

文章编号 1004-924X(2011)09-2085-07

基于压电偏转系统的卫星平台振动补偿

韩诚山, 李祥之*, 文 明, 赵庆磊, 姜肖楠

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对卫星平台振动严重影响空间光通信跟瞄精度的问题,提出了基于压电偏转控制系统的扰动补偿方案。建立了压电偏转系统的数学模型,设计了基于改进型最小均方根(LMS)滤波算法的自适应控制器,分析了最优步长选择的影响因素。针对输入信号的相位延迟问题,设计了自适应延迟滤波器,不仅有效地补偿了相位延迟,还可通过自适应调节输入信号相位,在不增加步长的前提下提高收敛速率。最后进行了实验验证,结果表明补偿后的残余误差仅为 μrad 量级,补偿因子达 85% 以上,验证了补偿算法的有效性和可行性。

关键词:空间光通信;卫星平台;振动补偿;压电偏转;LMS 滤波

中图分类号:TN929.1;V476.5 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111909.2085

Vibration compensation of satellite platform based on piezo-electric steering system

HAN Cheng-shan, LI Xiang-zhi*, WEN Ming, ZHAO Qing-lei, JIANG Xiao-nan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: lixiangzhi219@163.com

Abstract: A disturbance compensation scheme based on a piezo-electric steering control system was presented, for the vibration of a satellite platform seriously impacted the tracking and pointing accuracy in space optical communication. A mathematical model for the piezo-electric steering system was built. Then, an adaptive controller based on an improved Least Mean Square (LMS) filter was designed, and effect factors on optimal step length choices were analyzed. For the problem of signal phase delay, an adaptive delay filter was designed not only to compensate the phase delay, but also adaptively to adjust the input signal phase to increase its convergence rate without adding the step length. Finally, a verifying experiment was performed. The results show that the remained errors after compensation are μrad magnitude and the compensation factor is over 85%. These results prove that this control scheme is valid and feasible.

Key words: space optical communication; satellite platform; vibration compensation; piezo-electric steering; LMS filtering

收稿日期:2010-12-02;修订日期:2011-02-15.

基金项目:长江学者和创新团队发展计划资助项目(No. IRT0520)

1 引言

在空间光通信过程中,卫星平台的振动会使信号光束传输方向发生抖动,致使投射到探测器上的信号光斑发生偏移,信号探测器探测到的光功率过小或是完全探测不到,从而增大误码率,甚至中断通信^[1-2]。

在实际应用中,抑制光束抖动的最有效方案是利用捕获、跟踪和瞄准(Acquisition, Tracking and Pointing, ATP)系统中的精跟踪环进行补偿,其中最流行的执行机构为压电偏转系统。该系统具有如下优点:能量损耗少、镜面反射率高(可达99%);系统控制信号是电压形式,结构简单;系统偏转范围大(可达 mrad 量级);压电材料稳定性好、使用寿命长、技术成熟^[3]。文献[4]基于压电偏转系统设计了分散式李亚普诺夫自适应控制器对卫星平台振动进行抑制,但没有考虑系统收敛速率和控制回路相位延迟的影响。

本文采用压电偏转系统对卫星平台振动进行补偿,设计了基于改进型最小均方根(Least Mean Squar, LMS)滤波算法的自适应控制器,通过自适应选择步长和引入自适应延迟滤波器提高了系统的收敛速率,该自适应延迟滤波器也解决了控

制回路的相位延迟问题。本文工作对压电偏转系统应用于空间光通信具有重要的意义。

2 压电偏转系统的数学模型

压电偏转系统由执行器件压电偏转镜(Piezo-electric Steering Mirror, PSM, 包括压电驱动器和快速倾斜镜)和光斑位置误差信号测量器件四象限探测器(Quadrant Detector, QD)组成^[5-6]。

压电偏转镜的单轴模型可表示为一个二阶传递函数形式:

$$H_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (1)$$

式中 ω_n 和 ξ 可通过实验确定。

四象限探测器系统模型可用一个一阶传递函数表示:

$$H_d(s) = \frac{1}{Ts + 1}, \quad (2)$$

式中, T 为四象限探测器的时间常数,其值可由选用探测器的标称数据确定。该模型实际相当于一个延迟系统,表示探测器将接收到的光斑位置信号转化为电压输出信号的时间响应延迟。

将压电偏转镜和四象限探测器构成的压电偏转系统表示为状态空间模型形式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{dx} \\ \dot{\theta}_x \\ \ddot{\theta}_x \\ \dot{V}_{dy} \\ \dot{\theta}_y \\ \ddot{\theta}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1/T & 2G_{dx}D_m/T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_x^2 & -2\xi_x\omega_x & 0 & A_x\omega_x^2 & A_x2\xi_x\omega_x \\ -1/T & 2G_{dy}D_m/T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & A_y\omega_y^2 & A_y2\xi_y\omega_y & 0 & -\omega_y^2 & -2\xi_y\omega_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dx} \\ \theta_x \\ \dot{\theta}_x \\ V_{dy} \\ \theta_y \\ \dot{\theta}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ G_{mx}\omega_x^2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & G_{my}\omega_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{mx} \\ V_{my} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{dx} \\ V_{dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dx} \\ \theta_x \\ \dot{\theta}_x \\ V_{dy} \\ \theta_y \\ \dot{\theta}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{mx} \\ V_{my} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: V_{dx} , V_{dy} 分别为四象限探测器 x 轴和 y 轴的输出电压; V_{mx} , V_{my} 分别为压电偏转镜 x 轴和 y 轴的输入电压; G_{dx} , G_{dy} 分别为探测器轴和轴的增益; G_{mx} , G_{my} 分别为偏转镜 x 轴和 y 轴的增益; θ_x , θ_y 分别为偏转镜 x 轴和 y 轴的偏转角; ω_x , ω_y 分别为偏转镜 x 轴和 y 轴的固有频率; ξ_x , ξ_y 分别为偏转镜 x 轴和 y 轴的阻尼比, A_x , A_y 分别为偏转

镜 x 轴和 y 轴的交叉耦合因子, T 为探测器响应时间, D_m 为偏转镜到探测器的距离。

3 基于改进型 LMS 算法的自适应控制器设计

3.1 压电偏转控制系统扰动补偿方案

压电偏转系统扰动补偿方案如图 1 所示。

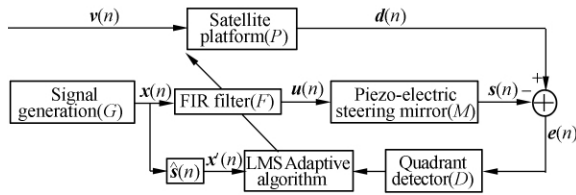


图 1 压电偏转系统扰动补偿方案

Fig. 1 Disturbance compensation scheme of piezo-electric steering system

图中: P, F, M 和 D 分别为卫星平台、FIR 滤波器、压电偏转镜和四象限探测器的增益; $v(n)$ 为卫星平台振动信号; $d(n)$ 为扰动信号; $x(n)$ 为 FIR 滤波器的输入信号; $u(n)$ 为控制信号, 给压电偏转镜提供控制指令; $s(n)$ 为偏转镜的输出信号; $e(n) = d(n) - s(n)$ 为误差信号, 由探测器测得, 反馈给 LMS 滤波算法以自适应调节 FIR 滤波器的权值 $w(n)$ 。为了保证系统的稳定性, 在权值矢量更新算法的回路中添加了一个 $s(n)$ 的估计 $\hat{s}(n)$ 。

图 1 的 LMS 自适应滤波算法^[7-8]中, 权值矢量的更新式为:

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu x'(n)e(n), \quad (5)$$

式中, $x'(n)$ 定义为:

$$x'(n) = \hat{s}(n) * x(n), \quad (6)$$

式中: $\hat{s}(n)$ 为偏转镜回路的脉冲响应函数的估计, $*$ 表示卷积。

3.2 步长选取的影响因素分析

步长 μ 的选取一个影响因素是失调 M_ξ , 失调就是均方误差(MSE)的超调和它最小值的比值。一般使用最速下降法来估计 MSE 的梯度会存在大量的梯度噪声, 与维纳-霍夫解相比, 这个噪声使得 MSE 更大, 所以该算法不能收敛到最优权值 w_{opt} , 造成了 MSE 的超调。 M_ξ 与 μ 成正比, 可表示为:

$$M_\xi = \mu \sum_{k=1}^M \lambda_k, \quad (7)$$

式中: λ_k 为滤波器自相关矩阵 R 的特征值, M 为滤波器的阶数。随着 μ 的增加, 失调和超调都变大。

μ 选取的第二个影响因素是时间常数, 也就是收敛速率。平均时间常数 τ_{mse} 可用下式计算:

$$\tau_{mse} \approx \frac{1}{4\mu\lambda_{av}}. \quad (8)$$

式中, λ_{av} 为矩阵 R 的特征值平均数。

从式(7)和(8)可以看出, 随着 μ 的增加, MSE 的超调增加, 但平均时间常数减少, 提高了收敛速率, 所以对于步长的选取应该折中考虑这两个影响因素。

3.3 自适应延迟滤波器设计

设 $v(n) = A\sin(2\pi fnT_s)$, 所以 $d(n)$ 可表示为 $PA\sin(2\pi fnT_s + \phi_p)$, T_s 为采样时间, f 为频率, ϕ_p 为通过卫星平台的相位延迟。而输入信号 $x(n)$ 可表示为:

$$x(n) = B\sin(2\pi fnT_s + \phi_G), \quad (9)$$

式中, ϕ_G 为信号生成器的相位延迟。

使用 LMS 自适应算法产生的 FIR 滤波器的输出为:

$$u(n) = FB\sin(2\pi fnT_s + \phi_G + \phi_F), \quad (10)$$

式中, ϕ_F 为通过 FIR 的相位延迟。

偏转镜的输出信号 $s(n)$ 可表示为:

$$s(n) = MFB\sin(2\pi fnT_s + \phi_G + \phi_F + \phi_M), \quad (11)$$

式中, ϕ_M 为偏转镜和 DSP 电路的相位延迟。

为了使误差信号 $e(n)$ 达到零, 应满足 $s(n) = d(n)$, 即:

$$\text{幅值应满足 } MFB = PA, \quad (12)$$

$$\text{相位应满足 } \phi_G + \phi_F + \phi_M = \phi_p. \quad (13)$$

LMS 算法可自适应调节 F 和 ϕ_F , 使式(12)、(13)成立, 即可消除扰动信号的影响, 即:

$$\text{幅值应满足 } F = \frac{PA}{MB}, \quad (14)$$

$$\text{相位应满足 } \phi_F = \phi_p - \phi_G - \phi_M. \quad (15)$$

因此, 如果选择适当的 F 和 ϕ_F 值, 算法就可以在最优值附近开始递推, 系统达到稳态值的时间就会减少。

观察式(5)权值矢量更新式, 发现矢量的更新速率与 LMS 算法的两个因素有关: (1) μ 值; (2) $x'(n)$ 和 $e(n)$ 的相关性。

在式(5)中, $x'(n)e(n)$ 为理想 MSE 梯度的粗

略估计,则 $\nabla \xi^2$ 的期望值为:

$$E(\nabla \xi^2) = E(e(n)x'(n)) = \nabla \xi^2. \quad (16)$$

因此, $\nabla \xi^2$ 是一个无偏估计,如果保持 μ 不变,自适应更新只依赖于 $x'(n)$ 和 $e(n)$ 的相关性。当相关性最大时,权值的自适应率最大;当 $x'(n)$ 和 $e(n)$ 不相关时,权值矢量停止更新。根据最速下降法,权值矢量更新应在 MSE 曲面的负梯度方向变化,所以这里可以通过调节 ϕ_G 增加 $x'(n)$ 和 $e(n)$ 的相关性,来提高到达最优权值矢量的收敛速率。这个变化也可通过增大 μ 来实现,但随着 μ 的增加,失调也增大,所以本文采用的方法可在不增加失调的情况下达到快速收敛的目的。

本文引入自适应延迟滤波器(ADF),使用可变延迟单元和可变增益单元来估计时间延迟及卫星平台和偏转镜间的增益差分。带自适应延迟滤波器的扰动补偿方案如图 2 所示。

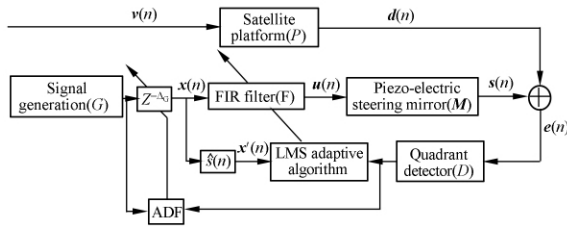


图 2 带 ADF 的扰动补偿方案

Fig. 2 Disturbance compensation scheme with ADF

在带有自适应延迟滤波器的权值矢量更新时,使用一个对称差分来近似表示梯度,这就可以减少梯度估计产生的偏差影响。对于自适应延迟滤波器算法,只有一个输出 Δ_G ,相当于 ϕ_G , Δ_G 的更新式为:

$$\Delta_G(n+1) = \Delta_G(n) + \mu_{\Delta} e(n) \times [x(n - \Delta_G(n) - \Delta_M - 1) - x(n - \Delta(n) - \Delta_M + 1)], \quad (17)$$

式中: μ_{Δ} 为自适应延迟滤波器的自适应率, $e(n)$ 为误差信号, Δ_M 为通过偏转镜和控制电路的延迟。 μ_{Δ} 有如下限制:

$$0 < \mu_{\Delta} < \frac{1}{10P_x}, \quad (18)$$

式中, P_x 为输入信号的功率。

为了补偿偏转镜回路时间延迟造成的影响, ϕ_G 的值需产生一个超前角,自适应延迟滤波器可自适应调节该超前角。

4 实验验证与结果

4.1 实验参数

实验选用的压电偏转系统参数如表 1 所示。

表 1 压电偏转系统参数

Tab. 1 Parameters for piezo-electric steering system

Variable	Value
V_{dx}/V	$-10 \sim +10$
V_{dy}/V	$-10 \sim +10$
V_{mx}/V	$-10 \sim +10$
V_{my}/V	$-10 \sim +10$
$G_{dx}/(V/m)$	1×10^3
$G_{dy}/(V/m)$	1×10^3
$G_{mx}/(\text{rad}/V)$	48×10^{-3}
$G_{my}/(\text{rad}/V)$	48×10^{-3}
θ_x/rad	$-20 \times 10^{-3} \sim +20 \times 10^{-3}$
θ_y/rad	$-20 \times 10^{-3} \sim +20 \times 10^{-3}$
$\omega_x/(\text{rad}/s)$	$5\ 498(875\ \text{Hz})$
$\omega_y/(\text{rad}/s)$	$5\ 027(800\ \text{Hz})$
ζ_x	0.9
ζ_y	0.9
A_x	-2×10^{-2}
A_y	-2×10^{-2}
T/s	65×10^{-6}
D/m	1

卫星平台振动频谱较宽,最大可以达到 kHz 量级,但是由振动模型分析可知,卫星平台振动存在低频高幅度和高频低幅度的特点,对通信性能影响最大的振动信号主要集中在频率 $< 100\ \text{Hz}$ 、振幅 $< 100\ \mu\text{rad}$ 范围内,且振动具有周期性^[9-10]。因此,本文选取频率在 $100\ \text{Hz}$ 、振幅在 $100\ \mu\text{rad}$ 以内的单频正弦信号作为卫星平台振动信号,以讨论自适应控制算法的补偿效果。

振动信号数学模型可表示为:

$$v(n) = A \sin(2\pi f n T_s), \quad (19)$$

式中: A 为卫星平台振动信号幅值, f 为振动信号频率, T_s 为采样时间。

4.2 算法补偿效果评价指标

为了方便分析,定义补偿因子 η 来评价系统对卫星平台振动补偿的效果:

$$\eta = 1 - \omega_{\min} / \omega_{\max}, \quad (20)$$

式中, ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别为补偿前和补偿后的信号平均幅值。由式(20)可知, $\eta = 1$ 时补偿效果最好, $\eta = 0$ 时补偿失败。

4.3 卫星平台振动补偿实验结果与分析

4.3.1 不同振动幅值下的补偿效果

图 3 为几种在典型振动幅值情况下的补偿效果。0.3 s 前为振动信号, 0.3 s 后为振动补偿效果, 振动频率 f 选为 60 Hz。分析显示, 加入自适应控制器后, 对于不同幅值的振动信号均能达到很好的补偿效果, 补偿后的残余误差都控制在 μrad 量级。在相同频率时, 振动信号的幅值越大, 对应的残余误差也越大。

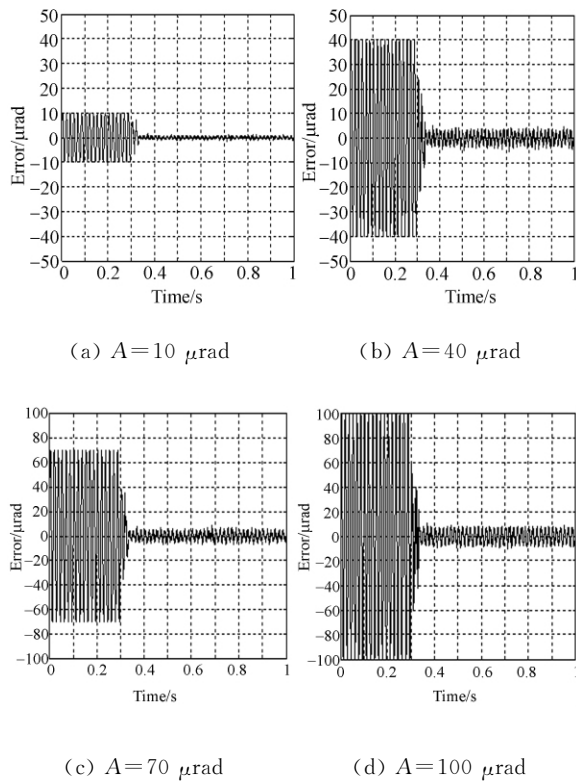


图 3 $f=60$ Hz 时的实验结果

Fig. 3 Experiment results with $f=60$ Hz

补偿因子 η 随幅值 A 的变化曲线如图 4 所示。分析显示, 在振动频率为 60 Hz 时, 对于不同幅值振动信号的补偿因子均在 91% 左右, 证明了本文采用补偿方案的有效性, 同时在频率不变时, 不同幅值的振动补偿因子几乎相同, 说明振动幅值对补偿因子影响不大。

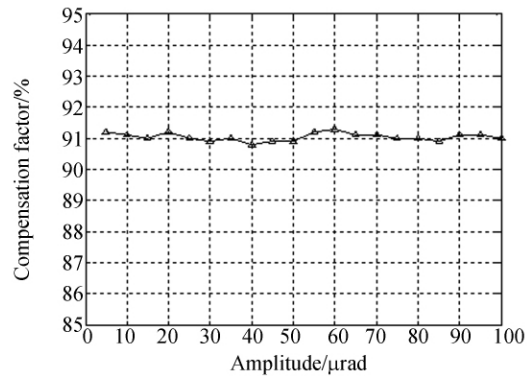


图 4 补偿因子与振幅的关系

Fig. 4 Relationship of compensation factor and amplitude

4.3.2 不同振动频率下的补偿效果

图 5 为几种在典型振动频率情况下的补偿效果。0.3 s 前为振动信号, 0.3 s 后为振动补偿效果, 振动幅值 A 选为 $50 \mu\text{rad}$ 。分析显示, 加入自适应控制器后, 对于不同频率的振动信号均达到了理想的补偿效果, 补偿后的残余误差都控制在 μrad 量级。在相同幅值时, 振动信号的频率越大, 对应的残余误差越大。

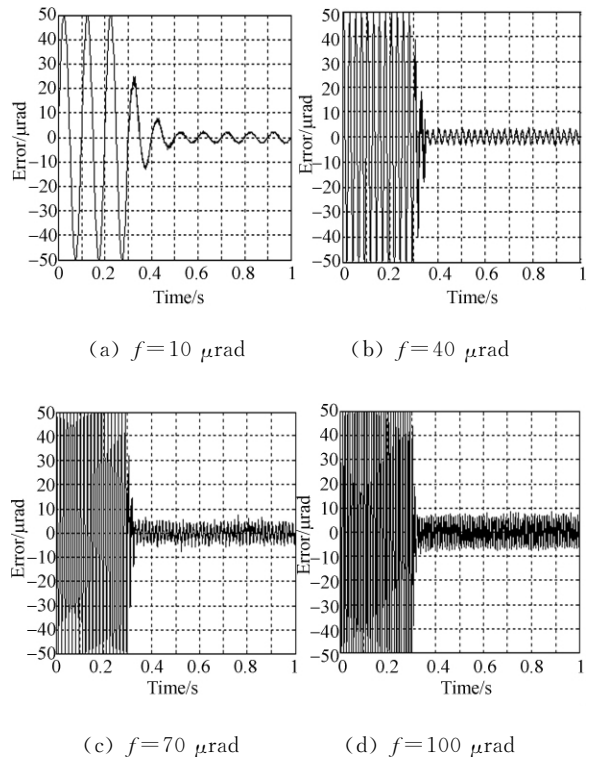


图 5 $A=50 \mu\text{rad}$ 时的实验结果

Fig. 5 Experiment results with $A=50 \mu\text{rad}$

补偿因子 η 随频率 f 的变化曲线如图 6 所示。分析显示, 幅值相同时, 随着振动频率的增

大,补偿因子逐渐变小,在 100 Hz 时,下降到 85%。这个变化趋势是因为当频率增加时,振动信号变化更剧烈,探测器的采样频率不变,使得在单位振动周期内采集到的误差信息量减少,同时执行机构的操作速率不变,对变化更快的扰动抑制能力下降,从而导致系统的振动补偿性能降低,

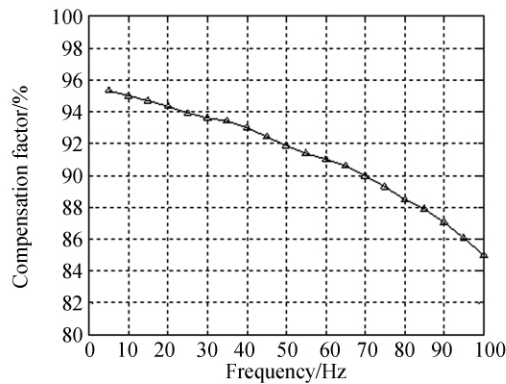


图 6 补偿因子与频率的关系

Fig. 6 Relationship of compensation factor and frequency

参考文献:

- [1] GUWLMAN M, KOGAN A, KAZARIAN A. Acquisition and pointing control for intersatellite laser communication [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(4):1239-1248.
- [2] SKORMIN V A, TASCILLO M A, BUSCH T E. Adaptive jitter rejection technique applicable to airborne laser communication systems [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34:1263-1268.
- [3] KIM B S, GIBSON S, TSA T C. Adaptive control of a tilt mirror for laser beam steering [C]. *Proceeding of the 2004 American Control Conference, Boston*, 2004:3417-3421.
- [4] 李祥之, 孙兆伟, 路菲, 等. 星间光通信中压电偏转系统控制算法研究 [J]. *宇航学报*, 2007, 28(4):941-945.
LI X ZH, SUN ZH W, LU F, *et al.*. Research on the control algorithm of the piezo-electric steering system for optic intersatellite communications [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4):941-945. (in Chinese)
- [5] 林志琦, 李会杰, 郎永辉, 等. 用四象限光电探测器获得光斑参数 [J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(4):764-770.
LIN ZH Q, LI H J, LANG Y H, *et al.*. Obtaining spot parameters by quadrant photodetectors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4):764-770. (in Chinese)
- [6] 赵馨, 佟首峰, 姜会林. 四象限探测器的特性测试 [J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(10):2164-2170.
ZHAO X, TONG SH F, JIANG H L. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2164-2170. (in Chinese)
- [7] WATKINS R J, AGRAWAL B N. Use of least means squares filter in control of optical beam jitter [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2007, 30(4):1116-1122.
- [8] 李英, 葛文奇, 王绍彬. 稳定平台的自适应逆控制 [J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(11):2744-2749.
LI Y, GE W Q, WANG SH B. Adaptive inverse control of stable platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2744-2749. (in Chinese)
- [9] 耿文豹, 翟林培, 丁亚林. 振动对光学成像系统传

因此,探测器和执行机构的带宽也会对振动的补偿带来很大影响,所以在实际应用中,选用高性能的器件会获得更好的补偿效果。

5 结 论

本文采用压电偏转控制系统来补偿卫星平台产生的扰动。针对该系统的特点设计了基于改进型 LMS 滤波算法的自适应控制器,分析了最优步长选取的影响因素,结合设计的自适应延迟滤波器解决了传统算法收敛速度慢的问题,同时利用自适应延迟滤波器补偿了控制回路的相位延迟。实验结果表明,补偿后的扰动误差降低到 μrad 量级,补偿因子达到 85% 以上,满足空间光通信要求。对补偿效果分析可知,补偿因子随振动信号频率的增大而下降,与振动信号幅值几乎无关。本文为空间光通信卫星平台振动补偿提供了一种可行性方案。

递函数影响的分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2):314-320.

GENG W B, ZHAI L P, DING Y L. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):314-320. (in Chinese)

[10] 马晶, 韩琦琦, 于思源, 等. 卫星平台振动对星间

激光链路的影响和解决方案[J]. 激光技术, 2005, 29(3):228-232

MA J, HAN Q Q, YU S Y, *et al.*. The effect of vibration on intersatellite optical communication and the resolving project[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3):228-232. (in Chinese)

作者简介:



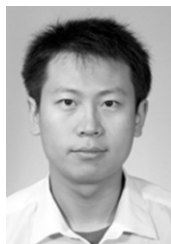
韩诚山(1972—),男,辽宁盖县人,博士,研究员,硕士生导师,1993年于吉林工业大学获得学士学位,1998年、2004年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位,现为中科院长春光学精密机械与物理研究所空间二部副主任,主要从事空间相机自动控制技术的研究。E-mail: xuan_han@yahoo.com.cn



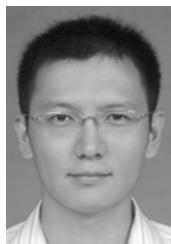
李祥之(1982—),男,黑龙江大庆人,博士,助理研究员,2004年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2006年、2010年于哈尔滨工业大学分别获硕士、博士学位,主要从事空间光通信扰动补偿技术的研究。E-mail: lixiangzhi219@163.com



文 明(1980—),男,河北承德人,硕士,助理研究员,2004年于中南大学获得学士学位,2007年于东北大学获得硕士学位,主要研究方向为空间光学控制理论及应用。E-mail: wenm602@hotmail.com



赵庆磊(1982—),男,黑龙江大庆人,研究实习员,2005年于天津大学获得学士学位,2010年于中国科技大学获得硕士学位,主要从事空间相机主控系统的研究。E-mail: coldsun@sina.com



姜肖楠(1981—),男,吉林吉林人,博士,助理研究员,2004年、2006年、2010年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事空间相机主控系统的研究。E-mail: jxnhit@gmail.com