

# 基于液晶偏转系统的卫星平台振动补偿方法研究

李祥之<sup>1,2</sup>, 韩诚山<sup>1</sup>, 文 明<sup>1</sup>, 姜肖楠<sup>1</sup>, 赵庆磊<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 哈尔滨工业大学卫星技术研究所, 哈尔滨 150001)

**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, 提出了基于液晶偏转控制系统的扰动补偿方案。建立了液晶偏转控制系统的数学模型, 为了提高收敛速度, 设计了基于后验估计误差 RLS 格型滤波算法的自适应控制器。引入了变阶算法, 不但实现了快速、高精度的扰动补偿, 而且在没有增加计算量的情况下, 消除了高阶 RLS 自适应算法中大的暂态响应, 改善了控制系统性能。实验结果表明补偿后的扰动残差在  $10^{-6}$  rad 量级, 验证了该控制方案的有效性和可行性。

**关键词:** 空间光通信; 卫星平台振动补偿; 液晶偏转; 变阶 RLS

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2011)10-2266-07

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.10.027

## Research on Satellite Platform Vibration Compensation Method Base on Liquid Crystal Steering System

LI Xiang-zhi<sup>1,2</sup>, HAN Cheng-shan<sup>1</sup>, WEN Ming<sup>1</sup>, JIANG Xiao-nan<sup>1</sup>, ZHAO Qing-lei<sup>1</sup>

(1. Chang Chun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The disturbance compensation scheme based on liquid crystal steering control system is presented because the satellite platform vibration seriously impacts the tracking and pointing accuracy. The mathematical model of liquid crystal steering system is built. For improving convergence speed, the adaptive controller based on the posteriori estimation error's RLS lattice filter algorithm is designed, and the variable-order algorithm is introduced, which not only achieves fast adaptive adjustment and optimal steady-state disturbance compensation, but also removes the great transient response of high order RLS algorithm and improves the system performance in the case of not adding amount of calculation. Finally, the experiment results show that residual errors after having been compensated are  $\mu$  rad magnitude and this control scheme is valid and feasible.

**Key words:** Space optical communication; Satellite platform vibration compensation; Liquid crystal steering; Variable-order RLS

### 0 引 言

在空间光通信过程中, 稳定的通信链路要求系统的跟瞄精度在  $10^{-6}$  rad 量级, 而且光束的束散角小、通信距离长、发射功率小, 因此捕获、跟踪和瞄准 (Acquisition, Tracking and Pointing, ATP) 的控制问

题变得至关重要<sup>[1]</sup>。在影响空间光通信链路跟瞄精度的众多因素中, 卫星平台振动一直以来都是降低光通信链路可靠性的一个重要原因, 它不仅使捕获、跟踪过程难度增加, 而且会使通信的误码率升高, 严重时甚至使通信中断。所以, 卫星平台振动补偿是建立可靠的卫星光通信链路的前提条件<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2010-11-17; 修回日期: 2011-03-27

基金项目: 创新团队发展计划(IRT0520)

在实际应用中,最有效的抑制方案是利用 ATP 系统中的精跟踪环进行补偿,而其中执行机构的选取和对应的控制器的设计是扰动补偿效果的决定性因素。传统的压电偏转控制系统存在操作过程中会引入机械振动、两轴之间存在耦合作用、驱动电压大、能耗多、系统动力学复杂等缺点<sup>[3]</sup>,而液晶偏转控制系统具有与卫星平台无相互作用力、通道间解耦、体积小、质量轻、功耗少、成本低、易于加工装配等优点,是一种新型、高效的非机械偏转控制系统<sup>[4]</sup>。

本文针对液晶偏转控制系统,设计了基于后验估计误差 RLS 格型滤波算法的自适应控制器,引入

了变阶算法,不但实现了快速自适应调节,而且达到了最优稳态扰动补偿,同时在没有增加计算量的条件下,消除了高定阶 RLS 自适应算法中大的暂态响应,最后进行了实验验证。本文工作对液晶偏转控制系统应用于空间光通信具有重要的意义。

### 1 液晶偏转控制系统的动力学模型

液晶偏转控制系统可以对光束方位轴和俯仰轴进行偏转控制,所以为二维偏转控制系统<sup>[5]</sup>,带 LTI (Linear Time Invariant) 反馈控制环的液晶偏转控制系统方框图如图 1 所示。

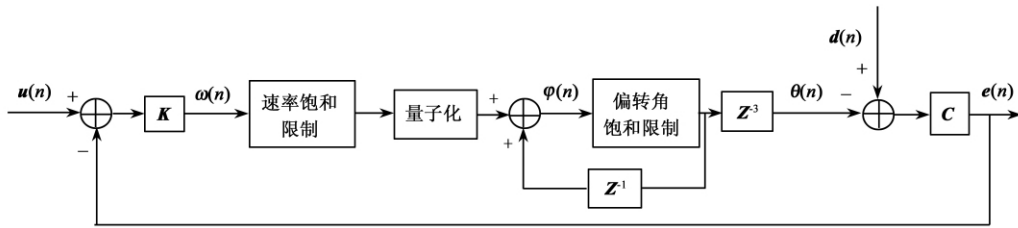


图 1 带 LTI 反馈控制环的液晶偏转控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of liquid crystal steering control system with LTI feedback control loop

图 1 中: 输入信号  $u(n)$  为本文设计的变阶自适应 RLS 格型滤波器输出的控制指令矢量;  $\omega(n)$  为速率限制模块的输入指令矢量;  $\varphi(n)$  为偏转角饱和和限制的输入指令矢量;  $\theta(n)$  为液晶偏转器输出的偏转角矢量;  $d(n)$  为外加扰动信号矢量;  $e(n)$  为四象限探测器输出的位置偏差矢量;  $K$  为 LTI 反馈控制回路的增益矩阵;  $C$  为四象限探测器<sup>[6-7]</sup> 转换矩阵;  $Z^{-1}$  模块为液晶偏转器对速率信号求积分转换为偏转角模型;  $Z^{-3}$  模块为液晶分子对光束作用和电子信号处理器的时间延迟模型。

量子化模块将输入的信号按四舍五入法则变换为整数值,所以  $\varphi$  和  $\theta$  中的各项都为整数值,每变化一个整数值表示变化  $10^{-7}$  rad 的偏转角。

由于液晶分子对光束有速率和角度的限制,设液晶偏转器使光束偏转的最大角速率为  $\omega_m$ ,最大偏转角为  $\varphi_m$ ,所以引入的速率饱和和限制和偏转角饱和限制模块可表示如下:

$$\omega = \begin{cases} \omega & |\omega| \leq \omega_m \\ \omega_m & \omega > \omega_m \\ -\omega_m & \omega < -\omega_m \end{cases} \quad (1)$$

$$\varphi = \begin{cases} \varphi & |\varphi| \leq \varphi_m \\ \varphi_m & \varphi > \varphi_m \\ -\varphi_m & \varphi < -\varphi_m \end{cases} \quad (2)$$

设  $G$  为自适应控制信号  $u(n)$  到四象限探测器输出的位置偏差信号  $e(n)$  的传递函数,通过实验测得液晶偏转控制系统各方向上的耦合影响可忽略不计,即方位轴和俯仰轴之间相互解耦,所以  $G$  可表示为一个对角矩阵:

$$G = \begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $G_1$  和  $G_2$  分别为方位轴和俯仰轴的传递函数,由于速率饱和限制、偏转饱和限制和量子化的影响,每个轴的传递函数都是非线性的,设为  $G_{NL}$ ,当偏转控制系统工作在饱和和限制范围内并且量子化取的间隔足够小时,它们的影响可忽略不计,此时该系统可看作线性系统,传递函数可设为  $G_L$ ,如图 1 所示  $G_L$  可表示为:

$$G_L = CK[Z^3 - Z^2 + CK]^{-1} \quad (4)$$

$K$  表示 LTI 反馈控制回路的增益矩阵  $K$  的作用是保证高频扰动幅值最小的情况下,偏差补偿带宽尽可能得大。由于增大  $K$  值可增大偏差补偿带宽,

但同时也增加了高频扰动信号和探测器噪声,所以  $K$  的选取要对上述两种情况折中考虑。由于液晶偏转控制系统的方位轴和俯仰轴可认为是解耦的,所以对两个轴可分别进行控制,所以  $K$  可表示如下:

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $K_1$  和  $K_2$  分别为方位轴和俯仰轴的增益。

$C$  表示误差偏转角到四象限探测器的位置偏差信号的转换矩阵。将图 1 中的液晶偏转装置的输入信号  $\omega(n)$  取作白噪声序列,同时使用开环系统(即去掉闭环回路  $K$ )通过使实验输出信号与实验结果偏差信号的方差最小,可确定转换矩阵  $C$  可表示为:

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $C_1$  和  $C_2$  分别为方位轴和俯仰轴的转换矩阵。

## 2 基于变阶 RLS 格型滤波算法的自适应控制器设计

### 2.1 液晶偏转控制系统扰动补偿方案

液晶偏转控制系统扰动补偿方案如图 2 所示。

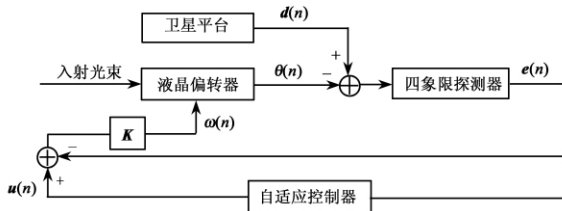


图 2 液晶偏转控制系统扰动补偿方案

Fig. 2 Disturbance compensation scheme of liquid crystal steering control system

图 2 中:  $d(n)$  为卫星平台扰动信号,当光束入射时,通过液晶偏转器会在四象限探测器上形成光斑,由于扰动信号的影响,光斑位置会产生偏差  $e(n)$ ,通过 LTI 控制回路和自适应控制回路反馈给液晶偏转器,  $u(n)$ 、 $\omega(n)$  分别为自适应控制器的输出指令信号和液晶偏转器的输入信号。

### 2.2 基于 RLS 格型滤波算法的自适应控制器设计

由于液晶偏转控制系统的方位轴和俯仰轴是解耦的,可单独对一个轴进行控制。为了方便,下面仅对单轴进行分析。

基于 RLS 格型滤波器的自适应控制器原理框图如图 3 所示。

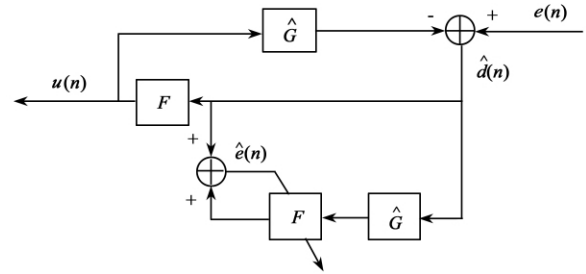


图 3 基于 RLS 格型滤波器的自适应控制器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of adaptive controller based on RLS lattice filter

图 3 中:  $\hat{d}(n)$  为图 2 中的扰动信号  $d(n)$  的估计;  $\hat{e}(n)$  为  $e(n)$  基于最小二乘准则的估计;  $\hat{G}$  为系统传递函数  $G$  的估计;  $F$  为自适应 RLS 格型滤波器的传递函数。

在图 3 的自适应控制器中使用了两个 RLS 格型滤波器。右下的  $F$  以  $\hat{G} \hat{d}(n)$  代替  $\hat{d}(n)$  作为输入信号,通过自适应更新权值系数使得偏差信号  $\hat{e}(n)$  的 RMS 值达到最小。左上的  $F$  使用  $\hat{d}(n)$  作为输入信号来产生控制指令  $u(n)$ 。

自适应 RLS 格型滤波器通过跟踪扰动信号和辨识系统增益使输出偏差信号  $e(n)$  的 RMS 值达到最小,由图 3 可知,基于最小二乘准则的  $e(n)$  的估计  $\hat{e}(n)$  可表示为:

$$\hat{e}(n) = \hat{d}(n) + F \hat{G} \hat{d}(n) \quad (7)$$

由于对单通道分析,  $\hat{G}$  为单输入单输出的,可认为是标量,所以式(7)的右侧可表示为:

$$\hat{d}(n) + F \hat{G} \hat{d}(n) = \hat{d}(n) + \hat{G} F \hat{d}(n) \quad (8)$$

因此,只要自适应 RLS 格型滤波器对系统传函和扰动信号估计足够精确,即  $\hat{G} = G$ ,  $\hat{d} = d$ ,可得:

$$\begin{aligned} \hat{e} &= \hat{d}(n) + \hat{G} F \hat{d}(n) = d(n) + G F d(n) \\ &= d(n) + G u(n) = e(n) \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)带入式(7)整理得:

$$\hat{d}(n) = e(n) - \hat{G} u(n) \quad (10)$$

因为系统传函一般提前通过一次辨识即可得到,但由于卫星平台的振动随时间不断变化,所以扰动信号需要实时辨识,即在本文中,认为  $\hat{G}$  为已知,扰动信号为未知。而且由  $\hat{G}$  采用非线性模型  $G_{NL}$

要比线性模型  $G_L$  具有更好的鲁棒性和稳定性。

图 2 中的自适应控制器核心是 RLS 格型滤波器。本文设计的是采用后验估计误差的 RLS 格型滤波算法<sup>[8]</sup>, 算法中所用的估计误差包括后验前向预测误差  $f_m(n)$ 、后验后向预测误差  $b_m(n)$  以及后验联合过程估计误差  $e_m(n)$ , 其中:  $m = 0, 1, 2, \dots, M$ , 信号流程图如图 4 所示。

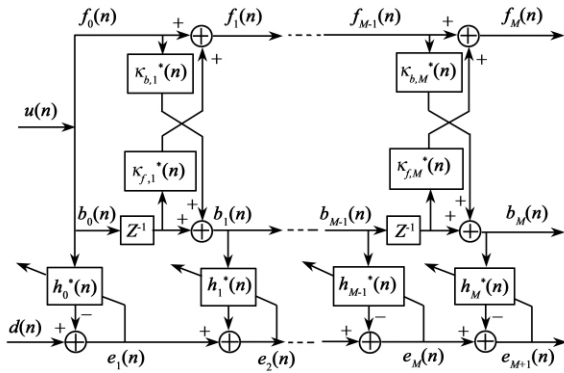


图 4 采用后验估计误差的 RLS 格型滤波算法流程图

Fig. 4 Flow chart of posterior estimate error RLS lattice filter

采用后验估计误差的 RLS 格型滤波算法步骤如下所示:

(1) 预测

对  $n = 1, 2, \dots$ , 计算  $m = 1, 2, \dots, M$  时的各阶更新(其中  $M$  为 RLS 格型滤波器的最大阶数):

$$\Delta_{m-1}(n) = \lambda \Delta_{m-1}(n-1) + \frac{b_{m-1}(n-1)f_{m-1}^*(n)}{\gamma_{m-1}(n-1)} \quad (11)$$

$$B_{m-1}(n-1) = \lambda B_{m-1}(n-2) + \frac{|b_{m-1}(n-1)|^2}{\gamma_{m-1}(n-1)} \quad (12)$$

$$F_{m-1}(n) = \lambda F_{m-1}(n-1) + \frac{|f_{m-1}(n)|^2}{\gamma_{m-1}(n-1)} \quad (13)$$

$$\kappa_{f,m}(n) = -\frac{\Delta_{m-1}(n)}{B_{m-1}(n-1)} \quad (14)$$

$$\kappa_{b,m}(n) = -\frac{\Delta_{m-1}^*(n)}{F_{m-1}(n)} \quad (15)$$

$$f_m(n) = f_{m-1}(n) + \kappa_{f,m}^*(n) b_{m-1}(n-1) \quad (16)$$

$$b_m(n) = b_{m-1}(n-1) + \kappa_{b,m}^*(n) f_{m-1}(n) \quad (17)$$

$$\gamma_m(n-1) = \gamma_{m-1}(n-1) - \frac{|b_{m-1}(n-1)|^2}{B_{m-1}(n-1)} \quad (18)$$

(2) 滤波

对  $n = 1, 2, \dots$ , 计算  $m = 1, 2, \dots, M+1$  时各阶的更新:

$$\pi_{m-1}(n) = \lambda \pi_{m-1}(n-1) + \frac{b_{m-1}(n) e_{m-1}^*(n)}{\gamma_{m-1}(n)} \quad (19)$$

$$h_{m-1}(n) = \frac{\pi_{m-1}(n)}{B_{m-1}(n)} \quad (20)$$

$$e_m(n) = e_{m-1}(n) - h_{m-1}^*(n) b_{m-1}(n) \quad (21)$$

2.3 变阶算法

自适应滤波器的最优阶数可定义为当滤波器的稳态均方误差达到最小或十分接近最小时对应滤波器的最小阶数。所以格型滤波器的最优阶数可表示为:

$$\min\{M_0 \mid \xi_M - \xi_{M+1} \leq \varepsilon, \forall M \geq M_0\} \quad (22)$$

式中:  $\xi_M$  为阶数为  $M$  时的稳态均方误差;  $M$  和  $M_0$  为正整数;  $\varepsilon$  为很小的正数。滤波器的最优阶数与阈值  $\varepsilon$  有关,  $\varepsilon$  的不同取值可能会产生不同的最优阶数, 而  $\varepsilon$  一般根据实际需求的稳态均方误差确定。

搜索最优阶数的代价函数为:

$$\min\{M \mid \xi_{M+\Delta}^{(M)} - \xi_{M+\Delta}^{(M+\Delta)} \leq \varepsilon\} \quad (23)$$

式中: 稳态分段均方误差  $\xi_{M+\Delta}^{(M)} = E[|e_{M+\Delta}^{(M)}|^2] e_{M+\Delta}^{(M)}$  为分段估计误差。

定义  $[n-T+1, n]$  时间段内阶数为  $M+\Delta$  的滤波器为长滤波器, 前  $M$  个阶数构成的分段滤波器为短滤波器。根据上式中搜索最优阶数的代价函数, 采用两个滤波器的平均平方误差  $\tilde{\xi}_{M+\Delta}^{(M+\Delta)}(n, T)$  和  $\tilde{\xi}_{M+\Delta}^{(M)}(n, T)$  来估计稳态均方误差  $\xi_{M+\Delta}^{(M+\Delta)}$  和  $\xi_{M+\Delta}^{(M)}$ 。如此计算在滤波器权值未收敛时也可以同时更新阶数和权值, 提高了收敛速度。比较长滤波器和较短滤波器的均方误差, 就可以得到变阶算法的阶数更新公式:

$$M(n+1) = \begin{cases} M(n) + \delta(n), & 10 \lg \left( \frac{\tilde{\xi}_{M(n)+\Delta}^{(M(n))}(n, T)}{\tilde{\xi}_{M(n)+\Delta}^{(M(n)+\Delta)}(n, T)} \right) \geq \varepsilon_1 \\ M(n) - \delta(n), & 10 \lg \left( \frac{\tilde{\xi}_{M(n)+\Delta}^{(M(n))}(n, T)}{\tilde{\xi}_{M(n)+\Delta}^{(M(n)+\Delta)}(n, T)} \right) \leq \varepsilon_2 \\ M(n), & \text{其它} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $M(n)$  为  $n$  时刻的滤波器阶数; 正整数  $\delta(n) \leq \Delta$ ;  $0 \leq \varepsilon_2 \leq \varepsilon_1$ , 它们决定了阶数增加或减少的误差阈值大小;  $T$  为更新周期;  $\tilde{\xi}_{M(n)+\Delta}^{(M(n))}(n, T) =$

$$\frac{1}{T} \sum_{i=n-T+1}^n |e_{M+\Delta}^{(M)}(i)|^2.$$

$\delta(n)$  的自适应更新机理如下:当滤波器阶数变化方向连续  $k_1$  次与前次变化方向相同时,则表明滤波器阶数尚未达到最佳,此时应增大  $\delta(n)$  以提高阶数的收敛速度;当滤波器阶数变化方向连续  $k_2$  次与前次变化方向相反时,则表明阶数可能已在最优值附近振荡,此时应减小  $\delta(n)$  以提高滤波器阶数的收敛精度<sup>[9]</sup>。

阶数步长  $\delta(n)$  的自适应更新公式如下:

$$\delta(n+1) = \begin{cases} \min(\Delta \delta(n) + 1), & \text{case 1} \\ \max(1 \delta(n) - 1), & \text{case 2} \\ \delta(n), & \text{其它} \end{cases} \quad (25)$$

式中: case 1 为滤波器阶数变化方向连续  $k_1$  次与前次变化方向相同; case 2 为滤波器阶数变化方向连续  $k_2$  次与前次变化方向相反。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验条件

液晶偏转器使光束偏转的最大偏转角  $\theta = 1.5 \times 10^{-4} \text{ rad}$ ,最大角速率  $\omega_m = 1.2 \times 10^{-2} \text{ rad K} = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} \mathcal{C} = \begin{bmatrix} 0.015 & 0 \\ 0 & 0.018 \end{bmatrix}$ 。

卫星平台振动的频谱特性取决于卫星空间环境的物理性质和其进行的特定操作。主要振动源分为两种:卫星刚体运动引起的低频振动及卫星的运载舱和有效载荷的操作引起的中频到高频的振动<sup>[10]</sup>。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和高频低幅的特点,对通信性能影响最大的振动信号主要集中在频率小于 100Hz、振幅小于  $10^{-4} \text{ rad}$  范围内,且振动具有周期性,因此本文选取频率 100Hz、振幅在  $10^{-4} \text{ rad}$  以内的单频正弦信号作为振动信号,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:

$$d(n) = A \sin(2\pi f T n) \quad (26)$$

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

#### 3.2 算法补偿效果评价指标

为了方便分析,定义振动补偿因子  $\eta$  来评价系

统对卫星平台振动补偿的效果:

$$\eta = 1 - \omega_{\min} / \omega_{\max} \quad (27)$$

式中:  $\omega_{\max}$  和  $\omega_{\min}$  分别为补偿前和补偿后的信号平均幅值。由式(27)可知  $\eta = 1$  时补偿效果最好,  $\eta = 0$  时补偿失败。

### 3.3 卫星平台振动补偿结果与分析

#### 3.3.1 不同振动幅值下的补偿效果

图 5 为几种在典型振动幅值情况下的补偿效果。0.3s 前为振动信号,0.3s 后为振动补偿效果,振动频率  $f$  选为 60Hz。

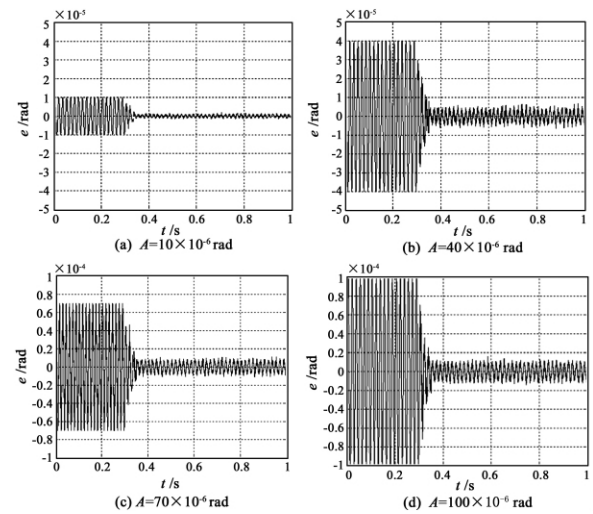


图 5  $f = 60\text{Hz}$  时的实验结果

Fig. 5 Experiment results when  $f = 60\text{Hz}$

实验结果分析:如图 5 所示,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  $10^{-6} \text{ rad}$  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。

补偿因子  $\eta$  随幅值  $A$  的变化曲线如图 6 所示。

实验结果分析:如图 6 所示,在振动频率为 60Hz 时,对于不同幅值振动信号的补偿因子均在 87% 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。

#### 3.3.2 不同振动频率下的补偿效果

图 7 为几种在典型振动频率情况下的补偿效果。0.3s 前为振动信号,0.3s 后为振动补偿效果,振动幅值  $A$  选为  $50 \times 10^{-6} \text{ rad}$ 。

实验结果分析:如图 7 所示,加入自适应控制器

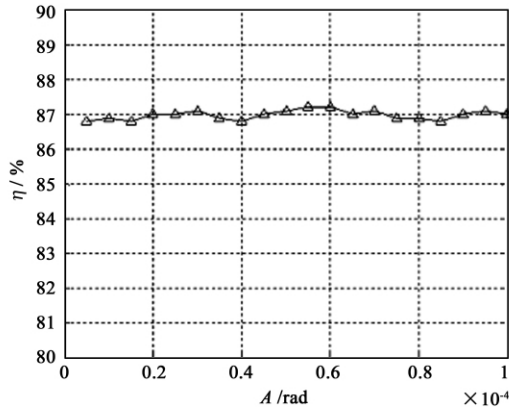


图 6 补偿因子与振幅的关系

Fig. 6 Relationship of compensation efficient and amplitude

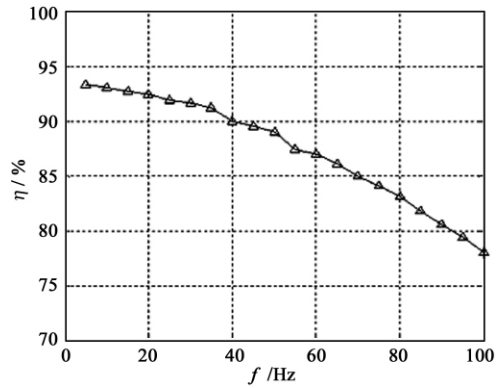


图 8 补偿因子与频率的关系

Fig. 8 Relationship of e compensation efficient and frequency

件会获得更好的补偿效果。

### 4 结 论

本文采用液晶偏转控制系统来补偿卫星平台产生的扰动。针对该系统动力学简单、通道间无解耦的特点设计了基于后验估计误差 RLS 格型滤波算法的自适应控制器,引入变阶算法,不但实现了快速收敛,而且达到最优稳态扰动补偿,同时在没有增加计算量的条件下消除了高定阶 RLS 滤波算法中大的暂态响应。实验结果表明补偿后的扰动误差降低到  $10^{-6}$  rad 量级,满足空间光通信要求,同时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。

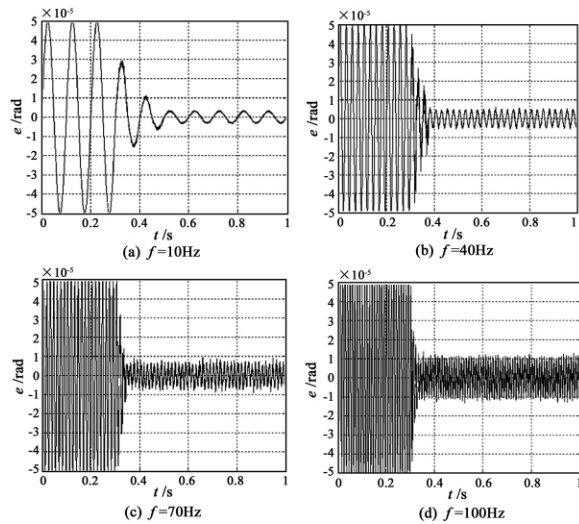


图 7  $A = 50 \times 10^{-6}$  rad 时的实验结果

Fig. 7 Experiment results when  $A = 50 \times 10^{-6}$  rad

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  $10^{-6}$  rad 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。

补偿因子  $\eta$  随频率  $f$  的变化曲线如图 8 所示。

实验结果分析:如图 8 所示,在相同的幅值时,随着振动频率的增大,补偿因子逐渐变小,在 100Hz 时,下降到 78%。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,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

### 参 考 文 献

[ 1 ] Guelman 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 ] 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 Ying, Ge Wenqi, Wang Shao-bin. Adaptive inverse control of stable platform [ J ]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17( 11 ): 2744 - 2749. ]

[ 3 ] 李祥之,孙兆伟,路菲. 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 Xiangzhi, Sun Zhao-wei, Lu Fei. Research on the control algorithm of the piezo-electric steering system for optic intersatellite communications [ J ]. Journal of Astronautics, 2007, 28( 4 ): 941 - 945. ]

- [ 4 ] Hallstig E , Sjoqvist L , Lindgren M. Characterization of a liquid crystal spatial light modulator for beam steering [J]. Proceedings of SPIE , 2002 , 4632: 187 – 196.
- [ 5 ] Stockley J , Serati S , Xun X D. Liquid crystal spatial light modulator for multispot beam steering [J]. Proceedings of SPIE , 2004 , 5160: 208 – 215.
- [ 6 ] 林志琦 , 李会杰 , 郎永辉. 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 Zhi-qi , Li Hui-jie , Lang Yong-hui. Obtaining spot parameters by quadrant photodetectors [J]. Optics and Precision Engineering , 2009 , 17( 4) : 764 – 770. ]
- [ 7 ] 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 Xin , Tong Shou-feng , Jiang Hui-lin. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector [J]. Optics and Precision Engineering , 2010 , 18( 10) : 1264 – 2170. ]
- [ 8 ] Haykin S. Adaptive filter theory , 4th Edition [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry , 2002: 440 – 468.
- [ 9 ] 林川 , 冯全源. 应用于自适应格型 RLS 滤波器的变阶数算法 [J]. 信号处理 , 2010 , 26( 2) : 298 – 302. [Lin Chuan , Feng Quan-yuan. Variable order algorithm for adaptive lattice RLS filter [J]. Signal Processing , 2010 , 26( 2) : 298 – 302. ]
- [ 10 ] 耿文豹 , 翟林培 , 丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析 [J]. 光学精密工程 , 2009 , 17( 2) : 314 – 320. [Geng Wen-bao , Zhai Lin-pei , Ding Ya-lin. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system [J]. Optics and Precision Engineering , 2009 , 17( 2) : 314 – 320. ]

作者简介: 李祥之( 1982 - ) ,男 ,博士 ,主要从事星间光通信扰动补偿技术研究。

通信地址: 吉林省长春市经开区东南湖大路 3888 号中科院长春光机所空间二部( 130033)

电话: 18743018468

E-mail: lixiangzhi219@ 163. com

( 编辑: 曹亚君)