

# 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制

丁 科<sup>1,2,3</sup> 黄永梅<sup>1,2</sup> 马佳光<sup>1,2</sup> 付承毓<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209  
<sup>2</sup> 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209; <sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 为了缓解各种宽带和窄带扰动引起的光束抖动,提高自由空间激光通信卫星平台捕获跟瞄(ATP)系统的瞄准精度,在传统的比例积分微分(PID)反馈算法基础上增加一套误差自适应前馈控制算法构成误差自适应前馈复合控制。误差自适应前馈复合控制结合了PID反馈算法和自适应前馈算法的优点,能更好地抑制卫星终端精跟踪系统承受的扰动,而且具有不需要额外前馈传感器的优点,不增加系统硬件的复杂性和成本。在实验室搭建了快速反射镜实验系统对这种复合控制算法进行了实验,实验结果表明,误差自适应前馈复合控制算法相对于经典PID反馈算法精度提高了约5倍;相对于自适应前馈算法精度提高了约1倍。误差自适应前馈复合控制算法在不增加系统复杂性的同时能进一步缓解光束抖动,提高卫星平台ATP系统精度。

**关键词** 光通信;误差自适应前馈复合控制;比例积分微分反馈控制;快速反射镜

**中图分类号** TN929.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0705007

## Error Adaptive Feedforward Composite Control of Fast-Steering-Mirror

Ding Ke<sup>1,2,3</sup> Huang Yongmei<sup>1,2</sup> Ma Jiaguang<sup>1,2</sup> Fu Chengyu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Beam Control of Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>3</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to reduce beam jitter introduced by all kinds of broadband and narrowband disturbance, and improve the satellite acquisition, pointing and tracking (ATP) system's pointing accuracy, a new kind of composite control is constructed based on the traditional proportional-integral-differential (PID) feedback algorithm and the new adaptive feedforward algorithm. It can reduce the jitter that satellite ATP system bears better than the traditional PID feedback algorithm. It not only has the merits of both algorithms, but also has the merit of no extra sensors for feedforward loop compared with the common adaptive feedforward algorithms. So the algorithm will not improve cost and complexity of the system. The algorithms referred above are verified by experiments and comparisons are made. Experimental results indicate that the error adaptive feedforward composite control algorithm's accuracy is nearly 5 times better than that of the classical PID control algorithm and 1 time better than that of the adaptive feedforward algorithm. The error adaptive feedforward algorithm can reduce beam jitter and improve the satellite ATP system's pointing accuracy.

**Key words** optical communications; error adaptive feedforward composite control; proportional-integral-differential feedback control; fast-steering-mirror

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510; 200.2605

## 1 引 言

星地激光通信链路中,激光穿越大气到达卫星平台捕获跟瞄(ATP)系统的通信接收器时会产生

光束抖动。抖动的原因主要有3个:1)粗跟踪系统的残差;2)大气湍流造成的光束抖动;3)卫星平台传递给ATP系统的谐波振动。如果不加控制,抖动

收稿日期:2011-02-14;收到修改稿日期:2011-03-23

基金项目:中国科学院重点实验室预研基金(A09k002)资助课题。

作者简介:丁科(1982—),男,博士研究生,主要从事星地激光通信方面的研究。

E-mail: dingke206@mails.gucas.ac.cn

导师简介:黄永梅(1968—),女,博士,研究员,主要从事光电跟踪系统方面的研究。E-mail: hjn666@sohu.com

造成的功率损失远远超过了通信接收器能容忍的程度。通常在粗跟踪基础上增加一套精跟踪系统也就是在系统光路中增加一块快速反射镜和与通信接收器共光轴的信标探测器,探测器提供误差信号通过反馈来控制光束瞄准靶面的中心,从而通信激光也被控制在通信探测器中心,这种将粗跟踪机架构成的粗跟踪系统和快速反射镜构成的精跟踪系统结合在一起就是复合轴控制系统<sup>[1,2]</sup>。快速反射镜的控制律一般选用比例积分微分(PID),其设计简单,抑制能力取决于精跟踪系统的带宽,其对抑制能力范围内的宽带和窄带的扰动都有不错的抑制。然而在卫星激光通信系统中,由于能量限制,系统的采样率只能做到几千赫兹,加上图像处理造成的系统延迟,抑制带宽通常只能做到一百多赫兹,这样的能力对于宽带抖动已经能很好地抑制。但是对于卫星振动造成的窄带抖动其抑制能力还不够,根据美国 NASA 发布的卫星振动的功率谱,如果采用 PID 控制将 100 Hz 高达 12  $\mu\text{rad}$  的抖动抑制到 3  $\mu\text{rad}$  需要约 200 Hz 的抑制带宽,这在目前来说还是很困难的。

前馈补偿对于窄带振动有很好的抑制效果<sup>[3,4]</sup>,但是其对前馈信号的频率、相位、增益都有很高的要求,当环境变化后需要重新设计控制器,这在卫星平台振动抑制上实现起来就尤为困难。自适应前馈控制技术也就是自适应逆控制<sup>[5,6]</sup>对光束的窄带抖动控制已经显示出很大的潜能,其只需要测量抖动信号的频率,对增益和相位的要求都很低,已经有很多文献<sup>[7~9]</sup>对这个问题表示出了极大的关注,并取得了不错的效果。但是目前的自适应前馈控制技术无一例外地需要额外的传感器来获得参考信号。如果采用这种技术,需要对现有的系统进行改造,增加了系统的复杂性。本文在原有的 PID 反馈算法基础上,利用 PID 反馈算法误差里含有未能补偿的窄带信号这一特点,将 PID 反馈算法误差作为前馈自适应控制器的参考信号,对系统结构进行适当处理,构成了一种新的复合控制器,定义为误差自适应前馈复合控制器。实验结果表明误差自适应前馈复合控制器能在不增加系统硬件的同时对宽带和窄带的扰动有很好的抑制效果,能有效提高星地激光链路的性能。

## 2 快速反射镜系统的控制算法

由快速反射镜(FSM)和精探测器构成的精跟踪系统是复合轴系统的子轴,其精度直接决定了复合轴系统的精度<sup>[1,2]</sup>。图 1 是星地激光通信链路中

卫星平台 ATP 系统精跟踪子系统示意图。快速反射镜控制算法就是要通过对 FSM 施加控制使得信标光与定标点之间的误差最小。

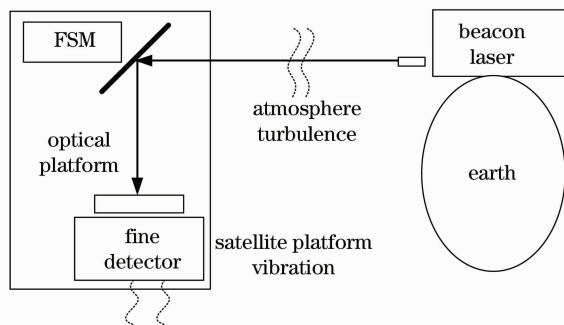


图 1 卫星平台 ATP 系统精跟踪子系统示意图

Fig. 1 Sketch map of precision tracking subsystem of satellite platform ATP system

### 2.1 快速反射镜的 PID 反馈控制

图 2 是经典 PID 反馈控制算法的原理图,图中  $d$  代表信标光轴需要定位的位置,一般为 0 或一个常量; $r$  代表图 1 中大气湍流和卫星平台振动对信标光轴的扰动; $y$  代表快速反射镜对信标光轴的校正; $Y$  代表信标光经过扰动和校正后实际的信标光轴; $e$  代表由精探测器探测到的实际光轴和参考光轴的误差,也称为脱靶量。通常采用 Matlab/sisotool 工具来设计 PID 控制器,设计原则一般是系统开环为一型且具有 6~10 dB 幅值裕度和 45°~60°的相位裕度。图 3 是其典型的误差抑制曲线。

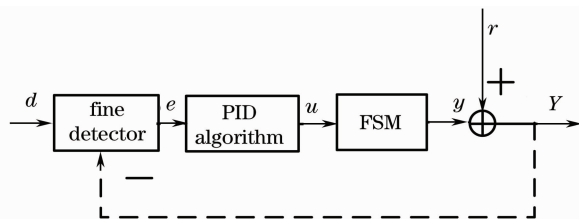


图 2 经典 PID 算法原理图

Fig. 2 Block diagram of classical PID algorithm

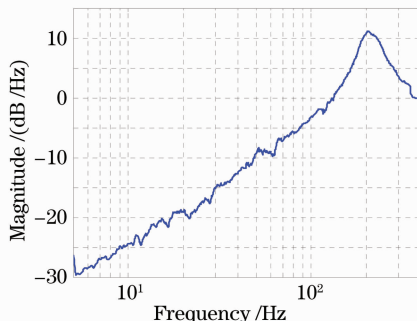


图 3 PID 算法误差抑制曲线

Fig. 3 Curve of PID algorithm's output sensitivity

## 2.2 快速反射镜的自适应前馈控制

图4是自适应前馈控制算法的原理图<sup>[7~9]</sup>,可以看出其与反馈控制算法的区别有两点:1)误差不再直接经过控制器产生控制信号,而是通过自适应算法改变自适应前馈控制器参数,使得误差依据某种最优原则收敛到最优;2)需要对扰动 $r$ 进行测量,这在反馈算法中是不需要的。由于自适应前馈控制器可以自动收敛到合适的幅值和相位补偿,因而对于测量信号的形式和延迟都没有太多的要求,只需要测量信号和原信号的相关程度,相关程度越高,自适应前馈的效果就越好。通常采用光学传感器、陀螺仪、加速度计等对信号进行测量。

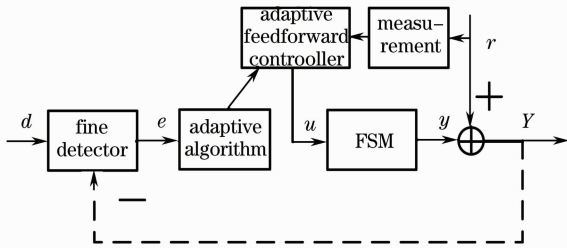


图4 自适应前馈控制算法原理图

Fig. 4 Block diagram of adaptive feedforward algorithm

## 2.3 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制

对于图2所示的PID反馈算法,观察图3所示的误差抑制曲线可以发现PID反馈算法对扰动的抑制是不分宽带和窄带的,其在误差抑制带宽内对误差的抑制从低频到高频逐渐减小。如果扰动的频带在反馈算法的误差抑制带宽外,则反馈算法对其没有抑制能力,这样剩余的误差信号中就含有未抑制的扰动信号(如后面图9所示的情形),因而考虑采用这个误差信号作为自适应前馈算法的参考信号。图5是这种算法的原理图。

观察图5所示的原理图,由于误差 $e$ 既作为自适应前馈控制器的参考信号又作为误差信号,所以

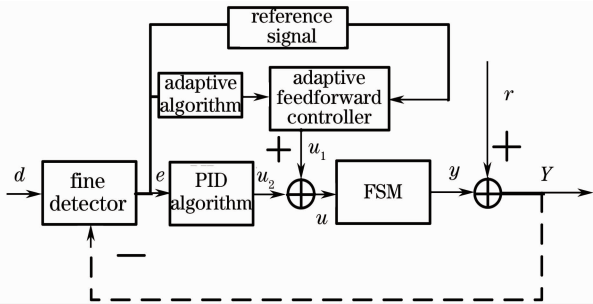


图5 误差自适应前馈算法原理图

Fig. 5 Block diagram of error adaptive feedforward algorithm

当误差开始收敛时,参考信号也跟着变小,因而采用这种原理图的算法还是不能完成自适应前馈算法的。根据图5的原理图可以得到:

只采用PID算法时,

$$e = d - r - u_2 P, \quad (1)$$

施加自适应算法后,

$$e = d - r - u_1 P - u_2 P, \quad (2)$$

令

$$e_1 = e + u_1 P = d - r - u_2 P, \quad (3)$$

从(3)式可以得知,如果采用 $e_1$ 作为PID算法的误差信号,则施加和不施加自适应算法对于原来的PID算法都没有影响,因而 $e_1$ 可以作为自适应前馈算法的参考信号。当然 $u_1 P$ 是不能直接得到的,所以在算法中采用快速反射镜的模型 $\tilde{P}$ 和自适应前馈控制器算出的控制量 $u_1$ 计算出 $u_1 \tilde{P}$ 来代替 $u_1 P$ ,由于获得的快速反射镜的模型是非常精确的,因而这种替代不会带来较大的误差。图6是这种改进的误差自适应前馈控制算法的原理图。

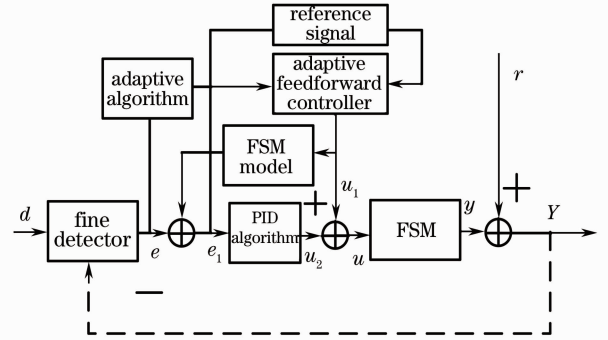


图6 改进的误差自适应前馈算法原理图

Fig. 6 Block diagram of improved error adaptive feedforward algorithm

## 3 实验与结果

### 3.1 抑制光束抖动的实验平台

由于目前实验室内还不能为整个光路提供振动,于是提出了一种等效的振动抑制实验方案。图7是光束抖动控制实验系统的原理图。它主要由2个FSM;CFSM和DFSM;2个位敏传感器(PSD):PSD1和PSD2(PSD1用作扰动测量,PSD2用作精探测器);计算机控制系统(CCS)组成。其中扰动镜DFSM用来提供光束抖动;控制镜CFSM用来提供控制信号。CFSM采用的是自行研制的SiC镜面的快速反射镜,由于两个轴的频率曲线基本重合,所以这里只给出其中一个轴的模型。图8是其频率特性曲线和相应的拟合曲线,拟合的传递函数模型为<sup>[10]</sup>

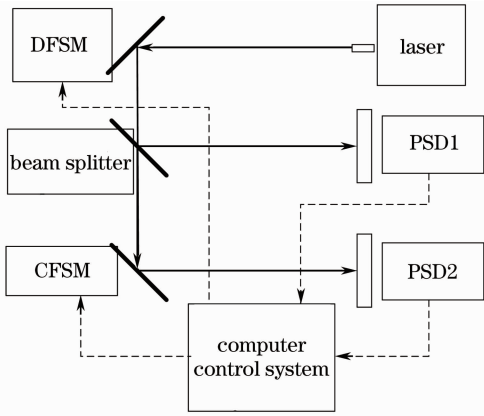


图 7 光束抖动控制实验系统原理图

Fig. 7 Block diagram of beam jitter control system

$$\frac{k}{(as^2 + bs + c)(ds + e)} \exp(-\Delta s). \quad (4)$$

DFSM 采用的是美国 PI 公司的 S330 系列的快速反射镜,其内部闭环后带宽大约 1000 Hz,由于用作扰动镜,其模型不在此给出。PSD1 和 PSD2 分别用来提供前馈和反馈信号,计算机控制系统包含一台工控机和嵌入其中的一套运动控制卡,其上配备的数据采集系统的模数和数模转换的位数均为 16 bit,系统的采样和运算更新频率均为 2 kHz。

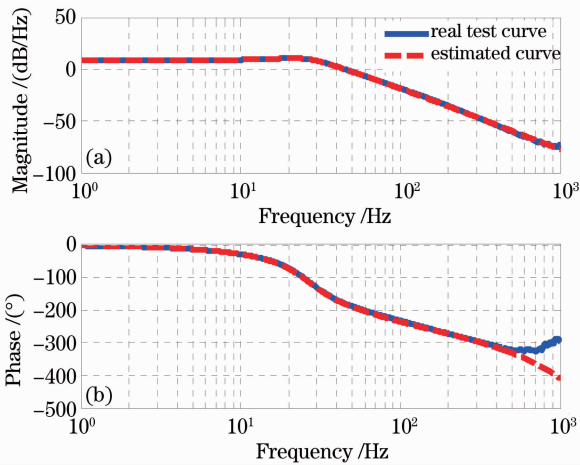


图 8 SiC 快速反射镜开环 bode 图

Fig. 8 Bode diagram of SiC FSM's open loop

### 3.2 实验方法

星地激光通信卫星终端的光学系统的抖动频谱不仅包含窄带噪声,还包含有宽带的随机噪声<sup>[11,12]</sup>。为了模拟真实的光束抖动,实验中引入的干扰使用了两个窄带扰动(一个 53 Hz,另一个 97 Hz)和一个白噪声通过滤波器后的输出作为宽带扰动。扰动幅值根据 SILEX 给出的卫星振动的功率谱进行设计,并适当增大了窄带噪声的幅值,以体现自适应前馈控制的能力。按照 SILEX 给出的

卫星振动的功率谱,窄带扰动应该至少到 200 Hz,在实验中发现自适应前馈控制对 200 Hz 的窄带扰动的确有所抑制,但是即使对于很小幅值的扰动,控制量也会很大并伴随着由噪声带来的快速反射镜的“啸叫”声,当试图增大扰动幅值时,控制量开始饱和并造成算法收敛失败。将自适应前馈算法对 200 Hz 和 100 Hz 扰动抑制产生的控制量进行了理论分析,结果是对于图 8 所示的 FSM 频响曲线,同样幅值的扰动,产生的控制量相差约 40 倍,其中 10 倍来自于 FSM 增益在两个点的增益差,另外 4 倍来自于频率的上升。至于“啸叫”我们认为这是由于噪声叠加到大控制量上造成的。如果采用本文所描述的误差自适应前馈算法,由于 PID 在抑制带宽外某一频段还会造成误差放大,则如图 9 所示的在 200 Hz 处还会对扰动放大 15 dB,约合 6 倍,从而造成控制量持续饱和,功率级电流过大,减少功率级寿命甚至损坏功率级。所以本文选用的两个频率都在 PID 反馈算法误差抑制带宽内,对于更高频率的扰动,需要同时考虑功率级的输出能力和系统的噪声特性。

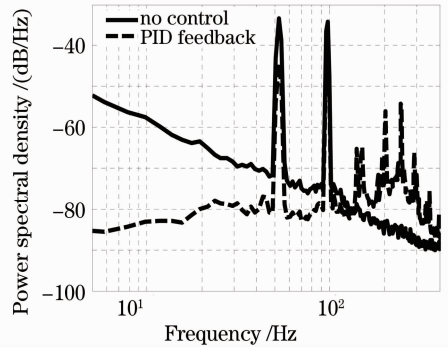


图 9 经典 PID 控制算法误差功率谱图

Fig. 9 PSD diagram of classical PID algorithm

本文采取的自适应算法为最小均方算法(LMS)<sup>[13]</sup>,具有结构简单、算法复杂度低、对系统宽度要求小、易于用数字信号处理器(DSP)实现等优点,但是其收敛速度慢,通常用来作为系统稳态性能分析。因此本文主要研究算法的稳态性能,而没有去分析自适应算法的阶数与收敛速度、步长和失调的关系。实验均是在阶数为 48,步长为 0.2,算法收敛时间为 30 s,数据记录时间为 10 s 的条件下完成数据记录的。数据分析部分主要通过计算 3 种算法的稳态误差的均方根和功率谱图来分析算法对各种扰动的抑制能力。稳态误差是加控制后 PSD2 的电压输出,探测器的 1 V 相当于激光轴转动大约 200  $\mu$ rad。功率谱图采用的是 Matlab 的 Pwelch 函数绘制,Pwelch 函数的参数设置为 pwelch(error,



1024, [], [], 2000); 横坐标采用对数坐标, 单位是 Hz; 纵坐标单位是 dB。因而功率谱图与控制系统设计中的 bode 图物理意义相同, 算法在各个频段的误差抑制能力可以从未加控制和施加控制的误差功率谱图中直观地看出来。由于 CFSSM 两个轴耦合非常小, 且两个轴具有几乎一致的频率特性, 所以仅给出了垂直轴 Y 的实验结果。

### 3.3 经典 PID 控制算法

图 9 是经典 PID 控制算法和未加控制算法的误差功率谱图比较, 可以看出经典 PID 算法对误差的抑制不区分宽带和窄带, 抑制能力随频率的增高而降低, 并对误差抑制带宽后的一段区域有放大。53 Hz 处抑制能力约 10 dB, 97 Hz 处抑制能力约 3 dB。未加控制的误差信号的标准差为 0.0520 V, 施加经典 PID 控制算法后为 0.0226 V。

### 3.4 自适应前馈控制算法

图 10 是自适应前馈控制算法和未加控制算法的误差功率谱图比较, 可以看出自适应前馈控制算法对宽带扰动的抑制很差, 甚至在某些频段还会放大误差。但是其对窄带扰动的抑制效果是很明显的, 抑制后窄带峰基本消失。未加控制的误差信号的标准差为 0.0518 V, 施加自适应前馈控制算法后为 0.0081 V。

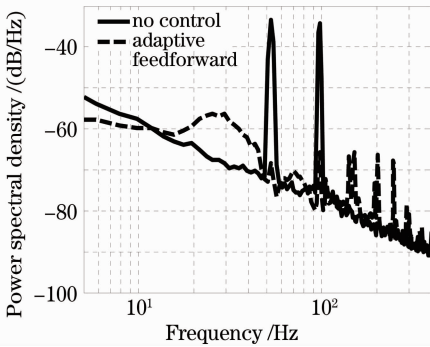


图 10 自适应前馈控制算法误差功率谱图

Fig. 10 PSD diagram of adaptive feedforward algorithm

### 3.5 误差自适应前馈复合控制算法

图 11 是误差自适应前馈复合控制算法和未加控制算法的误差功率谱图比较, 可以看出误差自适应前馈复合控制算法完全结合了经典 PID 控制和自适应前馈控制算法的优点, 同时对宽带和窄带扰动产生了很好的抑制。未加控制的误差信号的标准差为 0.0520 V, 施加误差自适应前馈复合控制算法后为 0.0039 V。

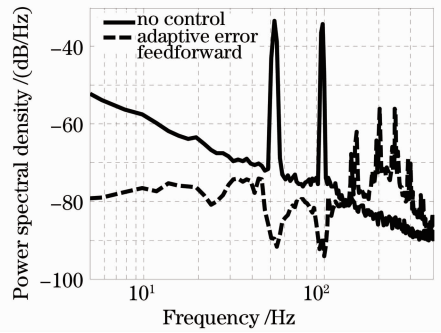


图 11 误差自适应前馈复合控制算法误差功率谱图

Fig. 11 PSD diagram of error adaptive feedforward algorithm

## 4 结 论

根据 PID 控制算法的误差信号中含有未能抑制的窄带信号这一特点, 对系统结构进行适当的变形, 采用误差信号作为自适应前馈控制器的参考信号, 与原有的 PID 反馈算法相比, 大大提高了系统对于较高频带窄带信号的抑制能力, 与单一的自适应前馈算法相比, 误差自适应前馈复合控制算法结合了 PID 反馈算法和自适应前馈算法的优点, 而且具有不需要额外传感器的优点, 降低了系统的复杂性和成本。对 PID 反馈算法、自适应前馈算法和误差自适应前馈复合控制算法进行了实验研究。实验结果表明, 误差自适应前馈复合控制算法相对于经典 PID 反馈算法精度提高了约 5 倍; 相对于自适应前馈算法精度提高了约 1 倍。误差自适应前馈复合控制算法在不增加系统硬件复杂性的同时可以进一步缓解光束抖动, 提高自由空间激光通信卫星平台 ATP 系统精度。

## 参 考 文 献

- 1 Fu Chengyu, Jiang Lingtao, Ren Ge *et al.*. Image tracking system with a fine-steering-mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1994, **21**(3): 1~8  
傅承毓, 姜凌涛, 任戈等. 快速反射镜成像跟踪系统 [J]. *光电工程*, 1994, **21**(3): 1~8
- 2 Yue Bing, Yang Wenshu, Fu Chengyu. Experiments on precision tracking system with a fast steering mirror in space laser communication [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(3): 35~38  
岳冰, 杨文淑, 傅承毓. 空间光通信中的快速倾斜镜跟踪实验系统 [J]. *光电工程*, 2002, **29**(3): 35~38
- 3 V. A. Skormin, M. A. Tacillo, D. J. Nicholson. Jitter rejection technique in a satellite-based laser communication system [J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(11): 2764~2769
- 4 V. A. Skormin, M. A. Tacillo, T. Busch. An adaptive jitter rejection technique applicable to airborne laser communication system [C]. *SPIE*, 1994, **2123**: 357~368

- 5 Dang Xuanju. Real-time adaptive inverse control based on neural networks for piezoceramic actuator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(7): 1266~1272  
党选举. 压电陶瓷执行器的神经网络实时自适应逆控制 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(7): 1266~1272
- 6 Li Ying, Ge Wenqi, Wang Shaobin *et al.*. Adaptive inverse control of stable platform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(11): 2744~2749  
李英, 葛文奇, 王绍彬等. 稳定平台的自适应逆控制 [J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(11): 2744~2749
- 7 R. J. Watkins. The Adaptive Control of Optical Beam Jitter [D]. Monterey, CA.: Naval Postgraduate School, 2004. 10~26
- 8 B. E. Bateman. Experiments on Laser Beam Jitter Control with Applications to a Shipboard Free Electron Laser [D]. Monterey, CA.: Naval Postgraduate School, 2007. 20~27
- 9 M. J. Beerer. Adaptive Filter Techniques for Optical Beam Jitter Control and Target Tracking [D]. Monterey, CA.: Naval Postgraduate School, 2008. 15~33
- 10 Wang Qiang. Engineering Application Research of High Performance on-Axis Tracking [D]. Chengdu: Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2006. 67~82  
王强. 高性能共轴跟踪工程应用研究 [D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2006. 67~82
- 11 Li Xiaofeng. The Principle and Technology of the Satellite-to-Ground Laser Communication Links [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 262~268  
李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 262~268
- 12 F. Cosson, P. Ddoubriere, E. Perez. Simulation model and on-ground performances validation of the PAT system for SILEX program [C]. *SPIE*, 1991, **1417**: 262~276
- 13 Ding Yumei, Kuo Yonghong, Gao Xinbo. Digital Signal Processing—Time Domain Discrete Random Signal Processing [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003. 63~77  
丁玉美, 阔永红, 高新波. 数字信号处理—时域离散随机信号处理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003. 63~77