

激光与光电子学进展

混合自适应滤波的光束抖动控制技术研究

周睿¹, 张强^{1*}, 廖勇¹, 甘永东^{2,3}, 沈锋^{2,3}, 李新阳^{2,3}

¹中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307;

²中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

³中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

摘要 在光束传输系统中,通常存在由于传输介质引起的能量与频率成反比的宽带扰动和平台振动引起的在某个特定频率点的窄带扰动,使得光束发生抖动或漂移,造成光斑能量下降。为了解决光束传输系统中由大幅度、高频率窄带扰动和宽带扰动引起光束抖动,设计了基于高速倾斜反射镜谐振补偿的混合自适应滤波器的光束抖动控制方法。该方法采用最小均方(LMS)自适应滤波器与经典的比例-积分控制器并行工作的控制结构,分别利用LMS自适应滤波器对高频率、大幅度的窄带扰动进行抑制,比例-积分控制器对宽带扰动进行抑制,从而实现了大幅度、高频率窄带扰动和宽带扰动的同时抑制。实验结果表明,本文提出的系统结构和控制方法能够有效地抑制光束传输系统中的光束抖动。

关键词 激光光学; 光束抖动; 高速倾斜镜; 窄带扰动; 宽带扰动; 自适应滤波器; 比例-积分控制器

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1314004

Research on Beam Jitter Control Technology Base on Hybrid Adaptive Filter

Zhou Rui¹, Zhang Qiang^{1*}, Liao Yong¹, Gan Yongdong^{2,3}, Shen Feng^{2,3}, Li Xinyang^{2,3}

¹College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan 618307, China;

²Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract In the beam transmission system, there are usually wide-band disturbances with energy inversely proportional to the frequency caused by the transmission medium and narrow-band disturbances at a specific frequency caused by platform vibration, which causes the beam to jitter or drift and lead to the decrease of the spot energy. In order to solve the beam jitter caused by large amplitude, high frequency narrow-band disturbance and wide-band disturbance in the beam transmission system, this paper designs a beam jitter control method based on a hybrid adaptive filter with high-speed tilting mirror resonance compensation. The method adopts the control structure of the least mean square (LMS) adaptive filter and the classic proportional integral controller working in parallel. The LMS adaptive filter is used to suppress high frequency and large narrow-band disturbances, and the proportional integral controller is used to suppress the wide-band disturbance, so as to realize the simultaneous suppression of the large amplitude, high frequency narrow-band disturbance and wide-band disturbance.

收稿日期: 2020-09-29; 修回日期: 2020-10-08; 录用日期: 2020-10-29

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2020YFG0446)、中国民用航空飞行学院科研基金项目资助(J2020-076)、中国民用航空飞行学院面上项目(J2015-53, J2016-22)

通信作者: *zhangqiang_ioe@126.com

Experimental results show that the system structure and control method proposed in this paper can effectively suppress the beam jitter in the beam transmission system.

Key words laser optics; beam jitter; fast steering mirror; narrow-band disturbance; wide-band disturbance; adaptive filter; proportional integral control

OCIS codes 140.3425; 010.1080; 230.4040

1 引言

由于光束抖动控制在天文观测、自由空间激光通信、高能激光传输、激光加工等领域的应用日益广泛,近年来已成为一个重要的研究方向^[1]。光束在传输过程中受大气湍流等传输介质或平台振动等因素的影响,致使到达目标靶面中心的光束发生抖动或漂移,进而导致目标靶面的能量严重下降,甚至出现光斑脱离靶面的现象,这种现象被称为光束抖动^[2]。光束抖动通常包括由光学平台机械振动和大气湍流等传输介质造成的抖动,其中光学平台上运动部件引起的机械振动通常会造特定频率的窄带扰动,大气湍流等传输介质会在较宽的频率范围内产生能量与频率成反比的宽带扰动^[3-4]。

高速倾斜反射镜(FSM)凭借其结构紧凑、精度高、动态响应快、抗电磁干扰能力强等优点,被广泛应用于光束稳定控制系统中^[5-6]。为了实现光束抖动控制,国内外学者围绕 FSM 的控制方法开展了大量研究,常用方法包括基于自适应控制算法和经典比例-积分(PI)控制算法等。其中,文献[2]采用基于两级 FSM 的方法对宽带和窄带扰动进行抑制,该方法由于使用了两级光束抖动控制系统,系统规模比较庞大,成本较高;文献[7]通过为经典的 PI 控制器增加双二阶滤波器的方法,对光束抖动进行抑制,当系统中存在频率接近或高于系统带宽、幅度较大的窄带扰动时,难以取得理想的控制效果;文献[8]采用类开环控制方法来实现,该方法通常对控制系统和扰动模型参数的精确度有较高的辨识要求,系统的鲁棒性较差;文献[9-11]提出采用线性二次高斯控制(LQG)的方法对光束传输系统中的抖动进行控制,这种方法在处理时变非平稳扰动信号时较为困难;文献[12]提出使用自适应滤波器的方法对光束抖动进行抑制,然而这些方法没有对光束抖动中的宽带和窄带扰动区别对待,容易导致控制系统出现不稳定的现象。

本文主要针对光束传输通道中同时存在窄带扰动和宽带扰动的情况,提出一种在对 FSM 进行谐振补偿的基础上,构建最小均方(LMS)自适应控制

算法与经典 PI 控制算法并行工作的控制结构,利用 LMS 自适应控制算法抑制光束传输通道中存在的窄带扰动,同时发挥经典 PI 控制器对宽带扰动的抑制能力,从而达到对光束传输通道中的宽带和窄带扰动同时抑制的目的。

2 典型高速倾斜镜控制系统及性能分析

2.1 常规 FSM 控制结构

典型的光束抖动控制主要包括探测器(Sensor)、高速倾斜反射镜、高压放大器(HVA)、控制器(CC)等主要组成部分,其系统框图如图 1 所示。其中,探测器检测到光束抖动后,通过控制器计算得到控制电压,经过高压放大驱动后利用 FSM 产生光束扰动的补偿信号,从而使受到扰动干扰的光束保持在目标靶面中心位置。其控制结构框图如图 2 所示,其中, $r(s)$ 为受传输介质、平台振动等环境因素影响带来的扰动信号, $y(s)$ 为 FSM 补偿的倾斜量, $e(s)$ 为残余误差信号, $n(s)$ 为光束抖动探测系统的噪声信号。在一般情况下,波前探测器 $W(s)$ 和数模转换模块 $D(s)$ 可以用零阶保持器表示;高压放大器的带宽远大于控制闭环带宽,对控制系统的动态性能不产生显著影响,可以近似看作

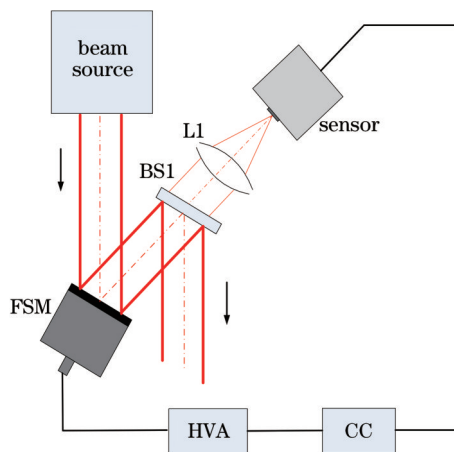


图 1 典型的 FSM 光束抖动控制结构框图

Fig. 1 Block diagram of a typical FSM beam jitter control structure

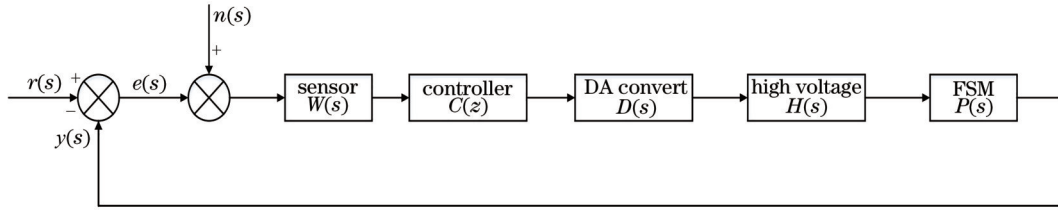


图 2 典型高速倾斜镜控制系统结构图

Fig. 2 Block diagram of a typical FSM control system

放大环节 $K_{HV}^{[2]}$; 因此, 影响光束抖动控制系统性能的主要因素为 FSM 的特性和控制器 CC 的性能。

2.2 FSM 的谐振补偿

FSM 的结构示意图如图 3 所示。FSM 由具有一定厚度和刚度的镜面、一个较大的镜座基底、一个起稳定作用的固定支柱 O 以及两个直角排列的电压驱动器 X 和 Y 构成^[13]。

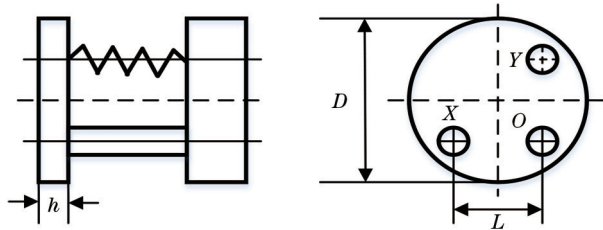


图 3 高速倾斜反射镜结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of FSM structure

通过分析可知, FSM 的模型由质量-弹簧系统、驱动器两部分构成, 其传递函数^[14]为

$$F_{\text{model}} = \frac{C_m}{Js^2 + f_m s + K} \cdot \frac{1}{RCs + 1}, \quad (1)$$

式中: s 为复频率; C_m 为等效的力矩系数; J 为等效的转动惯量; K 为等效的弹性刚度; R 和 C 分别为驱动器的等效电阻和电容。

同时, 由于驱动器部分的时间常数较小, 因此在分析过程中可以将 FSM 的传递函数简化为

$$F_{\text{model}} = \frac{C_m}{Js^2 + f_m s + K}. \quad (2)$$

然而, 当光束控制系统出现频率较高的扰动时, 由于刚度及其机械结构的限制, FSM 会产生多个近似双二阶振荡模型的机械谐振现象, 其中, 第 k 个谐振模型的传递函数为

$$F_k(s) = \frac{s^2 + 2\xi_{z,k}\omega_{z,k}s + \omega_{z,k}^2}{s^2 + 2\xi_{p,k}\omega_{p,k}s + \omega_{p,k}^2}, \quad (3)$$

式中: $\omega_{p,k}$ 和 $\omega_{z,k}$ 分别为第 k 阶谐振的极点频率和零点频率; $\xi_{p,k}$ 和 $\xi_{z,k}$ 分别为极点阻尼系数和零点阻尼系数。

因此, FSM 的传递函数可以表示为理想模型与若干个机械谐振环节串联的形式, 其传递函数模型为

$$F_{\text{SM}}(s) = F_{\text{model}}(s) \cdot F_1(s) \cdot F_2(s) \cdots F_k(s). \quad (4)$$

由于 FSM 的机械谐振的存在, 光束抖动控制系统的校正带宽受到较为严重的限制。在工程实践中, 为了保证光束控制系统的稳定工作, 通常系统闭环带宽 ω_c 远远小于高速倾斜镜的谐振频率 ω_1 ; 同时, 受到控制系统计算延迟和探测器采样保持环节的影响, 采用经典的 PI 控制器时, 系统的有效带宽在系统稳定的前提下仅能达到探测器帧频的 $1/30 \sim 1/20$ ^[15]。

为了抑制或消除机械谐振的影响, 可以在控制回路中串联双二阶滤波器, 对 FSM 的谐振和反谐振同时进行抑制补偿, 其传递函数为

$$F_r(s) = \frac{F_a(s)}{F_b(s)} = \frac{\omega_p^2 \cdot s^2 + 2\xi_z \omega_z s + \omega_z^2}{\omega_z^2 \cdot s^2 + 2\xi_p \omega_p s + \omega_p^2}, \quad (5)$$

式中: ω_p 和 ω_z 分别为极点频率和零点频率; ξ_p 和 ξ_z 分别为极点阻尼系数和零点阻尼系数^[1,16]。

图 4 显示了口径为 200 mm、谐振频率为 286 Hz 的高速倾斜反射镜的频率响应, 该曲线包含了实际测量曲线、拟合曲线及对利用二阶滤波器对谐振进行抑制后的曲线。从图 4 可以看出, FSM 的拟合曲线与实际测量数据比较吻合; 同时, 利用双二阶滤波器对谐振进行抑制后的结果显示, FSM 幅度响应曲线变得平坦, 并且在谐振点附近存在的相位反转也得到了很好的改善, 为提升光束抖动控制系统的性能奠定了基础。

图 5 为针对图 2 所示的光束抖动控制系统进行数值仿真的结果, 其中控制器为经典的 PI 控制器, FSM 的特性如图 4 所示的拟合曲线及利用双二阶滤波器对谐振进行补偿后的曲线。从图 5 可以看出, 经过双二阶滤波器补偿后, 不仅光束抖动控制系统的误差带宽有所提升, 而且在 FSM 谐振点附近的幅度响应的翻转现象也得到了较好的抑制, 有效提高了光束抖动控制系统的响应速度和稳定性。

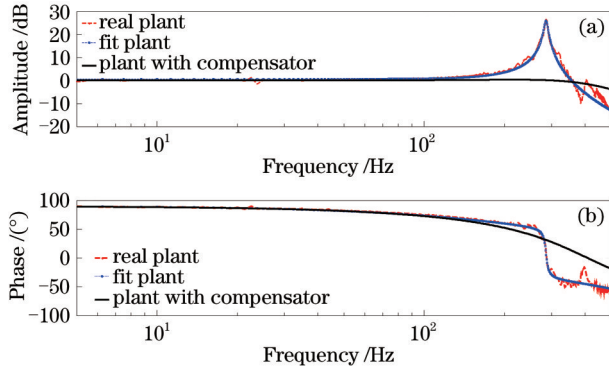


图 4 FSM 频率响应。(a) 幅度响应; (b) 相位响应

Fig. 4 Frequency response of FSM. (a) Magnitude response; (b) phase response

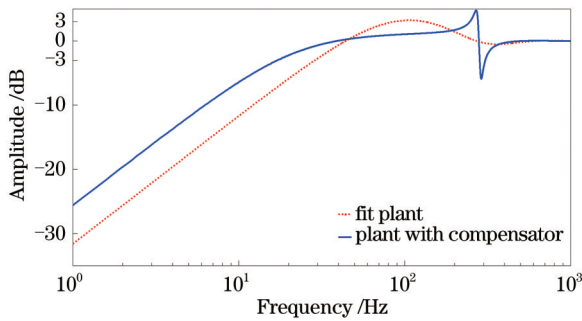


图 5 光束抖动控制系统误差传递函数 Bode 图

Fig. 5 Bode diagram of error transfer function about beam jitter control system

3 基于 LMS+PI 的光束抖动控制

由 2.1 节的分析可知,FSM 利用双二阶滤波器对谐振进行补偿后,利用经典的 PI 控制器对光束抖动进行抑制,系统性能能够得到一定程度的改善。由于控制系计算和探测器采样保持带来了时间延迟,尽管对 FSM 谐振进行了补偿,但经典的 PI 控制器的误差带宽仍然较为有限,对于系统中存在的大幅度、高频率窄带扰动难以取得满意的抑制效果。本节利用 LMS 能够对特定频率的窄带扰动产

生较好抑制效果,经典 PI 控制器能够对宽带扰动表现出理想的校正能力,将 LMS 与 PI 控制器结合,对谐振抑制后的 FSM 构成光束稳定控制系统,从而实现光束稳定系统中的宽带扰动和窄带扰动的抑制。

3.1 LMS 的基本原理

自适应滤波器抑制扰动的原理图如图 6 所示。其中, $d(n)$ 为包含宽带和窄带扰动的输入信号, $s(n)$ 为宽带扰动信号, $r(n)$ 为窄带扰动信号, $r'(n)$ 为窄带扰动参考信号, $y(n)$ 为自适应滤波器的输出信号。自适应滤波器在参考信号 $r'(n)$ 的作用下,通过调整参数使自适应滤波器的输出 $y(n)$ 成为 $r(n)$ 的最优估计,即 $e(n) = d(n) - y(n)$ 最小,从而达到消除窄带扰动 $r(n)$ 的目的。

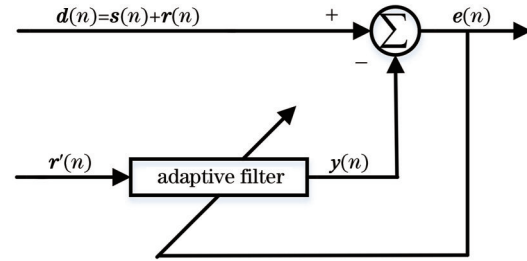


图 6 自适应滤波器原理框图

Fig. 6 Block diagram of adaptive filter

LMS 算法利用 $J(n) = E[e^2(n)]$ 均方误差代价函数,采用最速下降法对最优权向量进行有限步逼近。LMS 算法滤波器的输出表示为

$$y(n) = \boldsymbol{\omega}(n) \mathbf{r}'(n), \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\omega}(n)$ 为权重因子。权重因子更新的表达式为

$$\boldsymbol{\omega}(n+1) = \boldsymbol{\omega}(n) + 2\mu \mathbf{r}'(n) e(n), \quad (7)$$

式中: μ 为步长。同时,为了对直流分量进行校正,可以对参考输入 $\mathbf{r}'(n)$ 和权重因子 $\boldsymbol{\omega}(n)$ 进行如下修正^[17],修正后的参考输入和权重因子可以表示为

$$\mathbf{r}'_{\text{new}}^T(n) = [1, \mathbf{r}'^T(n)] = [1, r'(n), r'(n-1), \dots, r'(n-M+1)], \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{new}}^T(n) = [1, \boldsymbol{\omega}^T(n)] = [1, \omega(n), \omega(n-1), \dots, \omega(n-M+1)]. \quad (9)$$

3.2 LMS+PI 控制器的结构

由 3.1 节分析可知,对参考输入和权重因子进行修正后,光束稳定控制系统能够对扰动输入中的直流分量进行有效抑制。然而,当扰动输入的直流分量较大时,受滤波器收敛过程的影响,纯 LMS 控制下的闭环残余误差较大,且容易出现不稳定的现

象^[18]。根据自适应滤波器的工作特点,本节提出采用 LMS+PI 并行工作的方式,该工作模式控制系统框图如图 7 所示。由图 7 可知,该结构主要包括抑制宽带扰动的 PI 控制器、抑制窄带扰动的 LMS 滤波器、FSM 谐振抑制、窄带扰动参考信号产生等主要部分。在该结构中主要利用 LMS 控制器校正特

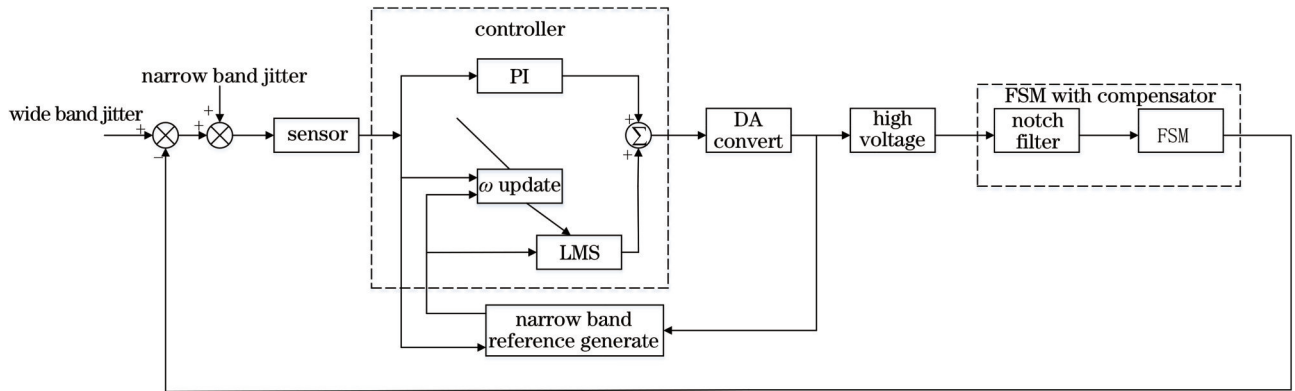


图 7 LMS+PI闭环控制结构示意图

Fig. 7 Block diagram of LMS+PI closed-loop control structure

定频率的窄带扰动,利用PI控制器校正宽带扰动,从而实现在有效抑制高频窄带扰动和宽带扰动的同时保持系统的稳定性。

4 实验验证

根据上述分析,提出了如图8所示光束抖动控制的实验方案。实验系统主要由激光器、扰动反射镜(DFS)、控制反射镜(CFSM)、高压放大器

(High Voltage1/2)、探测器、扰动模拟计算机和实时抖动控制系统构成。其中扰动模拟计算机可以通过蒙特卡罗方法产生同时包含宽带扰动和窄带扰动的实验数据,也可以输出实际工作环境下的实验数据驱动扰动反射镜,模拟外部扰动;探测器探测到光束偏移后经过实时控制系统的处理,输出控制电压,经高压放大器驱动控制反射镜,实现光束抖动的抑制。

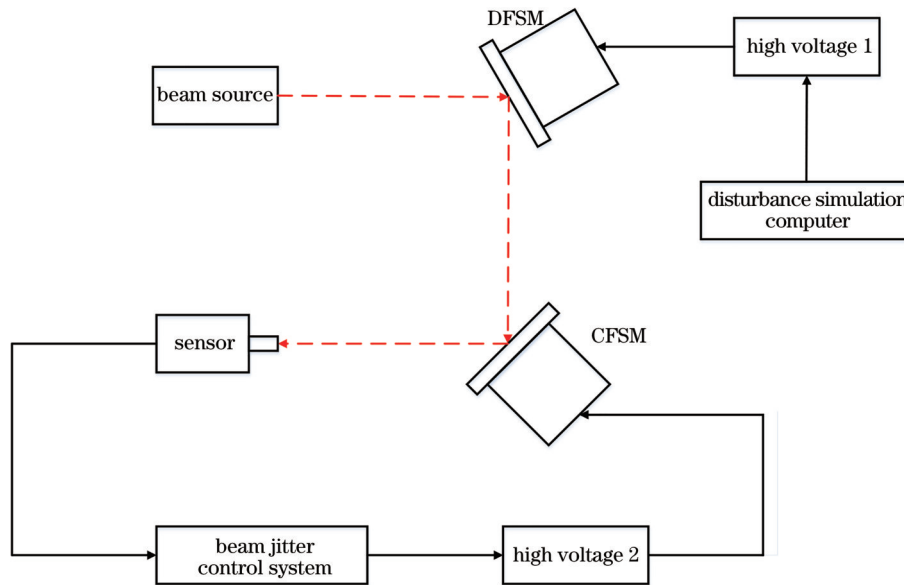


图 8 光束抖动控制实验原理框图

Fig. 8 Block diagram of beam jitter control experiment

扰动模拟计算机利用蒙特卡罗方法模拟产生同时包含宽带扰动和窄带扰动的数据。其中宽带扰动的数据符合大气湍流的功率谱,其能量与近似的与频率 f 的 $-8/3$ 成正比,宽带扰动的能量和频率关系可以近似表示为

$$E_{\text{dist}} = C \times f_{\text{dist}}^{-8/3}, \quad (10)$$

式中: E_{dist} 为扰动能量; f_{dist} 为扰动频率; C 为常数项。同时,利用扰动模拟计算机产生在113 Hz处存在一个大幅度、高频率的窄带扰动。由此可以得到同时包含宽带扰动和窄带扰动的数据的功率谱密度(PSD)曲线如图9所示。

根据该功率谱曲线,可以得到校正前扰动信号的

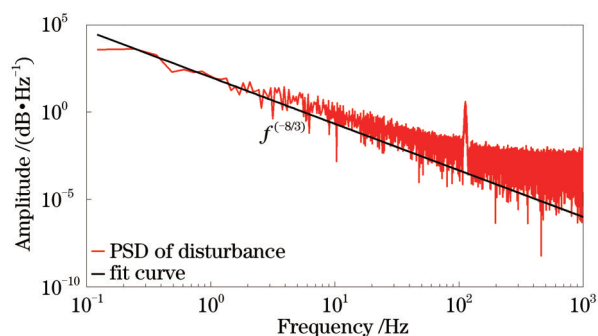


图 9 扰动输入功率谱密度曲线

Fig. 9 PSD of disturbance input

峰谷(PV)值为 112.57 μrad , RMS 值为 25.88 μrad , 其时域信号的波形如图 9 所示。

图 10 和图 11 分别显示了对 FSM 补偿后, 利用经典的 PI 控制器和 LMS+PI 控制器校正后时域曲线和积分能量的变化情况。从图 10 和图 11 可以看出, PI 控制器由于受到校正带宽的限制, 对 113 Hz

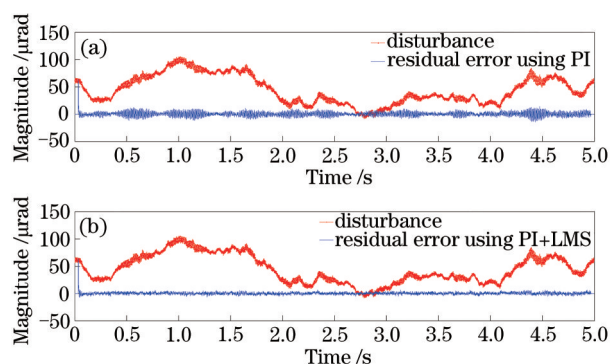


图 10 利用不同算法校正前后光束抖动的时域波形。
(a) 利用 PI 控制器校正前后的光束抖动; (b) 利用 LMS+PI 控制器校正前后的光束抖动

Fig. 10 Time series of beam jitter using different control method. (a) Beam jitter using PI; (b) beam jitter using LMS+PI

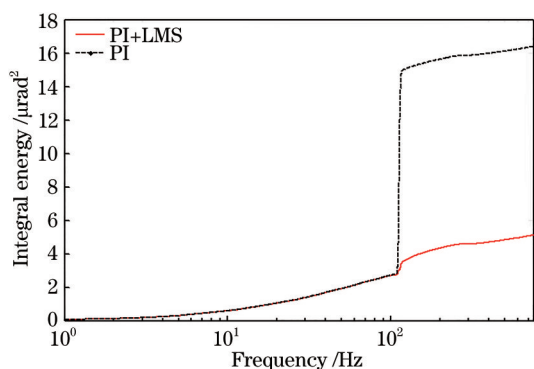


图 11 利用不同算法校正前后光束抖动的积分能量

Fig. 11 Integral energy of beam jitter using different control methods

处窄带扰动不具备抑制能力, 利用 PI 控制器补偿后, 残余误差的峰峰值和标准差分别为 28.26 μrad 和 3.80 μrad , 残余误差的积分能量约 16 μrad^2 ; LMS+PI 控制器则可以很好地克服上述问题, 利用 LMS+PI 控制器能保持 PI 控制器宽带扰动的抑制能力, 同时在初始阶段也具有较好的稳定性, 利用 LMS+PI 控制器校正后, 残余误差的峰峰值和标准差分别为 13.18 μrad 和 1.75 μrad , 残余误差的积分能量约 5 μrad^2 。结果表明, 基于 FSM 补偿的 LMS+PI 光束控制系统能够有效地对系统中存在宽带扰动和大幅度、高频率的窄带扰动进行抑制。

5 结 论

本文通过分析光束抖动控制系统中同时存在大幅度、高频率窄带扰动和宽带扰动的特点, 针对 FSM 存在机械谐振的固有特性, 提出了一种基于双二阶滤波器的补偿方法; 同时, 对 FSM 谐振补偿后的光束抖动控制系统, 提出了一种基于 LMS+PI 的控制方法, 实现了对光束传输系统中扰动的抑制。实验结果表明, 本文提出的系统结构和控制方法能够有效地抑制光束传输系统中存在的扰动。

参 考 文 献

- [1] Zhu W, Rui X T. Adaptive control of a piezo-actuated steering mirror to restrain laser-beam jitter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 7873-7881.
- [2] Zhou R, Li X Y, Shen F, et al. Laser beam stabilizing system based on close loop control of two fast steering mirrors in series[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1214002.
周睿, 李新阳, 沈锋, 等. 基于两级高速倾斜镜闭环控制的光束稳定技术研究[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1214002.
- [3] Guan B, Choi J. Temporal frequency spread of optical waves propagating in anisotropic maritime atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2019, 58(11): 2913-2919.
- [4] Beerer M J, Yoon H, Agrawal B N. Practical adaptive filter controls for precision beam pointing and tracking with jitter attenuation[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(1): 122-133.
- [5] Shao S B, Tian Z, Song S Y, et al. Two-degrees-of-freedom piezo-driven fast steering mirror with cross-axis decoupling capability[J]. Review of Scientific

- Instruments, 2018, 89(5): 055003.
- [6] Ran B, Yang P, Wen L H, et al. Analysis and compensation of reaction force in large-aperture piezoelectric fast steering mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0601007.
冉兵, 杨平, 文良华, 等. 大口径压电倾斜镜的反作用力分析及补偿研究[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0601007.
- [7] Fan M W, Huang L H, Li M, et al. High-bandwidth control of piezoelectric steering mirror for suppression of laser beam jitter[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 024209.
凡木文, 黄林海, 李梅, 等. 抑制光束抖动的压电倾斜镜高带宽控制[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 024209.
- [8] Basden A G, Jenkins D, Morris T J, et al. Efficient implementation of pseudo open-loop control for adaptive optics on Extremely Large Telescopes[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 486(2): 1774-1780.
- [9] Yang X, Anton C, Karl-Erik A. Jitter-robust LQG control and real-time scheduling co-design[C]// IEEE 2018 Annual American Control Conference (ACC), June 27-29, 2018, Milwaukee, WI, USA. New York: IEEE Press, 2018 : 3189-3196.
- [10] Lin H Q, Yang P, Kong Q F, et al. Experimental verification of wavefront correction based on linear quadratic Gaussian control[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0705004.
林海奇, 杨平, 孔庆峰, 等. 基于线性二次高斯控制的波前校正实验验证[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0705004.
- [11] Wang J Y, Guo Y M, Kong L, et al. Hybrid control method for adaptive optics system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 230101.
王佳英, 郭友明, 孔林, 等. 自适应光学系统的混合控制方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230101.
- [12] Yoon H, Bateman B E, Agrawal B N. Laser beam jitter control using recursive-least-squares adaptive filters[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2011, 133(4): 041001.
- [13] Huang L H, Fan M W, Zhou R, et al. System identification and control for large aperture fast-steering mirror driven by PZT[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 95-103.
黄林海, 凡木文, 周睿, 等. 大口径压电倾斜镜模型辨识与控制[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 95-103.
- [14] Shi J J, Yao B D, Lu J G. Modeling and transfer function identification of FSM system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2748-2752.
时晶晶, 姚佰栋, 鲁加国. 高速倾斜镜建模与传递函数辨识[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2748-2752.
- [15] Li X Y, Jiang W H. Effective bandwidth analysis of adaptive optics control system[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(12): 98-103
李新阳, 姜文汉. 自适应光学控制系统的有效带宽分析[J]. 光学学报, 1997, 17(12): 98-103
- [16] Zhou R. Real time signal processing and optimal control technology on adaptive optics systems[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, 2017.
周睿. 自适应光学实时信号处理及优化控制技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017.
- [17] Michael J B, Hyungjoo Y, Brij N A. Adaptive filter techniques for optical beam laser jitter control[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7338: 733802.
- [18] Guo Y M. Optimization of wavefront reconstruction and wavefront control in adaptive optics systems[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, 2014.
郭友明. 自适应光学系统波前复原及波前控制优化技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2014.