

光通信中卫星振动抑制的自适应复合控制

覃浩 付承毓 黄永梅

中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

摘要 在星地光通信中为了获得较高的性能,需要捕获对准跟踪(APT)系统具有高精度,而卫星振动是影响APT精度的最主要因素。传统反馈控制对卫星振动的中高频抑制效果较差。针对这种情况,将自适应算法引入前馈控制,设计了最小均方(LMS)和递推最小二乘(RLS)两种自适应反馈复合控制算法。仿真验证了反馈控制、LMS复合控制以及RLS复合控制三种算法的性能,结果表明自适应前馈复合控制算法对中高频振动抑制效果明显,采用更快收敛速度以及更高稳态精度的自适应算法可以提高抑制效果。

关键词 光通信;振动抑制;自适应算法;复合控制

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.040606

Adaptive Composite Control for Jitter Rejection of Satellite in Optical Communications

Qin Hao Fu Chengyu Huang Yongmei

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

Abstract In order to obtain higher performance in space-to-ground optical communications, the acquisition, pointing and tracking (APT) system needs to have high precision. The vibration of satellites is the most important factor which affects the accuracy of APT. The suppression effect of traditional feedback control is bad in the medium-to-high frequency range of satellites' vibrations. For this situation, adaptive algorithm is introduced into feedforward control and two kinds of adaptive feedback composite algorithms based on the least mean squares (LMS) and recursive least squares (RLS) algorithms are designed. Feedback control, LMS composite control and RLS composite control are verified by simulations. The results show that the effect of adaptive feedforward composite control is better for the medium-to-high frequency vibrations and the use of adaptive algorithms with faster convergence and higher steady-state precision can improve the suppression effect.

Key words optical communications; vibration suppression; adaptive algorithm; composite control.

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 200.2605

1 引言

相对于传统星地射频通信方式,光通信具有更广阔的应用前景,主要由于光通信具有以下优势:低发射功率、高接收功率;较小的收发天线和系统结构;大通信容量、高数据传输率;高保密和抗干扰能力。捕获对准跟踪(APT)系统作为光通信中一个重要组成部分,其性能的好坏对光学参数设计、收发终端的复杂度以及通信中误码率和突发错误的影响很大^[1-2]。而且在光通信链路中由于采用衍射极限发射光束宽度,接收信号的功率对发射机的对准误差非常敏感。发射机对准偏差大可能导致地面上无法忍受的信号衰落,并会显著降低系统的性能^[3]。所以迫切需要提高APT系统的精度,减小对准误差。

在光通信链路中,影响APT精度的主要因素包括:1)大气湍流对光束的相位和位移影响;2)卫星平台的振动;3)各传感器噪声以及摩擦的影响。大气湍流的影响比较复杂,而且很难从APT系统的控制算法进行抑制。随着器件制造技术的发展以及各种滤波去噪技术的应用,传感器噪声影响可以控制在较小的范围内^[4-6]。美国喷气推进实验室的研究显示,卫星振动是影响APT系统对准精度的最主要因素^[7]。

收稿日期: 2013-09-29; 收到修改稿日期: 2013-11-12; 网络出版日期: 2014-03-28

作者简介: 覃浩(1989—),男,硕士研究生,主要从事光通信卫星振动方面的研究。E-mail: qinhaosjj@gmail.com

导师简介: 付承毓(1952—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电跟踪系统方面的研究。E-mail: cyfu@ioe.ac.cn

目前对卫星平台振动的抑制方法主要有两个方向:1)采用高精度、高带宽的传感器以及执行单元,以构成具有高带宽的反馈闭环控制回路。这种方法控制结构简单稳定,缺点是对器件要求高,性价比低。2)在较低性能传感器以及执行单元的基础上,通过算法改进以达到较好的振动抑制效果。在方向,比较有代表性的有 Held 等^[8]提出的陀螺稳定、质量稳定以及互补滤波算法;美国海军研究院 Skormin 等^[9]提出的自适应前馈补偿技术对抑制带宽有较好的提高;美国喷气推进实验室利用多惯性传感器融合精确测量振动信号,并使用高级组件和子系统,设计了有效的振动抑制控制算法,使 APT 系统达到了亚微弧度的精度^[10-11]。

本文主要研究控制算法用于改进 APT 系统的精跟踪子系统,将最小均方(LMS)自适应算法以及递推最小二乘(RLS)自适应算法应用在前馈控制结构中,并进行了比例微分积分(PID)反馈与自适应前馈的复合控制,最终仿真比较了各算法在扰动抑制方面的效果。

2 卫星平台振动分析

卫星振动来源主要包括两方面:1)来自内部的扰动,如太阳能板驱动、姿态变换以及各种电机产生的振动;2)来自外部的扰动,如微小陨石碰撞、太阳辐射压力以及日月地球的引力影响等。

由于卫星振动对光通信链路影响较大,所以美国、欧洲各国以及日本都对卫星的振动信号进行了仿真分析或者在轨实测。

欧洲航空局(ESA)发射了 OLYMPUS 通信卫星,并且利用卫星上三个正交的微加速度计对振动信号进行测量。通过返回的测量数据可以知道振动频谱在 1~200 Hz 范围内。ESA 在设计光通信仿真系统 SILEX 的平台振动功率谱密度函数时采用如下的模型:

$$S(f) = \frac{160 \mu \text{ rad}^2/\text{Hz}}{1 + (f/f_0)^2}, f_0 = 1 \text{ Hz}. \quad (1)$$

美国宇航局戈达德航天中心(NASA/GSFC)提供了在轨测量的 LANDSAT-4 卫星的振动功率谱密度(PSD),它属于典型的采用三轴稳定传感器测量的卫星扰动 PSD 频谱。数据分析表明,在 1 Hz 处太阳能板驱动产生 100 μrad 的角振动,在 100 Hz 处产生 12 μrad 角振动,另外除了谐波振动,还有从 1~200 Hz 的连续振动。因此,振动主要由 PSD 连续扰动和三个谐波分量组成。

日本发射了三轴姿态稳定卫星 ETS-VI,并且首次测量了在轨卫星上光通信终端的角振动情况。卫星上光通信装备主要采用复合轴结构设计,在精跟踪系统中采用跟踪精度均方根(RMS)值小于 1 μrad 的四象限探测器测量振动信号,并通过卫地通信链路传到地面做傅里叶分析。分析结果表明:振动信号频谱基本集中在 1~100 Hz 范围内,角振动总体 RMS 值为 39.0 μrad ,振动频谱与 OLYMPUS 卫星类似,但是在 10 Hz 附近比 LANDSAT-4 高^[12]。

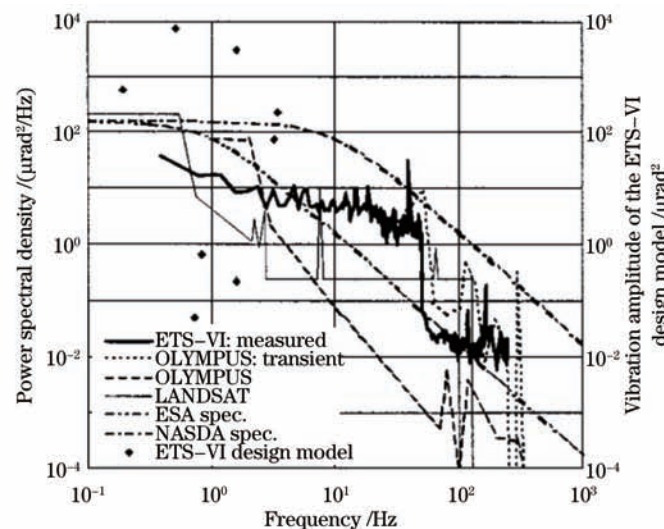


图1 各卫星振动功率谱密度对比

Fig.1 Compare of some satellites' power spectral density of vibration

从各卫星的仿真与实测振动信号可知,卫星平台振动呈现低频高幅、高频低幅的特点,抑制的主要目标应集中在1~100 Hz。

3 振动抑制的PID反馈控制算法设计

3.1 快反镜的对象特性

快反镜(FSM)是采用反射镜面精确控制光束方向的一种装置^[13],由其构成的精跟踪系统与大惯量机架结构的粗跟踪系统组成复合轴跟踪结构,广泛应用于各种光学系统的对准和稳定控制。快反镜没有机械轴承,所以没有摩擦力矩,而且具有质量小、惯量小、线性度好的优点。其结构原理如图2所示。

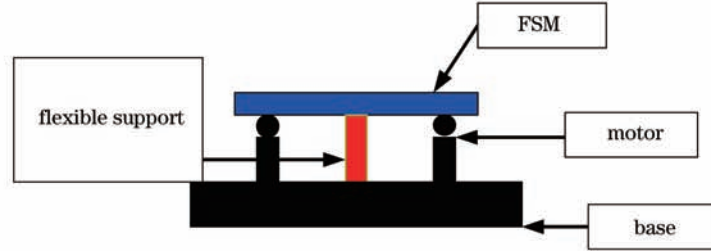


图2 快反镜结构图

Fig.2 Structure of fast steering mirror

通过对快反镜进行动力学分析^[14],可以得到其电压到位移的传递函数:

$$\frac{S}{U} = \left[\frac{1}{(m_1 + m_2)s^2 + b_1s + k_1} \right] \left[\frac{m_2s^2 + b_2s + k_2}{\frac{m_1m_2}{(m_1 + m_2)}s^2 + b_2s + k_2} \right] \left(\frac{1}{L_ms + R_m} \right). \quad (2)$$

式中 S 是快反镜位移, U 是电机电压, k_1 和 k_2 是弹性系数, b_1 和 b_2 是阻尼系数, m_1 是快反镜质量, m_2 是快反镜解耦出去的质量, L_m 是电机电感, R_m 是电机电阻。由传递函数看出其包含一个一阶惯性环节、一个二阶惯性环节以及一个谐振部分。在实际系统中,还会包含一个纯延迟。用频响仪对实验室自行研制的快反镜进行分析,在忽略高阶谐振情况下,得到其拟合函数为

$$G_{FSM}(s) = K \times s \times \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \times \frac{1}{Ts + 1} \times \left\{ \frac{[1 - \exp(-Ts)] \times \exp(-t_0s)}{st} \right\}, \quad (3)$$

其中 $K = 0.29$, $\xi = 0.36$, $\omega = 4.7 \times 2\pi$, $T_0 = 350 \times 2\pi$, $T = 1/5000$ (s), $t_0 = 0.00029$ s。

3.2 精跟踪系统快反镜的PID控制设计

针对快反镜的对象特性,采用零极点对消的方法设计PID参数。设计的目标是在保证系统稳定的情况下获取较大的闭环带宽。设计工具采用Matlab的单输入单输出(SISO)工具箱,PID控制开环特性为相位裕度 75° ,幅值裕度25 dB,其闭环特性如图3所示,系统闭环带宽为230 Hz。

4 自适应前馈控制的引入以及复合控制方法设计

4.1 自适应算法原理

自适应算法广泛应用于信号处理、系统辨识以及控制领域。其中最常用的是最小均方自适应算法。LMS算法由两部分组成:横向滤波器和自适应控制算法。

横向滤波器计算输出对输入的响应,并通过比较结果和期望响应产生误差。实现方式如下:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{u}(n)\mathbf{w}(n)^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \mathbf{y}(n), \quad (5)$$

式中 $\mathbf{u}(n)$ 为输入, $\mathbf{w}(n)$ 滤波器权系数向量, $\mathbf{y}(n)$ 为输出, $\mathbf{d}(n)$ 为期望信号, $\mathbf{e}(n)$ 为误差信号,上标T为转置。

自适应控制算法通过误差信号,以梯度下降最快的方向更新滤波器权值向量:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu\mathbf{u}(n)\mathbf{e}(n), \quad (6)$$

式中 μ 为步长因子。

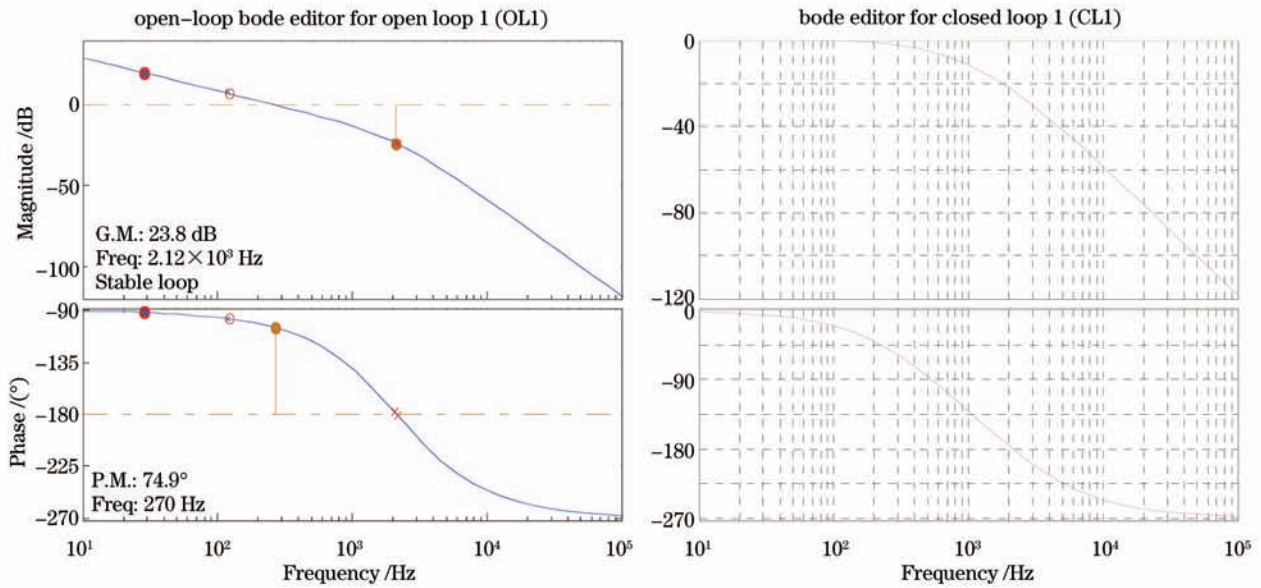


图3 快反镜闭环伯德图

Fig.3 Closed-loop Bode diagram of fast steering mirror

LMS算法用梯度下降的估计值代替精确值,因此简单易行,得到广泛应用。

另一种常用的自适应算法为最小二乘(LS)算法,与LMS不同的是采用误差的平方和最小作为最佳准则,因此其自适应控制算法的权值更新方法不同,一般采用递推的方式实现:

$$K(n) = \frac{\lambda^{-1} Q(n-1)u(n)}{1 + \lambda^{-1} u(n)^T Q(n-1)u(n)}, \tag{7}$$

$$Q(n) = \lambda^{-1} Q(n-1) - \lambda^{-1} K(n)u(n)^T Q(n-1), \tag{8}$$

$$w(n+1) = w(n) + K(n)^T e(n), \tag{9}$$

式中 $K(n)$ 为时变增益向量, $Q(n)$ 为逆相关矩阵。

递推最小二乘(RLS)算法相对于LMS算法具有更快的收敛速度以及更高的收敛精度,但是也增加了系统计算复杂度。

4.2 自适应前馈控制器设计

在前馈控制器设计中,采用被控对象的逆作为控制器,理论上可以达到100%的扰动抑制效果,但是存在多种因素降低了前馈控制的增益:1)受限于快反镜的功率变换器;2)振动测量的延迟因素;3)被控对象特性的变化。振动的测量延迟本身可以看做是被控对象的相位特性发生变化,被控对象从地面进入太空环境后系统参数会发生变化,因此被控对象特性的变化是影响控制器性能的关键。而采用自适应前馈扰动控制,可以针对被控对象特性变化实时调节权值系数,以减少对象特性变化对前馈控制器的不利影响。

图4是自适应前馈扰动控制的结构原理图,扰动的测量值以及精探测器的误差信号作为自适应算法的

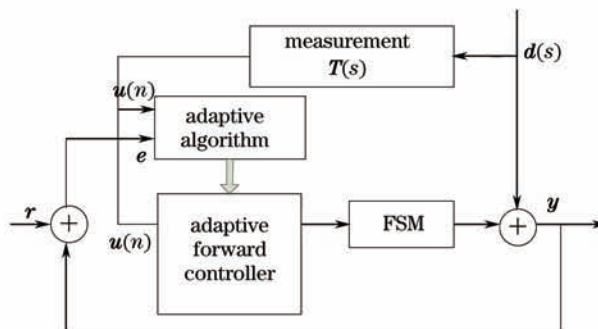


图4 自适应前馈控制结构

Fig.4 Structure of adaptive forward control

输入,更新前馈控制器的权值,另外扰动信号还作为前馈控制器的输入。自适应算法可以采用LMS算法或者RLS算法。

4.3 反馈和前馈的复合控制设计

文献[14-17]指出,对于窄带的高频扰动,自适应扰动前馈控制的抑制效果比反馈PID控制好,对于宽带扰动,自适应扰动前馈控制的抑制效果不如PID。因此,考虑结合两种控制算法的共同优点,设计复合的控制结构,如图5所示。其中,自适应算法采用LMS算法和RLS算法以探究前馈结构中采用的自适应算法的收敛速度和稳态精度对于复合控制结构的扰动抑制效果的影响。

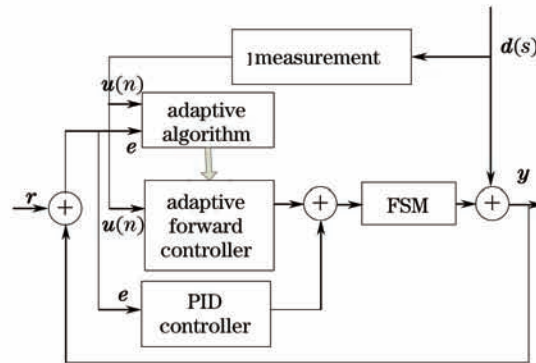


图5 自适应复合控制结构图

Fig.5 Structure of adaptive composite control

5 仿真实验

在Matlab的simulink中搭建PID控制、PID和LMS的复合控制以及PID和RLS的复合控制的仿真实验。仿真系统采样率为5kHz,在此频率下对快反镜和PID控制器进行离散化。LMS算法中为了保证高频的稳定性,步长参数取0.005。RLS算法遗忘因子 $\lambda = 0.998$,相关矩阵的逆矩阵 $Q(0)$ 初始化为 $0.1I$ (I 为单位矩阵)。

为了验证复合控制结构在窄带中频的扰动抑制效果以及模拟卫星实际振动情况,仿真中扰动输入为宽带扰动加上窄带扰动,其中宽带扰动为一高斯噪声通过低通滤波器生成,窄带扰动为1 Hz、50 Hz以及100 Hz的正弦扰动相加。图6是三种控制算法对扰动抑制的时域效果。PID控制的均方误差(M_{SE})为 2.40×10^{-5} ,LMS复合控制为 1.32×10^{-6} ,RLS复合控制为 7.50×10^{-6} ,可以看出复合控制算法具有更好的扰动抑制效果。

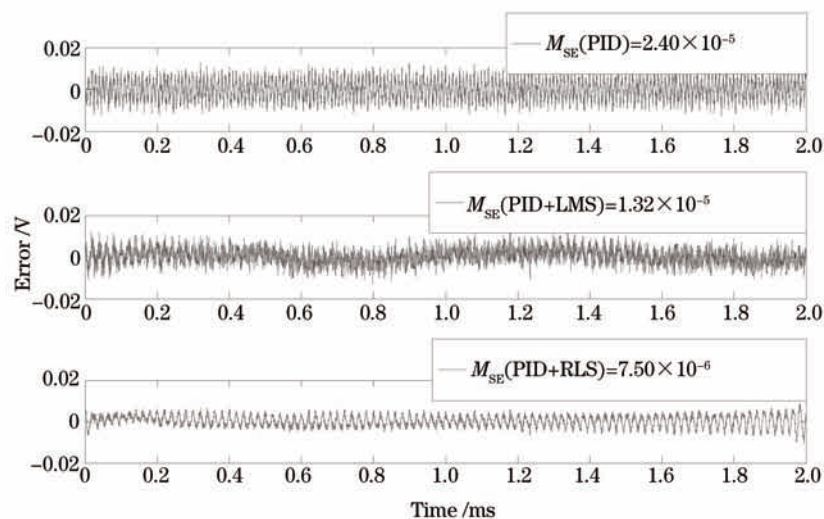


图6 三种控制算法的时域比较

Fig.6 Comparison of three control algorithms in time domain

在频域验证算法的性能,扰动信号采用1~120 Hz的扫频信号,图7是三种控制算法对不同频率扰动信号的抑制效果。复合控制算法在中高频对扰动抑制效果更好,采用RLS算法的复合控制算法对中频的抑制效果最好,而且在整个频域都有更好的抑制效果。

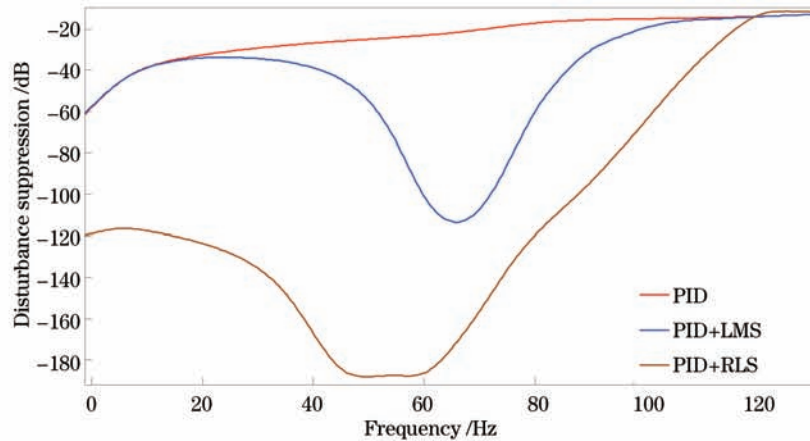


图7 三种控制算法的频域比较

Fig.7 Comparison of three control algorithms in frequency domain

6 结 论

分析了卫星平台振动信号的特点,针对经典反馈控制对中高频窄带振动抑制能力较差的情况,提出用前馈控制抑制中高频振动。前馈控制器采用自适应算法以减少被控对象特性变化引起的增益损失。在此基础上,设计了经典反馈加前馈的复合控制结构,并仿真验证了PID控制算法、LMS复合控制算法以及RLS复合控制算法的性能。从仿真结果可以得出,在时域上相对于PID算法,LMS复合控制算法的性能提高了80%,RLS复合控制算法的性能提高了2倍。在频域上,LMS复合控制算法在70 Hz附近窄带抑制效果明显比PID算法好,而RLS复合控制算法在整个目标频率范围内都比前两种算法效果好。仿真结果表明自适应前馈算法的引入增强了对中高频的窄带振动抑制效果,采用更快收敛速度以及更高稳态精度的自适应算法可以在整个频域获得更好的振动抑制效果。

参 考 文 献

- 1 Li Rongling, Shang Hui, Lei Yu, *et al.*. Research of key enabling technologies for high-speed visible-light communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 050003.
李荣玲, 商慧亮, 雷雨, 等. 高速可见光通信中关键使能技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 050003.
- 2 Jia Kejun, Zhao Yangang, Chen Hui, *et al.*. Analysis and methodology study of bit error performance of FSO system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 030603.
贾科军, 赵延刚, 陈辉, 等. 无线光通信系统误码性能分析及方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 030603.
- 3 Hamid Hemmati. *Deep Space Optical Communications* [M]. Wang Ping, Sun Wei, Transl.. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. 277-280.
赫马提. *深空光通信*[M]. 王平, 孙威, 译. 北京: 清华大学出版社, 2009. 277-280.
- 4 Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, *et al.*. Positioning accuracy of spot-detecting camera in acquisition, tracking, pointing system [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205007.
钱峰, 贾建军, 张亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205007.
- 5 Lü Chunlei, Tong Shoufeng, Song Yansong. Optical-path optimization design of compound axis and APT study of airborne laser communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(6): 649-653.
吕春雷, 佟首峰, 宋延嵩. 机载光通信复合轴光路优化设计和跟瞄技术研究[J]. *光子学报*, 2012, 41(6): 649-653.
- 6 Hu Xiuhuan, Zhou Tianhua, He Yan, *et al.*. Design and analysis of underwater optical communication transceiver system based on digital signal processor [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0305003.
胡秀寒, 周田华, 贺岩, 等. 基于数字信号处理机的水下光通信收发系统设计与分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0305003.

- 7 Shinhak Lee, James W Alexander, Gerry G Ortiz. Sub-microradian pointing system design for deep-space optical communications [C]. SPIE, 2001, 4272: 104-111.
- 8 K J Held, J D Barry. Precision optical pointing and tracking from spacecraft with vibrational noise [C]. SPIE, 1986, 616: 160-173.
- 9 Victor A Skormin, Mark A Tascillo. Jitter rejection technique in a satellite-based laser communication system [J]. Opt Eng, 1993, 32(11): 2464-2769.
- 10 Gerardo G Ortiz, Angel Portillo, Shinhak Lee, *et al.*. Functional demonstration of accelerometer-assisted beacon tracking [C]. SPIE, 2001, 4272: 112-117.
- 11 S Lee, G Ortiz, J W Alexander, *et al.*. Accelerometer-assisted tracking and pointing for deep-space optical communications: concept, analysis and implementations [C]. IEEE Aerospace Conference, 2001, 3: 1559-1564.
- 12 Morio Toyoshima, Yoshihisa Takayama, Hiroo Kunimori. In-orbit measurements of spacecraft microvibrations for satellite laser communication links [J]. Opt Eng, 2010, 49(8): 083604.
- 13 Fu Chenyu, Jiang Tao, Ren Ge, *et al.*. Image tracking system with a fine-steering-mirror [J]. Opto-Electronic Engineering, 1994, 21(3): 1-6.
付承毓, 姜涛, 任戈, 等. 快速反射镜成像跟踪系统[J]. 光电工程, 1994, 21(3): 1-6.
- 14 Larry Edward. Control of a Fast Steering Mirror for Laser-Based Satellite Communication [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- 15 R J Watkins. The Adaptive Control of Optical Beam Jitter [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2004. 30-41.
- 16 B E Batman. Experiments on Laser Beam Jitter Control with Applications to a Shipboard Free Electron Laser [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2007. 20-40.
- 17 M J Beerer. Adaptive Filter Techniques for Optical Beam Jitter Control and Target Tracking [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2008. 15-33.