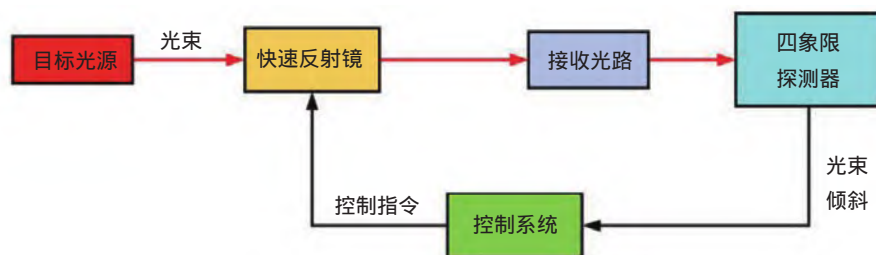


图4 光束稳定系统框图

接收光路的设计确保入射光束能够准确地被传感器接收。四象限传感器是系统的核心,负责实时检测光束的倾斜,并将这些信息传递给控制系统。控制系统采用PID控制算法,根据传感器提供的数据,快速计算出校正指令,以调整跟踪FSM的位置。跟踪FSM是实现光束稳定的执行机构,它可

以迅速调整其反射面的位置,以纠正光束路径的偏差。

这种设计使得光束稳定系统能够快速反应并纠正因外部扰动引起的光束偏移,从而确保光束的稳定传输。在高精度的光学测量、激光通信和图像处理等应用中,这种能力是至关重要的。

3 系统测试

3.1 测试系统介绍

搭建了如图5所示的实验平台对光束稳定系统进行测试,图6是实验平台示意图,测试的目的是验证光束稳定系统在面对不同频率扰动时的性能。实验平台主要包括:激光光源、平行光管(发射光路)、扰动FSM、对光束稳定的跟踪FSM、卡式望远镜(接收光路)以及四象限探测器。

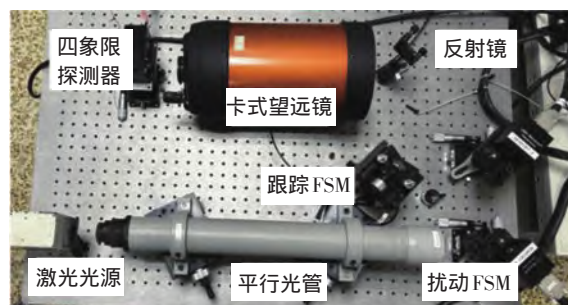


图5 实验平台实物图

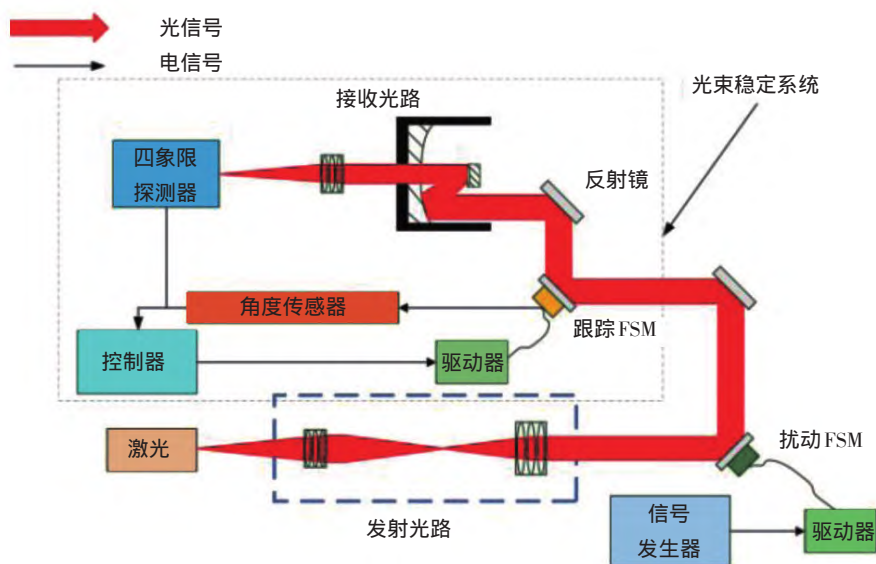


图6 实验平台示意图

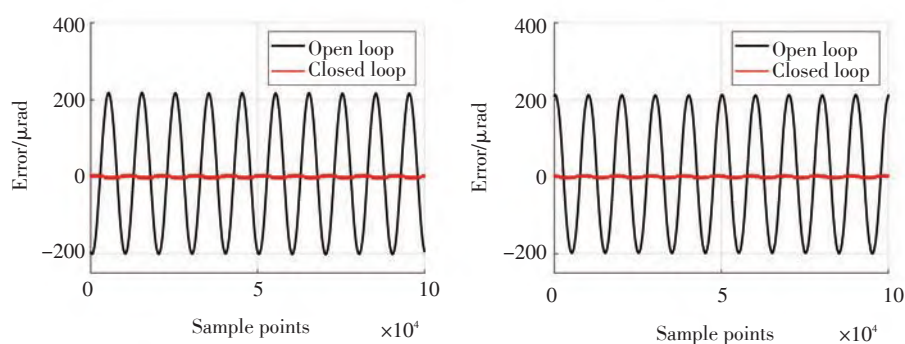
在测试环境中,通过模拟实验平台准确地重现了光束可能遇到的各种扰动条件。首先,激光光源生成的光束先经过扰动FSM,通过对扰动FSM施加不同频率的正弦波扰动,能够模拟出各种实际应用中可能遇到的光束偏移情况。然后,带有扰动的光束进入待测的光束稳定系统,四象限探测器测量出光束的偏移量,将其提供给控制器,控制器基于该偏移量计算出跟踪FSM的偏转量,驱动跟踪FSM对扰动进行抑制,形成一个对光束进行跟踪的闭环过程,最终实现光束的稳定。

3.2 测试结果

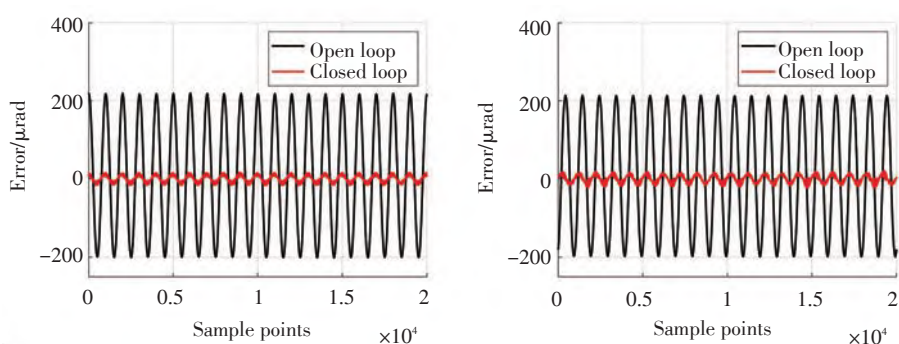
在测试过程中,重点观察记录了光束稳定系统在闭环跟踪和开环不跟踪状态下对于不同频率扰动的响应。通过对比这两种状态下的光束抖动数

据,能够准确地评估系统在各个频率点下的稳定性。图7展示了扰动幅度 $200\ \mu\text{rad}$ 时,扰动频率分别为1 Hz、10 Hz、50 Hz、100 Hz的测试结果,图中分别给出了倾角传感器的X、Y轴上测量的光束倾角在光束稳定系统不同工作状态下的情况。

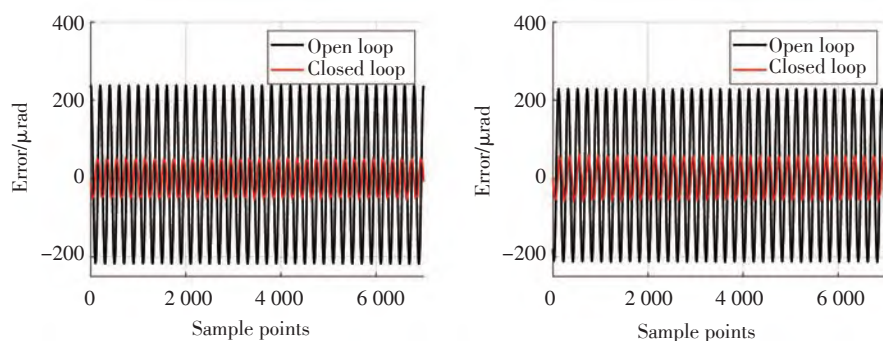
测试结果揭示了系统在应对不同频率扰动时的性能表现。在低频范围内,系统能够有效地抵抗扰动,保持光束的稳定。然而,随着扰动频率的提高,系统的性能开始受到限制,表现出逐渐增大的光束抖动。通过细致分析各个频率点的数据,绘制出了光束稳定系统性能随频率变化的曲线,并获得了系统的有效抑制带宽。测试结果显示,基于四象限探测器的光束稳定系统,X轴有效抑制带宽为138.35 Hz,Y轴有效抑制带宽为131.96 Hz。系统全频段的光束稳定效果如图8所示。



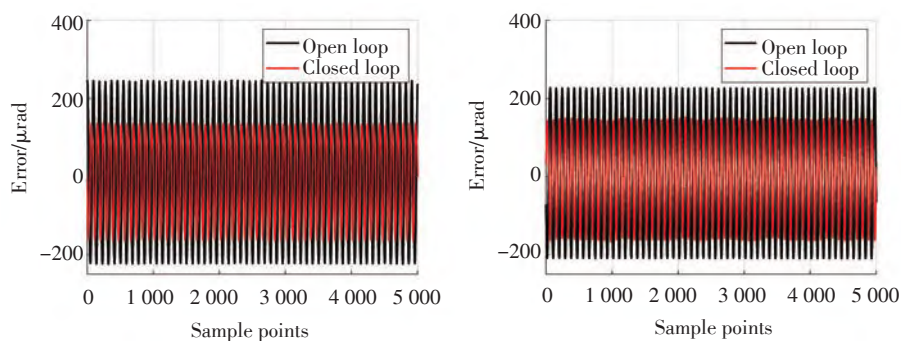
(a) 1 Hz 扰动信号下跟踪前后对比图(左 X 轴, 右 Y 轴)



(b) 10 Hz 扰动信号下跟踪前后对比图(左 X 轴, 右 Y 轴)



(c) 50 Hz 扰动信号下跟踪前后对比图(左 X 轴, 右 Y 轴)



(d) 100 Hz 扰动信号下跟踪前后对比图(左 X 轴, 右 Y 轴)

图7 各频率点扰动抑制结果图

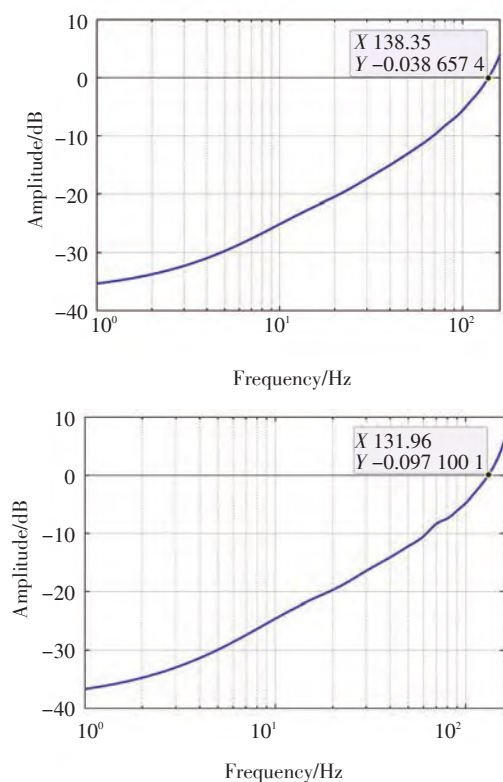


图8 有效抑制带宽结果图(左图为X轴,右图为Y轴)

为了全面评估系统的性能,测试不仅限于单一的频率点,还覆盖了从低频到高频的广泛频率范围。每个频率点的测试都被仔细记录和分析,以确保获得准确可靠的数据。特别地,对于系统在不同频率下的响应时间、光束偏移量和稳定后的误差范围进行了详细测量。这些数据为我们提供了宝贵的信息,不仅包括系统的当前性能,也涉及其潜在的改进空间。

此外,还对系统的动态性能进行了测试,包括其在快速变化的扰动条件下的表现。这对于评估系统在实际应用环境中的适应性和可靠性至关重要。例如,在模拟强风或机械振动等条件下,系统的稳定性能被进一步考验,从而提供了系统在极端条件下的实际工作能力的重要数据。

4 结论

通过研究,不仅验证了基于四象限探测器的光束稳定系统的基本性能,而且深入了解了其在不同条件下的性能限制。测试结果显示,虽然系统在一定频率范围内表现出色,但在面对更高频率的扰

动时,其性能受到了物理和算法限制的影响。这些发现提供了如何改进和优化系统。

在未来的工作中,计划探索多种策略进一步提升光束稳定系统的性能。首先,研究更高效的控制算法,特别是针对高频扰动的优化,将是工作的重点。还计划研究新型的传感器和执行器材料,以减少系统的响应时间和提高精度。此外,系统的耐环境干扰能力也是未来研究的关键方向之一,包括对温度、湿度以及机械振动等环境因素的适应性。此外,将这一系统与其他先进技术(如人工智能算法)结合,进行自适应和自学习控制策略的研究,也将是未来工作的一部分。这些策略可能使系统能够根据不同的工作条件和环境自动调整其参数,从而提高整体性能和适应性。

总体而言,文中研究为光束稳定技术的发展提供了新的视角和深入分析结果。期待这些研究成果能够为相关领域技术进步做出贡献,并在未来的实际应用中展现出更大潜力。

参考文献

- [1] 朱凡,李颖先,谭久彬.高精度激光光束准直系统设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4):817-826.
- [2] 马程鹏,汤孟博,孙琦,等.分离式调控的高精度光束指向稳定系统[J]. 光学精密工程, 2023, 31(11):1607-1618.
- [3] 王守辉.高精度高速振镜控制系统设计[J]. 光电技术应用, 2015, 30(2):7-10, 69.
- [4] 蔡美华,孔德聪,佟鑫刚.单探测器复合轴系统粗精指向对准的研究与实现[J]. 光电技术应用, 2019, 34(1):63-66.
- [5] 高学鹏,王凯.单探测器跟踪模式下快速反射镜光束偏转控制[J]. 光电技术应用, 2017, 32(2):15-20.
- [6] CARRASCO C A, SHIRATAMA K, TRINH P V, et al. Development of a miniaturized laser-communication terminal for small satellites[J]. Acta Astronautica, 2022, 197: 1-5.
- [7] 李大社,管绍鹏.自由空间光通信ATP技术的研究[J]. 光电技术应用, 2006(4):47-51, 81.
- [8] 赵凯,刘凤丽,郝永平,等.基于PSD的激光位移传感器位置补偿[J]. 光电技术应用, 2022, 37(1):74-78.
- [9] XUAN W, XIU Q S, GUI Z L, et al. Investigation of high-precision algorithm for the spot position detection for four-quadrant detector[J]. Optik, 2020, 203: 163941.
- [10] WANG X, SU X, LIU G, et al. A method for improving the detection accuracy of the spot position of the

- four-quadrant detector in a free space optical communication system[J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7164.
- [11] VO Q, ZHANG X, FANG F. Extended the linear measurement range of four-quadrant detector by using modified polynomial fitting algorithm in micro-displacement measuring system[J]. *Optics&Laser Technology*, 2019, 112: 332-338.
- [12] ZHANG J, QIAN W, GU G, et al. Quadrant response model and error analysis of four-quadrant detectors related to the non-uniform spot and blind area[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(24): 6898-6905.
- [13] 印铁,曹家浩,车鸿鹏,等. 快反镜可移动式机械限位结构设计[J]. *光电技术应用*, 2022, 37(3): 62-66.
- [14] 李智斌,李亮,张建强,等. 双轴音圈电机快速反射镜的系统建模与滑模控制[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(24): 3580-3594.
- [15] 刘永凯,吕福睿,高世杰,等. 地基大口径望远镜动态目标跟踪中压电式快速反射镜迟滞效应的补偿[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(23):3081-3089.
- [16] LYU F R, LIU Y K, GAO S J, et al. Research on bandwidth improvement of fine tracking control system in space laser communication[J]. *Photonics*, 2023, 10(11): 1179.

《光电技术应用》编辑部征稿通知

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,中国电子科技集团公司光电研究院主办,公开发行的学术性中文科技期刊。以光电技术为主要专业特色,传播光电技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。期刊的影响因子连续几年上升,2015~2023年连续入选《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

本刊征集具有创新性的未曾公开发表过的最新研究成果。

期刊所设栏目主要有:综述、光电系统、光学设计、红外技术、激光技术、光电探测、光电器件与材料、信号与信息处理、电路与控制、测试、试验与仿真等。

来稿应内容新颖,论点明确,论据充分,数据可靠,文字精炼,用词规范。论文应含中文与英文的文章题目(20字以内)、作者姓名、作者所在单位的对外名称、单位所在省、市、邮政编码、摘要、关键词(3~8个)。

期刊拥有优秀的编委会成员,审稿专家涉及光电技术的各个领域,审稿速度快、质量高;编辑人员具有较高的职业素质、反馈速度快;期刊版面设计合理、美观大方;印刷质量好,出刊及时。对于优秀论文可以减收或不收版面费。

编辑部通信地址:天津市空港经济区纬五道9号 300308

联系电话:022-59067938

投稿邮箱:bjbcetc@cetc.com.cn

联系人:朱编辑 牛编辑 杨编辑

《光电技术应用》编辑部