

DOI: 10.12086/oe.2023.230177

特征扰动频率辨识的自适应倾斜扰动抑制技术

吴红梅^{1,2,3,4}, 王琛⁵, 冯念^{1,2,3,4},
文利^{1,2,3,4}, 唐涛^{1,2,3,4*}

¹中国科学院光场调控科学技术全国重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209;

³中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

⁴中国科学院大学, 北京 100049;

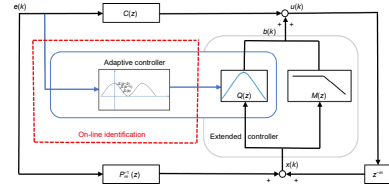
⁵航天系统部装备部军事代表局驻成都地区军事代表室, 四川 成都 610000

摘要: 为了抑制倾斜校正系统中的时变扰动, 提出了一种基于特征扰动频率辨识的自适应扰动抑制方法。采用最小均方误差准则对闭环系统误差进行特征扰动频率辨识, 以实现自适应控制器参数的在线调整, 且将辨识的滤波参数与控制器调整并行化设计。同时提出频率分割的方法, 将低频扰动以及高频扰动的抑制相结合, 进一步提高了特征频率辨识速度以及简化设计流程, 实现对闭环带宽内的扰动自适应抑制。所提出的方法在倾斜校正装置中进行了闭环验证, 实验结果表明该方法能快速辨识特征扰动并自适应调节控制器, 可以在单频或多频时变扰动下提升系统的闭环性能。

关键词: 倾斜校正系统; 频率分割; 特征频率辨识; 自适应扰动抑制

中图分类号: TP273

文献标志码: A



吴红梅, 王琛, 冯念, 等. 特征扰动频率辨识的自适应倾斜扰动抑制技术 [J]. 光电工程, 2023, 50(10): 230177

Wu H M, Wang C, Feng N, et al. Adaptive tip-tilt disturbance suppression technique for characteristic disturbance frequency identification[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(10): 230177

Adaptive tip-tilt disturbance suppression technique for characteristic disturbance frequency identification

Wu Hongmei^{1,2,3,4}, Wang Chen⁵, Feng Nian^{1,2,3,4}, Wen Li^{1,2,3,4}, Tang Tao^{1,2,3,4*}

¹National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

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

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁵The Military Representative Office of the Military Representative Bureau of the Equipment Department of the Aerospace System Department in Chengdu, Chengdu, Sichuan 610000, China

收稿日期: 2023-07-18; 修回日期: 2023-10-15; 录用日期: 2023-10-16

基金项目: 四川省杰出青年基金资助项目 (2021JDJQ0028)

*通信作者: 唐涛, taotang@ioe.ac.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

Abstract: In order to suppress the time-varying disturbance in the tip-tilt correction system, an adaptive disturbance suppression method based on characteristic disturbance frequency identification is proposed in this paper. The least mean square error criterion is used to identify the characteristic disturbance frequency of the closed-loop system error, and the identified filtering parameters and controller adjustment are designed in parallel. At the same time, a method based on frequency splitting is proposed: combining low-frequency disturbance with high-frequency disturbance suppression, which further improves the speed of characteristic frequency identification and simplifies the design process, and realizes adaptive disturbance suppression in the closed-loop bandwidth. The closed-loop verification of the proposed method is carried out in the tip-tilt correction device. The experimental results show that the method can quickly identify the characteristic disturbance and adaptively adjust the controller, which can improve the closed-loop performance of the system under single-frequency and multi-frequency time-varying disturbance.

Keywords: tip-tilt correction system; frequency splitting; characteristic frequency identification; adaptive disturbance suppression

1 引言

倾斜校正系统广泛应用于高分辨率望远镜、自由空间光通信等精密光学系统中, 实现稳像、光束稳定等功能^[1-2]。如在望远镜中, 倾斜校正系统进行稳像时会受到扰动的影响, 其中引起光束抖动的扰动普遍具有未知性和时变性^[3]。因而抑制倾斜校正系统中的时变扰动对于提升光学系统视轴稳定精度至关重要。目前, 倾斜校正系统中抗扰方法主要集中在比例积分 (PI) 控制、扰动前馈 (DFE) 控制和扰动观测器 (DOBC) 控制^[4]。王等人提出基于 SBG 的双扰动捷联控制进行抗扰, 提升稳定精度。张等人提出一种新型控制方法, 该方法既能进行隔振抗扰, 又能进行高精度跟踪^[5-6]。但是这些方法对扰动的抑制能力有限, 难以抑制时变随机扰动。为了抑制倾斜校正系统中的时变扰动, 许多自适应控制方法被提出。张等人在光电稳像平台中提出了无迹卡尔曼滤波扰动力矩在线估计方法, 结合前馈控制对于扰动力矩进行自适应补偿^[7]。在望远镜中, 有研究者针对时变扰动提出了基于频谱分离和优化算法的 LQG 控制, 该方法在抚仙天文台的望远镜系统中得到验证, 并证明了系统在线识别性能的实时性^[8]。但是这两种方法需要精确的建模, 这是一个耗时的过程。因此为了进一步提高稳像性能, 阮等人提出基于在线功率谱密度估计的自适应 Youla 参数化控制, 实现对一个或多个变化扰动的实时抑制, 并且该方法不依赖精确的模型^[9]。在其它高精度控制系统中, 有采用基于频率分离的自适应前馈控制和基于状态观测器的自适应滑模控制对时变扰动进行抑制^[10-11]。由上

述方法可知, 自适应控制的核心是参数辨识算法和控制结构。参数辨识是对扰动信号的频率、幅值、相位等特征进行辨识^[12-13]。目前辨识算法多数基于频谱分析, 如基于 DFT、FFT 等的估计方法。这些自适应控制算法是全频域搜索, 计算量大、耗时较长^[14-15]。另一类自适应算法从时域对特征扰动频率进行估计, 对实际采集到的信号基于最小均方 (LMS) 算法进行降噪, 再提取主峰频率估计值^[16]。Yuan 等人为抑制波浪扰动的影响, 提出基于最小二乘辨识算法对波峰频率进行估计, 最后仿真结果表明能对波峰频率进行准确估计^[17]。由于 LMS 算法计算复杂度不高, 近年来有较多基于 LMS 算法的自适应陷波频率辨识方法的研究。如文献 [18-19] 等采用自适应陷波的方法对扰动频率进行估计, 较为简单和快速。

如上所述, 在倾斜校正系统中进行时变扰动抗扰时, 多数自适应控制算法进行的是全频域搜索方式并且需要精确的建模, 参数辨识部分的算法计算量大, 调整的控制参数较多, 复杂且耗时。然而基于 Youla 参数化控制的自适应算法不依赖精确的模型, 可以直接调整控制器的内模, 降低了自适应控制器的复杂度, 不涉及对控制器进行复杂的重新设计。同时基于 Youla 参数化的控制方法是一种优化误差的方法, 能保证动态闭环系统的渐进稳定性^[20-21]。从辨识算法来说, 基于 LMS 的时域辨识算法简单、快速, 为控制器参数的快速调整提供了保障。因此, 本文提出一种基于 LMS 的特征扰动辨识与 Youla 参数化控制结合的自适应扰动抑制方法, 以提高自适应扰动抑制的速度, 提升倾斜校正系统的闭环性能。

2 倾斜校正系统自适应控制

在倾斜校正系统中, 利用传统的控制方法进行闭环控制后系统中仍然存在两种扰动难以抑制。这两种扰动主要表现为幅值小、频带宽的扰动和大幅度窄带扰动。为此 Ruan 等人采用 Youla 参数化控制, 将控制器 $F(z)$ 分为低通滤波器和带通滤波器两部分, 对低频扰动和大幅窄带扰动进行抑制。此结构简单且易于保持系统稳定性, 但是该方法不能应对时变扰动^[22]。因此本文基于频率分割将带通滤波器设计为自适应控制器 $Q(z)$, 以应对时变的大幅、窄带尖峰干扰。同时兼顾了低通滤波器的优势, 能对低频扰动和大幅窄带扰动进行抑制。倾斜校正系统是基于图像闭环的控制系统, 如图 1 所示, 由中心控制器、扩展控制器、驱动器、倾斜镜、图像传感器组成。其中图像传感器用于检测目标质心, 以提供受控的倾斜误差。在扩展控制器部分本文提出利用自适应算法对特征扰动的主频信号进行在线快速辨识, 调节自适应控制器 $Q(z)$ 的参

数, 与中心控制器共同衰减倾斜误差。

如图 2 所示, 为本文所提出的自适应 Youla 参数化控制结构, 该控制方法的自适应部分将 Youla 参数化控制与自适应频率辨识相结合。如图 1 所示, 由于光路中和平台带来的扰动会影响闭环误差, 因此频率在线辨识部分对闭环误差 $e(k)$ 进行估计, 用估计所得的参数对控制器 $Q(z)$ 进行调整。中心控制 $C(z)$ 是传统的比例积分控制, $M(z)$ 为低通滤波器。将控制器 $Q(z)$ 与低通滤波器 $M(z)$ 合并为扩展控制器 $K(z)$, 则该控制结构的扰动抑制函数为

$$D''(z) = \frac{[1 - K(z)z^{-m}]}{1 + C(z)P(z)z^{-n} + [P(z)P_n^{-1}(z)z^{-n} - z^{-m}]K(z)}, \quad (1)$$

式中: $K(z) = Q(z) + M(z)$, $P(z)$ 是等效被控对象特性, z^{-n} 是系统延时, z^{-m} 为等效延时。原始闭环反馈控制系统的扰动抑制函数 $D'(z) = \frac{1}{1 + C(z)P(z)z^{-n}}$ 。若获得系统模型与系统延时, 则有:

$$[P(z)P_n^{-1}(z)z^{-n} - z^{-m}] \cdot K(z) \approx 0. \quad (2)$$

此时 $D''(z) = [1 - K(z)z^{-m}]D'(z)$, 因此若要提高系统扰动抑制能力, 即实现 $1 - K(z)z^{-m}$ 的最小化。在理想情况下, 当 $1 - K(z)z^{-m} = 0$ 时, 闭环误差可以被完全消除。但只有在中低频条件下才较容易获得系统模型, 所以扩展控制器 K 应为一个低通滤波器, 使 $[P(z)P_n^{-1}(z)z^{-n} - z^{-m}]K(z)$ 接近于 0。此时该控制系统的闭环传递函数为

$$H(z) = \frac{A}{B}, \quad (3)$$

其中:

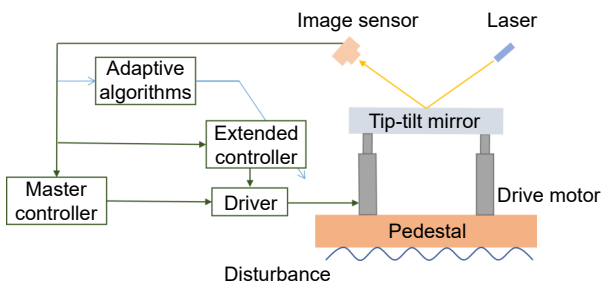


图 1 自适应倾斜校正系统

Fig. 1 Adaptive tip-tilt correction system

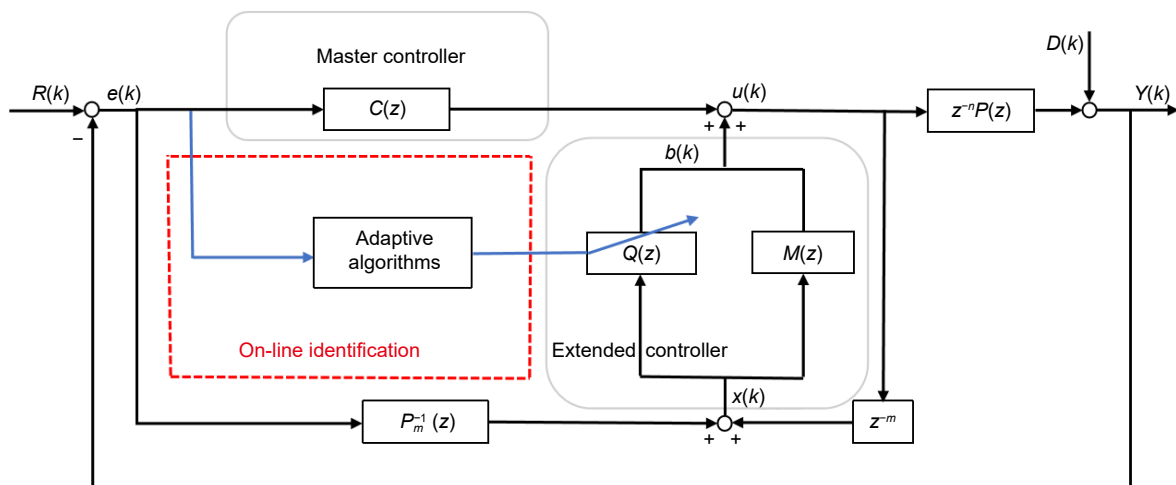


图 2 自适应控制框图

Fig. 2 Adaptive control block diagram

$$A = C(z)P(z)z^{-n} + K(z)P(z)P_n^{-1}(z)z^{-n},$$

$$B = 1 + C(z)P(z)z^{-n} + [P(z)P_n^{-1}(z)z^{-n} - z^{-m}]K(z).$$

由式 (3) 可得特征多项式为

$$J(z) = 1 + C(z)P(z)z^{-n} + [P(z)P_n^{-1}(z)z^{-n} - z^{-m}]K(z) = (1 + C(z)P(z)z^{-n}) \cdot (1 + \lambda), \quad (4)$$

其中: $\lambda = \frac{(P(z)P_n^{-1}(z)z^{-n} - z^{-m})K(z)}{1 + C(z)P(z)z^{-n}}$, 当 $[P(z)P_n^{-1}(z)z^{-n} - z^{-m}]K(z)$ 接近于 0, 则满足:

$$|\lambda|_\infty < 1, \quad (5)$$

式 (5) 满足小增益定理, 可以保证系统的稳定性。

针对倾斜校正系统中高频扰动和低频扰动的抑制, 利用频率分割的方法, 控制器 $Q(z)$ 与 $M(z)$ 并联, $K(z) = Q(z) + M(z)$ 。当只有低频扰动时, $M(z)$ 为低通滤波器, 此时 $1 - K(z)z^{-m}$ 表现为 $1 - M(z)z^{-m}$, 整体呈现高通滤波效果, 可以对低频扰动进行有效抑制且满足系统稳定性; 对高频扰动进行抑制时, 提高扰动抑制能力的主要任务是对自适应控制器 $Q(z)$ 进行设计, 即最小化 $1 - Q(z)z^{-m}$, 以抑制时变的窄带尖峰干扰。

3 基于闭环误差的特征频率辨识

自适应倾斜校正系统中, 对时变窄带尖峰扰动的中心频率进行快速辨识是自适应控制的关键。在频率辨识的方法中, 最直接且准确的方法是进行傅里叶变换。如 FFT 算法, 但是傅里叶变换运算复杂, 并且需要采取一定的数据点, 耗时较长。因此, 本文从时域出发提出基于闭环误差的特征扰动频率辨识算法, 理论上只需获取三个数据点就能得到该时刻的频率辨识值。假设主导扰动为余弦信号 $S(k)$, 则:

$$\begin{cases} S(k) = I \cos(\omega k + \phi), k = 1, 2, \dots, N \\ \omega = 2\pi \frac{f}{F_s} \end{cases}, \quad (6)$$

其中: I 、 ω 、 ϕ 分别为未知闭环误差信号的幅值、角频率和初始相位。 F_s 为采样频率, f 为待辨识的扰动信号频率。对 $S(k)$ 进行等间隔采样, 再利用离散的相邻数据点 $S(k-2)$ 、 $S(k-1)$ 、 $S(k)$ 求出关于扰动信号频率的方程。根据三角恒等变换 $\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha - \beta)$ 可得:

$$S(k) + S(k-2) = 2I \cos(\omega(k-1) + \phi) \cos(\omega) = 2 \cos \omega S(k-1). \quad (7)$$

然而在实际系统中, 待辨识信号混杂了噪声, 这对于所取数据点具有很大的影响。直接采用式 (7) 难以准确获取特征扰动频率。为了最小化估计误差, 对时变窄带尖峰扰动的中心频率进行准确辨识, 采取如

下处理, 假设实际信号为 $V(k)$, 则有:

$$\begin{aligned} V(k) &= S(k) + n(k) \\ &= 2 \cos \omega S(k-1) - S(k-2) + n(k) \\ &= 2 \cos \omega V(k-1) - V(k-2) \\ &\quad - 2 \cos \omega n(k-1) + n(k-2) + n(k) \\ &= \gamma V(k-1) - V(k-2) + \delta(k). \end{aligned} \quad (8)$$

由式 (8) 可得:

$$\delta(k) = V(k) - \gamma V(k-1) + V(k-2), \quad (9)$$

$\gamma = 2 \cos \omega$, 为本文的特征扰动频率辨识参数。

采用 LMS 算法, 建立如下优化目标函数:

$$S = |\delta(k)|^2. \quad (10)$$

此时目标函数梯度为

$$\frac{dS}{d\gamma} = 2\delta(k) \frac{d\delta(k)}{d\gamma}. \quad (11)$$

对式 (9) 求导可得 $\frac{d\delta(k)}{d\gamma} = -V(k-1)$, 所以目标函数梯度 $g(k)$ 为

$$g(k) = \frac{dS}{d\gamma} = -2\delta(k)V(k-1). \quad (12)$$

根据梯度迭代搜索公式可得 γ 的下一时刻更新值:

$$\begin{aligned} \gamma(k+1) &= \gamma(k) - \mu \left[2\delta(k) \frac{d\delta(k)}{d\gamma} \right] \\ &= \gamma(k) + \zeta \delta(k)V(k-1). \end{aligned} \quad (13)$$

由于在倾斜校正系统中是对闭环误差信号 $e(k)$ 进行估计, 因此式 (13) 变为

$$\gamma(k+1) = \gamma(k) + \zeta \delta(k)e(k-1). \quad (14)$$

其中, $\zeta = 2\mu$ 为步长因子且 $\zeta > 0$ 。结合式 (9)、(14) 获得 γ , 其中步长因子 ζ 的选取十分重要。由式 (9) 知 $\gamma = 2 \cos \omega$, 则 $\omega = \arccos(0.5\gamma)$, 因此:

$$\Delta\omega = \frac{0.5}{\sqrt{1-0.25\gamma^2}} \zeta. \quad (15)$$

当系统采样频率为 2000 Hz 时可得:

$$\Delta f = \frac{2000\Delta\omega}{2\pi} = \frac{500}{\pi\sqrt{1-0.25\gamma^2}} \zeta. \quad (16)$$

由式 (16) 可得出, 步长因子 $\zeta < 0.0001$, 即 $0 < \zeta < 0.0001$ 时, 扰动中心频率变化小于 1 Hz; 步长因子 $\zeta < 0.00001$, 即 $0 < \zeta < 0.00001$ 时, 扰动中心频率变化小于 0.1 Hz。在此范围内 ζ 越小, 辨识越准确但收敛速度越慢; ζ 越大, 辨识速度越快但会导致辨识准确度变差。因此, 在工程应用中应考虑辨识精度以及实际系统噪声等因素选择合适的步长^[23-24]。

4 自适应控制器 Q 的设计

在倾斜校正系统中实现自适应控制包括两个重要部分, 分别为参数辨识和自适应控制器的设计。参数辨识部分上一节进行了讨论, 接下来是控制器的设计与参数调整。本文进行自适应控制时是以衰减闭环误差为目的。在进行参数辨识时采用式 (9)、(14) 结合, 衰减误差值 $\delta(k)$, 逼近特征频率相关参数 γ 的值。因此在进行自适应控制器设计时也采用与式 (9) 类似的数字陷波器, 二者保持一致性, 进而更新辨识部分参数时, 也能同步更新自适应控制器的参数, 以达到 $\delta(k)$ 与闭环误差衰减的一致性。本文所设计的自适应控制器如图 3 所示, 在原有低通滤波器 $M(z)$ 的基础上并联自适应控制器 $Q(z)$, 下面将对自适应控制器 $Q(z)$ 进行详细设计。

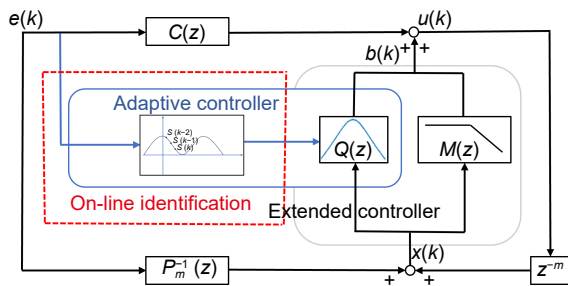


图 3 自适应控制器
Fig. 3 Adaptive controller

在第二节中提出提高扰动抑制能力主要是实现 $1 - Q(z)z^{-m}$ 的最小化, 即最小化 $1 - Q(z)$ 。令 $W(z) = 1 - Q(z)$, 为抑制窄带尖峰干扰, $W(z)$ 应该被设计为一个陷波器, 所以自适应控制器 $Q(z)$ 应该被设计为一个峰值滤波器。本文采用的数字陷波器为

$$W(z, \omega_0) = \frac{X(z, \omega_0)}{T(z, \omega_0)} = \frac{C_1 - C_2 Z^{-1} + Z^{-2}}{C_1 - \rho C_2 Z^{-1} + \rho^2 Z^{-2}}, \quad (17)$$

其中: $C_1 = 1$, $C_2 = 2\cos(\omega_0)$ 是本文控制器的设计参数, $\rho \in (0, 1)$, 为与陷波器的带宽和深度有关的参数。根据式 (17) 可以得出 $X(z, \omega_0)$ 和 $T(z, \omega_0)$ 的输出分别为 $p'(k)$ 和 $p''(k)$, 表示如下:

$$p'(k) = e(k) - 2\cos\omega_0 e(k-1) + e(k-2), \quad (18)$$

$$p''(k) = p'(k) + 2\rho\cos\omega_0 p''(k-1) - \rho^2 p''(k-2). \quad (19)$$

式 (9) 和式 (18) 一样, 因此在估计误差收敛时, 自适应控制器的输出也实现同步收敛。 $p''(k)$ 作为本文进行特征扰动辨识时的估计误差观测值, 实时反应

误差收敛情况。自适应控制器表示为

$$Q(z) = 1 - W(z) = \frac{(1-\rho)C_2 Z^{-1} + (\rho^2 - 1)Z^{-2}}{C_1 + \rho C_2 Z^{-1} + \rho^2 Z^{-2}}. \quad (20)$$

控制器 $Q(z)$ 的输出为

$$b(k) = (1-\rho)C_2 x(k-1) + (\rho^2 - 1)x(k-2) - \rho C_2 b(k-1) - \rho^2 b(k-2), \quad (21)$$

其中: $b(k)$ 为实际控制器输出信号, 式中陷波器的输入为 $x(k)$, $x(k) = e(k)p_m^{-1}(z) + u(k)z^{-m}$ 。 C_2 为经本文提出的基于最小均方误差准则的特征扰动频率辨识参数, 最后对它进行调节。

本文采用的数字陷波器 $W(z)$, 其幅频特性为 $W(\omega)$, 相频特性为 φ , 则

$$W(\omega) = \frac{2|\cos\omega_0 - \cos\omega|}{L}, \quad (22)$$

其中:

$$L = \sqrt{[(1 + \rho^2)\cos\omega_0 - 2\rho\cos\omega]^2 + [(1 - \rho^2)\sin\omega_0]^2},$$

$$\varphi = \begin{cases} \arctan \frac{(1 - \rho^2)\sin\omega_0}{(1 + \rho^2)\cos\omega_0 - 2\rho\cos\omega}, & \omega \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi + \arctan \frac{(1 - \rho^2)\sin\omega_0}{(1 + \rho^2)\cos\omega_0 - 2\rho\cos\omega}, & \omega > \frac{\pi}{2} \end{cases}. \quad (23)$$

如图 4 所示, 通过仿真可以直观看出该陷波器的频率特性。当参数 ρ 越接近 1 时陷波器带宽越小, 陷波衰减特性越好; 但是当陷波深度越深时, 带宽较窄, 对参数估计误差的容忍度较小。减小 ρ 的值, 陷波器的带宽会变大且深度还是很深, 会影响系统稳定性。因此调节另一个参数 C_1 , 使它变为一个接近于 1 的数。在 $C_1 = 1.00001$ 时, 陷波器的深度会变浅。而 $C_1 = 1.00001$ 保持不变, ρ 依次为 0.985 和 0.905 时, ρ 为 0.905 深度会更深。因此采取一个合适的值, 本次实

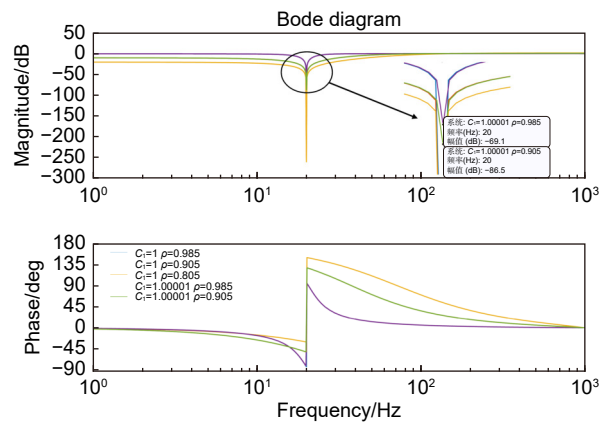


图 4 不同参数陷波器的幅频特性曲线
Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic curves of notch filters with different parameters

验所用参数 C_1 、 ρ 分别为 1.00001 和 0.985。在实际工程应用中, 可以根据自身需求去调节相应参数。

5 实验验证

为验证本文所提出的控制方案, 搭建如图 5 所示实验平台。TTM1 和 TTM2 为音圈驱动的倾斜镜, 实验过程中驱动 TTM1 用来模拟加载平台振动产生的扰动, TTM2 可以模拟光路中带来的扰动。TTM3 是以压电陶瓷驱动的倾斜镜, 该倾斜镜具有 X、Y 两个活动轴, 闭环分辨率为 0.05 μrad , 角行程为 2 mrad, 作为被控对象。本实验只对 TTM3 的 Y 轴进行控制, X 轴是禁用的, 扰动镜也一样。图像传感器 PSD 用于获取光斑的位置信息。进行实验时由激光器发出光源, 经过以压电陶瓷驱动的 TTM3 再反射到 TTM2, 最后回到图像传感器检测目标位置信息。图像传感器 PSD 的采样频率为 2000 Hz, 分辨率为 1 μm , 将 PSD 采集到的信息传到闭环控制回路, 对倾斜误差进行调控。

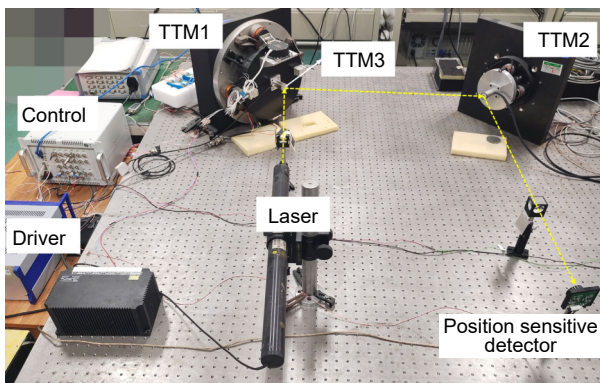


图 5 实验平台图
Fig. 5 Experimental platform diagram

5.1 并联滤波扰动抑制

为验证本文提出频率分割方法中并联滤波的有效性, 对 PI 控制以及加入 Youla 参数化控制结构时仅使用滤波器 $M(z)$, $M(z)$ 并联 $Q(z)$ 的三种频率特性测试进行对比, 并绘制了误差抑制曲线 C、M、K。实验采用带宽为 10 Hz 的二阶低通滤波器 $M(z)$, 中心频率为 20 Hz 的陷波器 $Q(z)$ 。图 6 所示, 相比于 PI 控制, 使用低通滤波器 $M(z)$ 以提高 7 Hz 以下的扰动抑制能力, 采用并联滤波后, 如黄色曲线所示, 系统的误差抑制能力进一步提升, 所设计的并联滤波器对低频和高频的扰动抑制的有效性。

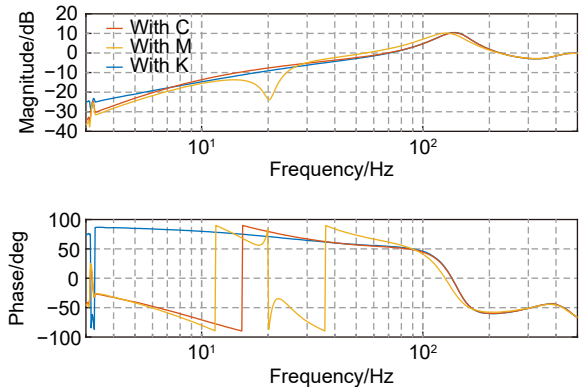


图 6 三种情况下的扰动抑制能力曲线
Fig. 6 Disturbance suppression ability curves in three cases

5.2 单频时变扰动的自适应抑制

为验证控制器 $Q(z)$ 对单频时变尖峰扰动的自适应抑制, 进行了如下实验。其中扰动由 TTM1 产生, 输入倾斜校正系统的模拟扰动频率依次为 23 Hz、30 Hz、35 Hz、42 Hz、48 Hz, 单次扰动频率发生变化的间隔时间约为 17 s。控制系统闭环后, 通过在线自适应特征扰动频率辨识可以得到未知扰动的中心频率如图 7 所示。图中标出了频率辨识的瞬时值与对每个扰动频率进行辨识的相对误差平均值, 可看出相对误差不超过 2%。本次实验过程中考虑辨识精度与实际噪声的因素, 步长因子 ζ 取值为 0.0000001。在自适应扰动抑制过程中, 辨识算法估计误差的观测值随时间的变化趋势如图 8 所示, 估计误差发生剧烈变化的时间较短, 能快速收敛且趋于稳定。如图 9 所示, 红色曲线和蓝色曲线分别表示自适应控制方法和 PI 控制方法下倾斜误差的变化趋势。且倾斜误差变化趋势与估计误差变化趋势一致, 证明辨识的滤波参数与控制调整并行化设计的有效性, 以达到估计误差和实际倾斜误差的同步收敛。从频域图得出自适应 Youla 参数化控制较 PI 控制时, 对扰动的抑制能力提高了 2

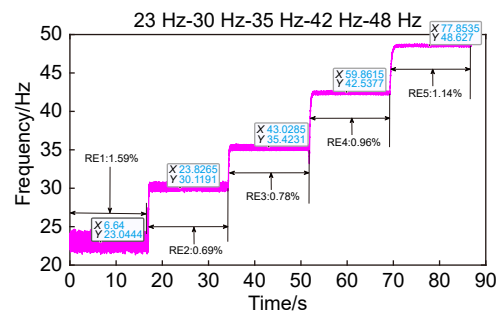


图 7 频率辨识过程
Fig. 7 Frequency identification process

到 3 倍。实验结果表明, 当扰动频率发生变化时自适应控制器 $Q(z)$ 可以快速有效地抑制变化的扰动。

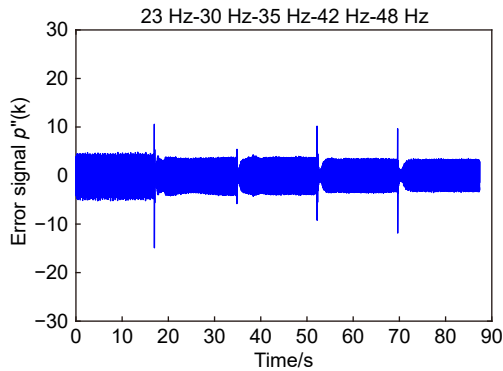


图 8 扰动连续变化时的估计误差
Fig. 8 The estimation error when the disturbance changes continuously

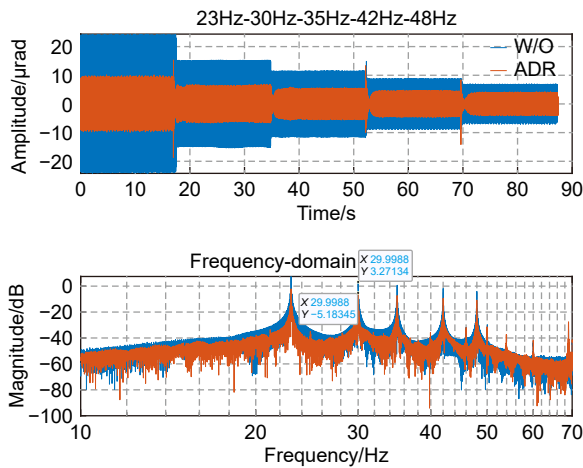


图 9 扰动连续变化时倾斜误差的时域、频域图
Fig. 9 Time domain and frequency domain diagram of tip-tilt error when disturbance changes continuously

为了更直观地对比两种控制方法的抗扰性能, 列出了此次两种控制方法的均方根误差如表 1 所示。在本次连续发生 5 次变频模拟扰动的实验中, 自适应 Youla 参数化控制算法对扰动的抑制率相比于 PI 控制方法至少提升 51.6%, 平均扰动抑制率提升了 58.7%。直观地表现了本文所设计的控制器 $Q(z)$ 能自适应地对未知时变的尖峰扰动进行快速、有效的抑制, 有效提升倾斜校正系统的性能。

表 1 均方根误差

Table 1 Root-mean-square error

Frequency/Hz	23	30	35	42	48
PI/ μ rad	16.77	10.41	7.75	5.78	4.46
ADR/ μ rad	5.82	3.87	3.22	2.59	2.16
Ratio/%	65.3	62.8	58.5	55.2	51.6

5.3 多频扰动的自适应抑制

低频扰动和高频扰动同时存在或出现多个高频扰动时, 倾斜校正系统面临更大的挑战。为了验证本文所提出的自适应 Youla 参数化控制算法对主频扰动与低频宽带扰动的抑制能力, 进行了两组多频混合扰动的实验, 实验中扰动均由 TTM1 产生。第一组实验输入频率为 2 Hz、24 Hz 和 50 Hz 的混合扰动信号。图 10(a) 为混频扰动信号输入系统时倾斜误差的时域频域变化图。蓝色曲线为 PI 控制下的倾斜误差, 红色曲线为自适应控制时的倾斜误差。该组实验中, 2 Hz 的低频扰动得到有效抑制, 同时 24 Hz 的主频扰动被衰减了 8 dB 左右。采用 PI 控制时, 倾斜误差的均方根误差为 15.49 μ rad, 进行自适应控制时为 6.50 μ rad。证明了控制器 $M(z)$ 和自适应控制器 $Q(z)$ 的有效性。第二组实验输入频率为 10 Hz、20 Hz 和 60 Hz 的混合扰动信号, 如图 10(b) 所示, 在多个尖峰扰动的情况下, 主频干扰衰减约 13 dB; 自适应控制方法较于传统 PI 控制方法, 倾斜误差的均方根误差从 19.29

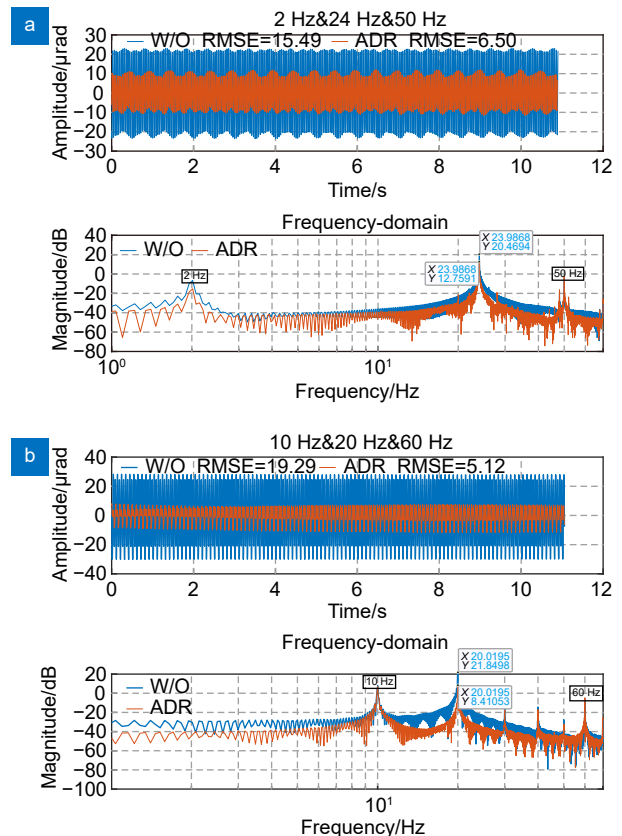


图 10 抑制多频扰动的倾斜误差。(a) 低频宽带扰动混合尖峰扰动; (b) 尖峰扰动

Fig. 10 Tip-tilt error of suppressing multifrequency disturbances. (a) Low-frequency broadband disturbance mixed spike disturbance; (b) Peak disturbance

μrad 衰减至 $5.12 \mu\text{rad}$, 证明了本文所提出的基于 LMS 的自适应 Youla 参数化控制算法能对主频干扰进行有效抑制。

6 结论

本文通过理论分析和实验验证, 证明基于频率分割的自适应扰动抑制方法能对高频扰动和低频扰动进行有效抑制。所提出的自适应辨识算法采用最小均方误差准则, 利用闭环误差进行特征频率辨识, 能快速有效的抑制未知时变的尖峰扰动。该辨识算法与 Youla 参数化控制相结合, 在不影响系统稳定性的基础上, 将扰动抑制问题转变为误差衰减的问题。与传统的闭环反馈控制相比, 在单频时变扰动或多频扰动下均可有效提升系统的闭环性能。同时本文提出的算法不仅能应用在稳像系统中, 也可用于其它高精度控制系统。后续研究中将着重对多个特征扰动频率进行辨识, 实现对多个扰动的同时抑制, 使倾斜校正系统性能得到进一步的提升。

参考文献

- [1] Niu S X, Jiang J, Tang T, et al. Optimal design of Youla controller for vibration rejection in telescopes[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(9): 190547.
牛帅旭, 蒋晶, 唐涛, 等. 望远镜中扰动抑制的 Youla 控制器优化设计[J]. *光电工程*, 2020, **47**(9): 190547.
- [2] Wang X, Su X Q, Liu G Z, et al. Laser beam jitter control of the link in free space optical communication systems[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(25): 41582–41599.
- [3] Zhu W, Rui X T. Adaptive control of a piezo-actuated steering mirror to restrain laser-beam jitter[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2018, **66**(10): 7873–7881.
- [4] Tang T, Niu S X, Ma J G, et al. A review on control methodologies of disturbance rejections in optical telescope[J]. *Opto-Electron Adv*, 2019, **2**(10): 190011.
- [5] Wang Y, Bian Q H, Liao J, et al. Strapdown inertial stabilization technology based on SBG inertial navigation in inertial stabilization gimbal[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(5): 220238.
王玉, 边启慧, 廖军, 等. 惯性稳定万向架中基于 SBG 惯导的捷联控制技术[J]. *光电工程*, 2023, **50**(5): 220238.
- [6] Zhang L Z, Yang T, Wu Y, et al. Image measurement-based two-stage control of Stewart platform[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(8): 220019.
张良总, 杨涛, 吴云, 等. 基于图像测量的 Stewart 平台双阶控制技术[J]. *光电工程*, 2022, **49**(8): 220019.
- [7] Zhang W M, Shi Z L, Ma D P. Disturbance torque estimate and adaptive compensation for optoelectronic stabilized platform[J]. *Inf Control*, 2019, **48**(5): 589–594, 602.
张伟明, 史泽林, 马德鹏. 光电稳像平台扰动力矩估计与自适应补偿[J]. *信息与控制*, 2019, **48**(5): 589–594, 602.
- [8] Wang J Y, Guo Y M, Kong L, et al. Automatic disturbance identification for linear quadratic Gaussian control in adaptive optics[J]. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, **496**(4): 5126–5138.
- [9] Ruan Y, Xu T R, Tang T, et al. Adaptive Youla–Kučera parametric control of unknown tip-tilt disturbance rejection in image stabilization systems[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(11): 2670–2673.
- [10] Pan J W, Chen Z, Wang Y, et al. Frequency separation based adaptive feedforward control for rejecting wideband vibration with application to hard disk drives[Z]. arXiv: 2012.05049, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.05049>.
- [11] Zheng M H, Tomizuka M. Adaptive frequency-shaped sliding mode control for narrow-band disturbance rejection[C]//2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2016: 834–839. <https://doi.org/10.1109/AIM.2016.7576872>.
- [12] Stuart Z K, El-Laham Y, Bugallo M F. Robust frequency and phase estimation for three-phase power systems using a bank of Kalman filters[J]. *IEEE Signal Process Lett*, 2021, **28**: 1235–1239.
- [13] Tomar S, Sumathi P. Amplitude and frequency estimation of exponentially decaying sinusoids[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2018, **67**(1): 229–237.
- [14] Zhu C, Fan Y, Chen J L. Resonance frequency identification of non-contact integrated permanent magnet vernier motor based on FFT[C]//2022 IEEE 3rd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), 2022: 1–6. <https://doi.org/10.1109/CIYCEE55749.2022.9959058>.
- [15] Serbes A. Fast and efficient sinusoidal frequency estimation by using the DFT coefficients[J]. *IEEE Trans Commun*, 2019, **67**(3): 2333–2342.
- [16] Yang Z D, Huo L S, Wang J K, et al. Denoising low SNR percussion acoustic signal in the marine environment based on the LMS algorithm[J]. *Measurement*, 2022, **202**: 111848.
- [17] Yuan J P, An S, Pan X X, et al. A wave peak frequency tracking method based on two-stage recursive extended least squares identification algorithm[J]. *IEEE Access*, 2021, **9**: 86514–86522.
- [18] Yuan Y, Qing M Y, Liang H Q. Average plain gradient based indirect frequency estimation using adaptive notch filter[C]//2020 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2020: 1–5. <https://doi.org/10.1109/CCECE47787.2020.9255681>.
- [19] Wu W Y, Xiao Y G, Lin J H, et al. An efficient filter bank structure for adaptive notch filtering and applications[J]. *IEEE/ACM Trans. Audio Speech Lang Process*, 2021, **29**: 3226–3241.
- [20] Wu Z Z, Zhang M T, Chen Z Y, et al. Youla parameterized adaptive vibration suppression with adaptive notch filter for unknown multiple narrow band disturbances[J]. *J Vibrat Control*, 2019, **25**(3): 685–694.
- [21] Xu T R, Ruan Y, Zhao Z Q, et al. Error-based observer control of an optic-electro tracking control system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(11): 190713.
徐田荣, 阮勇, 赵志强, 等. 基于误差的观测器在光电跟踪系统中的应用[J]. *光电工程*, 2020, **47**(11): 190713.
- [22] Ruan Y, Xu T R, Liu Y, et al. Error-based observation control of an image-based control loop for disturbance suppression in segmented lightweight large-scaled diffractive telescope (SLDST)[J]. *Opt Lasers Eng*, 2022, **156**: 107105.
- [23] Wang Z H, Zhang W X, Wu Z, et al. Research on the forward predictor of minimum mean square error in laser vibrometer[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(5): 210391.

王之昊, 张文喜, 伍洲, 等. 激光测振仪中最小均方差前向预测器的研究[J]. 光电工程, 2022, 49(5): 210391.

[24] Wang Y L, Yu L J, Zhang H J, et al. Frequency estimation method for power grid based on adaptive notch filter[J]. *Electr*

Meas Instrum, 2018, 55(24): 121-127.

王雅丽, 虞莉娟, 张华军, 等. 基于自适应陷波器的电网频率估计方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(24): 121-127.

作者简介



吴红梅 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为倾斜校正系统的自适应扰动抑制, 视轴稳定。

E-mail: 1420675202@qq.com



【通信作者】唐涛 (1980-), 男, 研究员, 博士, 主要研究工作是光电跟踪控制。

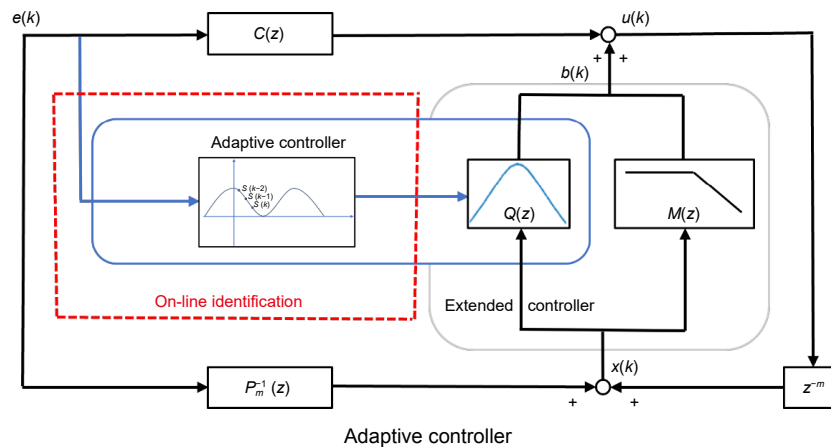
E-mail: taotang@ioe.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Adaptive tip-tilt disturbance suppression technique for characteristic disturbance frequency identification

Wu Hongmei^{1,2,3,4}, Wang Chen⁵, Feng Nian^{1,2,3,4}, Wen Li^{1,2,3,4}, Tang Tao^{1,2,3,4*}



Overview: The tip-tilt correction system is widely used in precision optical systems, such as high-resolution telescopes and free space optical communications, to achieve image stabilization and beam stabilization. In these precision optical systems, the tip-tilt correction system is affected by disturbance during beam stabilization control, which generally have unknown time-varying characteristics. Therefore, fast adaptive suppression of time-varying disturbances is a task of great significance, so plentiful adaptive control algorithms have been proposed which is mainly composed of control structure and parameter identification algorithms. Most adaptive control identification algorithms are based on spectrum analysis, which is a full frequency domain search method and has a large amount of calculation. At present, the time domain identification algorithm based on least mean square error criterion is relatively simple and fast, which provides a guarantee for the rapid adjustment of controller parameters. In addition, adaptive algorithms based on linear quadratic Gaussian (LQG) control or adaptive Kalman filter require accurate modeling and many parameters for adjusting controller, which is complicated and time-consuming. However, the control algorithm based on Youla parameterization does not depend on the accurate model, and can directly adjust the internal model of the controller, which reduces the complexity of the adaptive controller and does not involve the redesign of the controller. Therefore, this paper proposes an adaptive disturbance rejection method combining characteristic disturbance frequency identification and Youla parameterized control. On the basis of the least mean square error criterion, this method uses the closed-loop system error to identify the characteristic disturbance frequency, so that to realize the online adjustment of the adaptive controller. Moreover, the identified filtering parameters and controller adjustment are designed in parallel, thereby reducing the time consumption of adaptive disturbance suppression. At the same time, the frequency segmentation method is applied to combine the low-frequency disturbance and the filter suppression of high-frequency disturbance, so as to realize the adaptive suppression of the disturbance within the closed-loop bandwidth. The experimental results show that the method can quickly identify the characteristic disturbance and adjust the relevant parameters of the controller, and can improve the closed-loop performance of the system under single-frequency time-varying disturbance and multi-frequency disturbance.

Wu H M, Wang C, Feng N, et al. Adaptive tip-tilt disturbance suppression technique for characteristic disturbance frequency identification[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(10): 230177; DOI: 10.12086/oe.2023.230177

Foundation item: Project supported by Sichuan Province Science and Technology Support Program (2021JDJQ0028)

¹National Key Laboratory of Optical Field Manipulation Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ²Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; ⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁵The Military Representative Office of the Military Representative Bureau of the Equipment Department of the Aerospace System Department in Chengdu, Chengdu, Sichuan 610000, China

* E-mail: taotang@ioe.ac.cn