

文章编号 1004-924X(2015)05-1394-07

空间光通信精跟踪系统的模糊自抗扰控制

崔 宁^{1*}, 陈兴林¹, 曹开锐^{1,2}, 于志亮¹, 徐川川¹

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨, 150001;

2. 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对输入光束抖动及卫星本体微振动对空间光通信系统跟踪精度的影响,设计了模糊自抗扰控制器,提出了对精跟踪系统进行控制的方法。首先,建立了精跟踪系统模型,对系统内外扰动进行分析,并模拟了卫星振动信号。针对系统自身所受的扰动及输入光信号的不确定性,设计了模糊自抗扰控制器。提出的控制方法通过扩张状态观测器观测卫星本体振动及系统未建模动态,应用微分跟踪器提高系统动态响应性能,并用模糊控制原理改进了非线性状态误差反馈控制律,使其可以自适应调整比例和微分增益。最后进行了实验分析,结果表明:与 PID 控制方法相比,模糊自抗扰控制方法在不同频率及幅值的输入信号下均能提高系统跟踪精度,跟踪精度可以达到 $\pm 8 \mu\text{rad}$,跟踪误差减小了 50%左右。该方法基本满足空间光通信精跟踪系统对跟踪速度、跟踪精度及抗干扰能力的要求。

关键词:空间光通信;精跟踪;模糊自抗扰;卫星振动

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1394

Fuzzy active disturbance rejection control of fine tracking system for free space optical communication

CUI Ning^{1*}, CHEN Xing-lin¹, CAO Kai-rui^{1,2}, YU Zhi-liang¹, XU Chuan-chuan¹

(1. School of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: cuining_720@126.com

Abstract: In consideration of the effects of input beam jitter and satellite micro vibration on the tracking precision of a space optical communication system, a fuzzy active disturbance rejection controller is designed and a control method for the fine tracking system in optical communication is proposed. Firstly, a fine tracking system model is established, the internal and external disturbances of the system are analyzed and the satellite vibration signals are simulated. Then, focused on the uncertainties of system disturbance and input optical signals, the fuzzy active disturbance rejection controller is designed. The proposed method observes satellite vibration and unmodelled dynamics of the system by an extended state observer and uses a differential tracker to improve the dynamic response performance of the system. Then it utilizes fuzzy control theory to improve the nonlinear state error control law, by which the system can adjust adaptively proportion and differential gains.

收稿日期:2014-08-20;修订日期:2014-10-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10904026)

Finally, the experiments analysis are performed and compared with PID control method. It shows that the fuzzy active disturbance rejection control method improves the system tracking accuracy under the input signals with different frequencies and amplitudes, the tracking accuracy has reached to $\pm 8 \mu\text{rad}$, and the tracking error reduces about 50 percent. This method basically meets the requirements of tracking systems of optical communication for tracking speeds, tracking accuracy and antijamming capability.

Key words: free space optical communication; fine tracking; fuzzy active disturbance rejection; vibration of satellite platform

1 引言

空间光通信的光束束散角小,传输距离长,另外还受空间环境及卫星本体振动的影响,故其捕获、瞄准和跟踪(Acquisition, Pointing and Tracking, APT)过程都很困难^[1-2]。目前,国内外主要采用粗、精跟踪系统耦合的嵌套技术来实现光通信的精密跟踪。其中:粗跟踪系统主要完成大范围运动,其带宽低,跟踪精度有限;而精跟踪系统则用于补偿粗跟踪系统的跟踪残差,具有高带宽和高精度,故其是 APT 系统中的关键,也是高速率通信的保障。

精跟踪系统的内外扰动是影响其跟踪性能的主要因素,故抑制扰动算法的精度会直接影响系统的跟踪速度及精度。近年来,国内对精跟踪系统的研究已取得一些成果^[3-4]。文献[5]通过对精跟踪系统的传递函数进行参数辨识,对系统带宽进行了全频段优化设计,使系统带宽达到 300 Hz 以上。文献[6]提出了误差自适应前馈复合控制方法,在不增加系统复杂性的同时提高了系统抑制光束抖动的能力。文献[7]提出了模型参考算法,该方法通过对快速反射镜建立精确的数学模型,使系统输出能够很好地跟踪参考模型。以上方法都得到了较好的实验及仿真结果,但它们都是依靠被控对象的精确模型或模型的在线辨识来提高带宽及跟踪性能的。为了改善上述方法的性能,韩京清提出自抗扰控制技术^[8-9],这是一种不依赖系统模型的控制方法。它既保留了传统比例-积分-微分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制的优点,又通过扩张观测器对系统的内外扰动及未建模动态进行估计,并在控制量中进行补偿,故具有更强的适应性和鲁棒性。目前,自

抗扰控制器在诸多领域都有应用范例^[10-12],如深空探测天线,航空光电稳定平台,电动舵机伺服系统等。

本文将自抗扰控制技术应用在空间光通信精跟踪系统中。为了改善非线性状态误差反馈控制律的性能,引入了模糊控制思想来自适应调整控制律中的增益系数。该方法可以有效抑制系统的扰动,对不同频率及幅值的输入信号有很好的跟踪效果。

2 精跟踪系统结构及模型

空间光通信 APT 系统精跟踪系统的主要目标是提高 APT 伺服系统的带宽、补偿粗跟踪系统跟瞄残差以及减小系统动态滞后误差。精跟踪系统由快速倾斜镜(Fast Steering Mirror, FSM)、互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-oxide-semiconductor Transistor, CMOS)光斑检测、图像处理单元、精跟踪控制器和压电陶瓷驱动器(Piezoelectric Transducer, PZT)组成,其结构如图 1 所示。

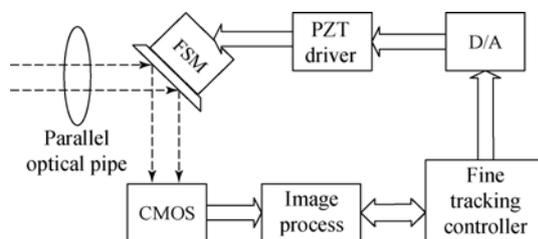


图 1 精跟踪系统结构图

Fig. 1 Block diagram of fine tracking system

精跟踪伺服系统的工作过程如下:COMS 接收到信标光或信号光,它们经图像处理和光斑中心位置提取后,由精跟踪控制器计算 FSM 的偏

转角度,再通过 D/A 模块将光信号转换成电压信号,并驱动 4 个 PZT 运动,以控制 FSM 偏转,使光斑移动到 CMOS 中心。

图 1 中各个模块的数学模型描述如下:

PZT 与 FSM 可以看作一个二阶振荡环节^[13],其传递函数可以表示为:

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

其中: ξ 为阻尼比, ω 为无阻尼自振频率。

压电陶瓷的滞环现象,驱动器的蠕变过程以及 CMOS 传感器的延迟可以近似成一个一阶惯性环节,其传递函数可以表示为:

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

其中: T 为时间常数,D/A 模块的数学模型可以看作是一个比例环节 K_{DA} 。所以精跟踪系统的开环数学模型可以表示为:

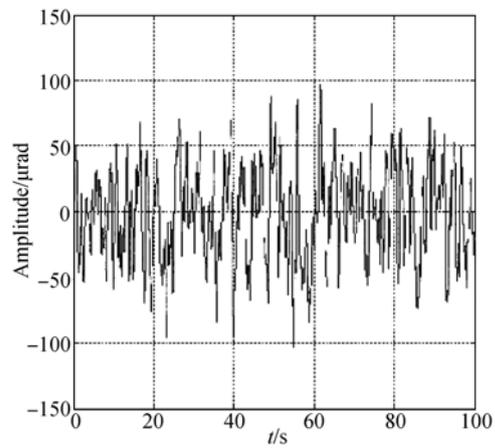
$$G(s) = \frac{K_{DA} \times \omega^2}{(Ts+1)(s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)}. \quad (3)$$

3 精跟踪系统扰动分析

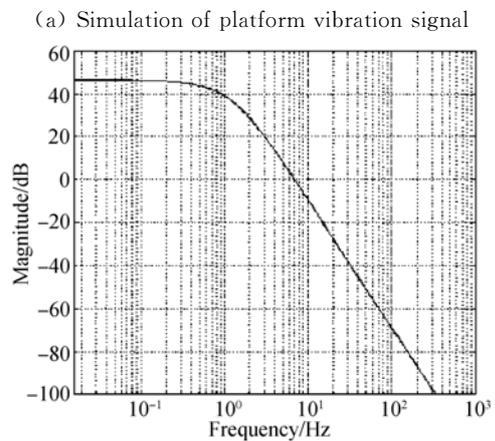
精跟踪系统的扰动主要来自内部扰动和外部扰动。内部扰动有压电陶瓷的滞环现象,驱动器的蠕变过程,以及传感器和处理器的延迟等,这些在建立系统模型的时候已经考虑。外部扰动有空间环境干扰和来自卫星平台的振动两种。其中:空间环境干扰中只有微小陨石碰撞和空间温度变化的影响较大,后者可以看作是一种机械形变,文献^[14]中做了细致的分析,本文暂不考虑其影响。文中主要讨论来自卫星平台的振动对精跟踪系统的影响。欧州航天局(European Space Agency, ESA)对 OLYMPUS 卫星进行了星体振动测试,从得出的结果可知,对星间光通信影响较大的振动频率主要在 100 Hz 以内,其功率谱密度函数为 $S(f) = 160/(1 + f^2)$ ($\mu\text{rad}^2/\text{Hz}$)。根据 ESA 给出的功率谱密度函数,设计了一个模拟星体振动的滤波器,其传递函数为:

$$W(s) = \frac{200}{0.0023s^3 + 0.053s^2 + 0.4s + 1}. \quad (4)$$

滤波器的输入为高斯白噪声,图 2(a)为模拟的卫星平台振动信号,图 2(b)是其幅频响应特性曲线。



(a) 模拟平台振动信号



(b) 振动信号幅频响应

(b) Amplitude-frequency response for vibration signal

图 2 模拟平台振动信号及其幅频响应

Fig. 2 Simulation data of vibration signal for satellite platform and its amplitude-frequency response

4 模糊自抗扰控制器的设计

模糊自抗扰控制器由微分跟踪器(Tracking Differential, TD)、扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)、非线性组合 PD 和模糊逻辑 4 个部分组成,其结构如图 3 所示。

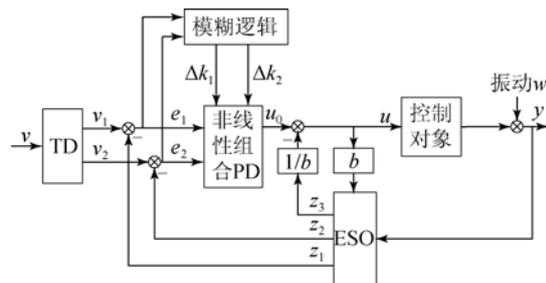


图 3 模糊自抗扰控制器结构图

Fig. 3 Block diagram of fuzzy ADRC controller

精跟踪系统的输入信号频率为 1 kHz,而控制器的控制频率为 10 kHz,属于输入不连续系统,所以安排过渡过程是必要的。TD 的主要作用是合理地安排过渡过程,使系统尽快地跟踪输入信号,并在不放大噪声的情况下获取更为准确的微分估计。式(5)为 TD 的表达式。

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = fhan(v_1 - v(t), v_2, r, h_0) \end{cases}, \quad (5)$$

其中: v 为输入信号; v_1 为输入信号估计; v_2 为输入信号的微分估计; r 为速度因子; h_0 为滤波因子。 $fhan$ 函数为最速跟踪函数,其表达式如式(6)所示:

$$\begin{cases} d = rh_0^2, a_0 = h_0 v_2, y = (v_1 - v(t)) + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d+8|y|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d)/2 \\ s_y = (\text{sign}(y+d) - \text{sign}(y-d))/2 \\ a = (a_0 + y - a_2)s_y + a_2 \\ s_a = (\text{sign}(a+d) - \text{sign}(a-d))/2 \\ fhan = -r \left[\frac{a}{d} - \text{sign}(a) \right] s_a - r \text{sign}(a) \end{cases}. \quad (6)$$

精跟踪系统可以近似成一个二阶系统,所以设计三阶扩张状态观测器对其进行观测,状态观测器的表达式如式(7)所示:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 fal(e, \alpha_1, \delta) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 fal(e, \alpha_2, \delta) \end{cases}, \quad (7)$$

其中: e 为观测误差; z_1 、 z_2 和 z_3 为观测器输出; δ 为线性区间; β_1 、 β_2 和 β_3 为输出误差权重因子; b 为补偿系数; α_1 和 α_2 通常取为 0.5 和 0.25。 fal 函数表达式如式(8)所示:

$$fals(x, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{x}{\delta^{1-\alpha}}, |x| \leq \delta \\ \text{sign}(x) |x|^\alpha, |x| > \delta \end{cases}. \quad (8)$$

PID 控制器是误差及其积分和微分的线性组合,而非线性 PD 控制器是误差和误差微分的非线性组合,舍弃了误差的积分项,从而避免了积分反馈的副作用。其控制律如式(9)所示:

$$u_0 = (k_1 + \Delta k_1) fal(e_1, \alpha_1, \delta_0) + (k_2 + \Delta k_2) fal(e_2, \alpha_2, \delta_0), \quad (9)$$

其中: e_1 为输入信号估计误差; e_2 为输入信号微分估计的误差; k_1 和 k_2 类似于 PID 中的比例系

数和微分系数。 Δk_1 和 Δk_2 分别是比例和微分系数的补偿增益,它们可以根据 e_1 和 e_2 的实时变化来自适应调整增益系数,以提高控制器性能。其中模糊控制器的输入为 e_1 、 e_2 ,输出为 Δk_1 和 Δk_2 。选定 e_1 的基本论域为 $[-5, +5]$, e_2 的基本论域为 $[-50, +50]$, Δk_1 的基本论域为 $[-0.6, +0.6]$, Δk_2 的基本论域为 $[-0.05, +0.05]$,其模糊推理采用 Mamdani 型^[15]。所建立模糊控制表如表 1 所示。

表 1 Δk_1 、 Δk_2 模糊规则表
Tab. 1 Fuzzy rules of Δk_1 and Δk_2

e_1/e_2	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB/PS	PS/NS	PS/NB	PS/NB	ZO/PS
NS	PS/PS	PS/NS	PS/NB	ZO/NS	NS/ZO
ZO	PS/ZO	PS/NS	ZO/NS	NS/NS	NS/ZO
PS	PS/PB	ZO/ZO	NS/ZO	NS/ZO	NS/PB
PB	ZO/PB	NS/PS	NS/PS	NS/PS	NB/PB

在 u_0 中加入系统扰动的补偿量,得到模糊自抗扰控制器的控制量 u 。

$$u = u_0 - \frac{z_3}{b}. \quad (10)$$

5 实验结果及分析

实验系统包括以下部分:FSM 样机、CMOS 图像传感器、数据采集系统以及 PZT 控制器。其中驱动控制器是以 TMS320F2812 型数字信号处理器(DSP)为核心,自行研制的数字控制器。扰动信号由式(4)给出,并直接加入到 CMOS 图像传感器采集的光斑反馈回路中。系统控制频率为 10 kHz,光斑反馈频率为 1 kHz,数据采集系统用来记录实验数据,其采样频率为 1 kHz。实验中模拟 FSM 一维水平运动,并通过改变输入信号的频率和幅值来模拟入射光束的抖动,然后将卫星本体的微振动加入到反馈回路中来测试 PID 控制器与模糊自抗扰控制器的跟踪性能及对扰动的抑制能力,并对结果进行比较分析。

图 4 是两种控制器在不同频率输入信号下的比较结果,其中信号幅值均为 50 μrad 。为了方便比较,将两种方法的实验数据放在一个图中,其中

10 s 前为 PID 控制器的误差,10 s 后为模糊自抗扰控制器的误差。可以看出,PID 控制器的最大误差在 $\pm 17 \mu\text{rad}$,模糊自抗扰的最大误差在 $\pm 8 \mu\text{rad}$ 。两个控制器的误差都随着输入信号频率的增加而增大。值得一提的是,输入信号频率在 60 Hz 以下时,模糊自抗扰控制器可以将误差控制在 $\pm 5 \mu\text{rad}$ 。

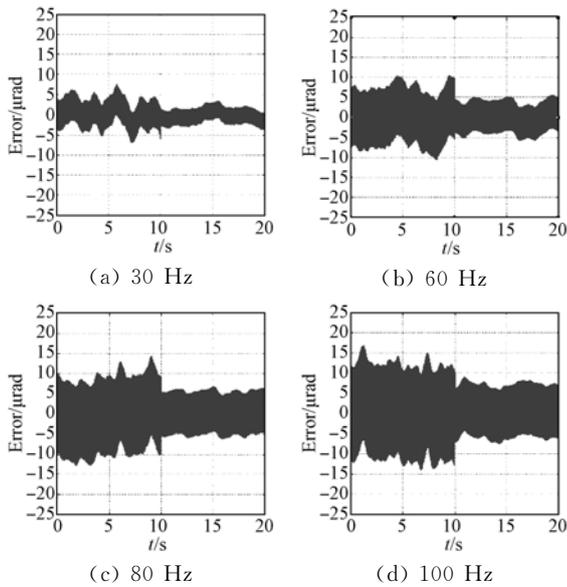


图 4 幅值为 $50 \mu\text{rad}$ 时的结果
Fig. 4 Results with amplitude of $50 \mu\text{rad}$

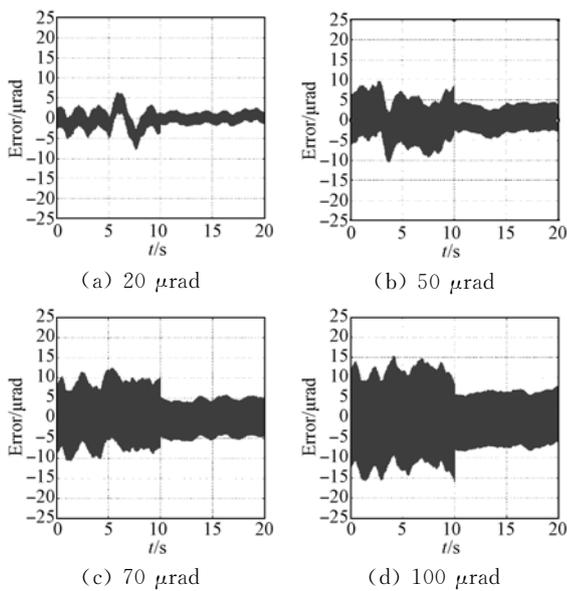


图 5 频率为 50 Hz 时的结果
Fig. 5 Results with frequency of 50 Hz

图 5 是两种控制器在不同幅值输入信号下的

比较结果,其中信号频率均为 50 Hz。为了方便比较将两种方法的实验数据放在一个图中,其中 10 s 前为 PID 控制器的误差,10 s 后为模糊自抗扰控制器的误差。可以看出,PID 控制器的最大误差在 $\pm 15 \mu\text{rad}$ 左右,模糊自抗扰控制器的最大误差在 $\pm 7.5 \mu\text{rad}$ 左右。两个控制器的误差都随着输入信号幅值的增加而增大。值得一提的是,输入信号幅值在 $70 \mu\text{rad}$ 以下时,模糊自抗扰控制器可以将误差控制在 $\pm 5 \mu\text{rad}$ 附近。

表 2、表 3 是在不同频率及不同幅值输入信号的情况下,PID 控制器与模糊自抗扰控制器跟踪误差的对比结果。可以看出,模糊自抗扰控制相比于 PID 控制在跟踪性能上提高约 1 倍,而且当输入频率在 50 Hz 以下,输入信号幅值在 $70 \mu\text{rad}$ 以下时,跟踪精度可以达到 $\pm 5 \mu\text{rad}$ 。

表 2 输入信号幅值为 $50 \mu\text{rad}$ 时的结果

Tab. 2 Results with input signal amplitude of $50 \mu\text{rad}(\mu\text{rad})$

方法\频率	30 Hz	60 Hz	80 Hz	100 Hz
PID	± 7	± 10	± 14.5	± 17
模糊自抗扰	± 3	± 5	± 6.5	± 8

表 3 输入信号频率为 50 Hz 时的结果

Tab. 3 Results with input signal frequency of 50 Hz(μrad)

方法\幅值	20	50	70	100
PID	± 7.5	± 10	± 12.5	± 15.5
模糊自抗扰	± 2.5	± 4.5	± 5.5	± 7.5

6 结 论

针对空间光通信输入光束抖动及卫星本体微振动对系统跟踪精度的影响,设计了模糊自抗扰控制器对精跟踪系统进行控制,采用微分跟踪器来提高系统动态响应性能,完成了与 PID 控制器的对比跟踪实验,实验结果说明模糊自抗扰控制器具有更好的抗干扰能力和跟踪性能。实验还得到以下结论:在模拟干扰条件下,应用模糊自抗扰控制器对不同频率、不同幅值的输入信号进行跟踪控制时,最大跟踪误差为 $\pm 8 \mu\text{rad}$,减小了 50% 左右。输入信号频率在 50 Hz 以下,输入信号幅值在 $70 \mu\text{rad}$ 以下时,系统跟踪精度可以达到 $\pm 5 \mu\text{rad}$ 。由于 DSP 运算速度的限制,测试中只

能将控制频率设定在 10 kHz,这在一定程度上限制了控制系统的带宽,而 CMOS 探测器的探测带宽也会对系统性能造成一定影响。本文设计的控

制器对提高空间光通信系统性能具有一定的实用价值,为空间光通信精跟踪系统抑制扰动提供了参考。

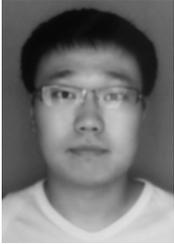
参考文献:

- [1] TONI T N. Pointing, acquisition and tracking system for the free space laser communication system SILEX [C]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2381: 194-205.
- [2] GUELMAN M, KOGAN A, LIVNE A. Acquisition and pointing control for inter-satellite laser communication [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40 (4): 1239-1248.
- [3] 董冉,艾勇,肖勇军,等. 自由空间光通信精跟踪系统设计及其通信实验[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2718-2722.
DONG R, AI Y, XIAO Y J, *et al.*. Design and communication experiment of fine tracking system for free space optic [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2718-2722. (in Chinese)
- [4] 韩诚山,李祥之,文明,等. 基于压电偏转系统的卫星平台振动补偿[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2085-2091.
HAN CH SH, LI X ZH, WEN M, *et al.*. Vibration compensation of satellite platform based on piezo-electric steering system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2085-2091. (in Chinese)
- [5] 黄海波,左韬,陈晶,等. 复合轴精跟踪系统伺服带宽的优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1561-1565.
HUANG H B, ZUO T, CHEN J, *et al.*. Optimum design of servo bandwidth for fine tracking subsystem in compound-axis system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1561-1565. (in Chinese)
- [6] 丁科,黄永梅,马佳光,等. 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制[J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 1-6.
DING K, HUANG Y M, MA J G, *et al.*. Error adaptive feedforward composite control of fast-steering-mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 1-6. (in Chinese)
- [7] 杨东,毛耀,丁科,等. 模型参考算法在快速反射镜中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(10): 2790-2795.
YANG D, MAO Y, DING K, *et al.*. Application of model reference adaptive algorithm in fast-steering mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2790-2795. (in Chinese)
- [8] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. *前沿科学*, 2007, 1: 24-31.
HAN J Q. Auto disturbances rejection control technique [J]. *Frontier Science*, 2007, 1: 24-31. (in Chinese)
- [9] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. *Proceedings of IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2009, 56(3): 900-906.
- [10] 孙明玮,邱德敏,王永坤,等. 大口径深空探测天线的抗风干扰伺服系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1568-1575.
SUN M W, QIU D M, WANG Y K, *et al.*. Wind disturbance rejection servo system for large deep space observatory antenna [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1568-1575. (in Chinese)
- [11] 李贤涛,张葆,孙敬辉,等. 航空光电稳定平台扰动频率自适应的自抗扰控制[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1574-1581.
LI X T, ZHANG B, SUN J H, *et al.*. ADRC based on disturbance frequency adaptive of aerial photoelectrical stabilized platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1574-1581. (in Chinese)
- [12] 张明月,杨洪波,章家保,等. 改进自抗扰控制谐波式电动舵机伺服系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 99-108.
ZHANG M Y, YANG H B, ZHANG J B, *et al.*. Servo system of harmonic drive electromechanical actuator using improved ADRC [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 99-108. (in Chinese)
- [13] 邵兵. 激光星间通信终端精瞄微定位系统关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
SHAO B. *Research on key technology of fine pointing micro-positioning system for laser intersatellite communication terminal* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [14] 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)

[15] CAO S G, REES N W, FENG G. Mamdani-type fuzzy controllers are universal fuzzy controllers [J]. *Fuzzy Set and Systems*, 2001, 123(3): 359-367.

作者简介:



崔宁(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2006年于东北林业大学获得学士学位,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事空间光通信APT系统控制方法的研究。E-mail: cuining_720@126.com

导师简介:



陈兴林(1963—),男,黑龙江佳木斯人,教授,博士生导师,1985年于华南理工大学获得学士学位,1991年、1994年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事卫星激光通信,精密伺服系统控制,飞行器控制与仿真研究。E-mail: chenxl@hit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)