

基于液晶光调制器的星际激光通信 平台振动补偿系统

倪小龙 刘智 姜会林 刘丹 孔悦

(长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 为了有效地补偿平台振动对星际激光通信系统的影响,设计并构建了基于反射式液晶光调制器的星载平台振动补偿系统。与传统振动补偿系统相比,该系统具有无机械结构、指向精度高、可对高阶像差进行补偿、体积小、重量轻、功耗低等优点,可以解决传统补偿方法的诸多问题。实验结果表明:对于振幅在 $10 \mu\text{rad}$ 以下、振动频率在 $10\sim 100 \text{ Hz}$ 之间的振动,该振动补偿系统的补偿因子高于 0.8,系统残余误差小于 $2 \mu\text{rad}$,满足星际激光通信系统的高动态跟踪精度要求。

关键词 光通信; 星载平台振动补偿; 液晶空间光调制器

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s105007

Space Laser Communication Vibration Compensation System Based on Liquid Crystal Light Modulator

Ni Xiaolong Liu Zhi Jiang Huilin Liu Dan Kong Yue

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract In order to compensate the influence on the inter-satellite laser communication system caused by the vibration of the satellite platform, a space-borne platform vibration compensation system is designed and constructed based on the reflection liquid crystal light modulator. Compared with the traditional vibration compensation system, it has the advantages of non-mechanical structure, high pointing accuracy, small volume, light weight, low power consumption and compensation for the higher-order aberration, so that many problems of the traditional compensation method can be overcome. As shown in the experimental results, the compensation factor is better than 0.8, and the residual error is less than $2 \mu\text{rad}$ when the frequency of angular vibration ranges from $10\sim 100 \text{ Hz}$ and the amplitude is lower than $10 \mu\text{rad}$, which meet the high dynamic accuracy demands of inter-satellite laser communication system.

Key words optical communications; space-borne platform vibration compensation; liquid crystal spatial light modulator

OCIS codes 060.4510; 060.2605; 140.3300; 350.1260

1 引言

空间激光通信系统在正常通信时需要有很高的动态跟踪精度。对于星际激光通信系统来说动态跟踪精度通常为微弧度量级。卫星在轨运行期间,由卫星导航控制系统和星载器件运动等产生的低频扰动和高频振动是跟踪伺服系统的主要干扰源,严

重地影响了星际激光通信系统的跟踪精度,降低了平均接收光功率,增加了误码率。对卫星平台振动的补偿是星际激光通信的关键技术之一^[1-4]。

星载平台振动的补偿,一般多采用快速倾斜镜作为振动补偿器件。但卫星在轨运行期间,由于太空环境比较复杂,所以传统的器件在星载平台的应用上具

收稿日期: 2013-06-12; **收到修改稿日期**: 2013-09-09

作者简介: 倪小龙(1988—),男,博士研究生,主要从事液晶光调制技术、自适应光学等方面的研究。

E-mail: nixiaolong@gmail.com

导师简介: 姜会林(1945—),男,博士,教授,主要从事光学系统设计、光学 CAD 技术、医用光学仪器、光电仿真技术、光电检测技术、激光通信技术等方面的研究。E-mail: hl_jiang@cust.edu.cn

有很大的局限性。采用基于微机电系统(MEMS)技术的液晶空间光调制器作为振动补偿器件的方法与传统方法相比,主要具有以下三方面优势:1)液晶空间光调制器为可编程的一维衍射光束偏转阵列,通过在阵列上下加载变阶的相位楔形图,即可实现非机械式的光束偏转,相当于一个可编程的衍射相位光栅,因此,其对光束的偏转过程无机械运动,不存在光束指向偏差与不稳定的问题;2)由于液晶是通过改变入射光束波前相位来实现光束的偏折的,所以其可以很方便地加入对高阶像差的补偿,在对星载平台振动的补偿基础上,加入对大气湍流、温度变化的补偿;3)采用液晶空间光调制器作为星载平台振动的补偿器件增加了系统的集成度,减小了系统的体积且减轻了其重量,降低了发射成本,并可以实现气密、真空等多种形式的封装,大大增加系统的稳定性和对复杂环境的适应能力^[5]。

本文采用基于MEMS技术的三轴加速度测量芯片和反射式液晶空间光调制器,设计并构建了星际激光通信星载平台振动补偿系统,并且采用半实物半仿真的方式论证了振动补偿系统对振动的补偿性能。

2 卫星平台振动对激光通信的影响

卫星平台的振动主要分为平动和角振动,对于星际激光通信来说,微小的平动对于远距离激光通信的影响可以忽略,因此对星际激光通信平台振动的研究主要考虑角振动的影响。假设发射光束的能量分布为中心对称的高斯分布,故只需考虑一维情况。对于星际激光通信而言,通信距离通常在数千公里以上,相比于通信光束直径,接收端天线的半径很小,故在接收面上接收机可近似为一点。由高斯光束特性可知,接收机在接收面上任一点接收到的能量 p 与其在轴上接收到的能量 p_0 的比值 $R(\theta)$ 为

$$R(\theta) \approx \exp\left(-2 \frac{z^2 \theta^2}{\omega_z^2}\right), \quad (1)$$

式中 z 为星间距离, θ 为振动偏转角度, ω_z 为高斯光束半径。空间光通信系统常采用开关调制(OOK)编码,发送端发送“1”码时有光输出,发送“0”码时无光输出。接收端光电探测器将接收的光强转换为电压值,与系统设定的判别电压进行比较^[6]。设接收机处在光束中心位置所接收到的能量为 p_0 ,若发射机的角振动引起光束摆动,则接收机接收到的能量将不再是 p_0 。如果取 $p_T = p_0/2$ 作为接收机的判别阈值,则有

$$\theta_T = \sqrt{\frac{\omega_z^2 \ln 2}{2z^2}}. \quad (2)$$

如果 $|\theta| > \theta_T$,则此时接收机接收到的能量会低于阈值 p_T ,产生误码。不考虑其他噪声影响,误码率(R_{BE})为^[7-9]

$$R_{BE} = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\theta_T}{\sqrt{2}\theta}\right) \right]. \quad (3)$$

3 振动补偿系统的组成及工作原理

3.1 卫星平台振动补偿系统的组成

卫星平台振动补偿系统,由振动探测系统、控制系统和液晶振动补偿系统三部分构成。其原理如图1所示。

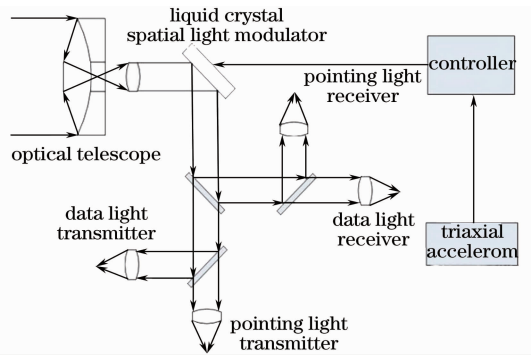


图1 振动补偿系统原理图

Fig. 1 Diagram of vibration compensation system

振动补偿系统位于光学望远系统之后,卫星在轨运行期间由安装在激光通信平台上的三轴加速度计测量光通信平台的振动,实时的振动信息被传递到控制系统,由控制系统生成控制信号,控制液晶空间光调制器对振动进行补偿。

3.2 振动探测系统的工作原理

采用基于MEMS技术的三轴加速度测量芯片作为振动探测器件,当平台作加速运动时,加速度计内的质量块就受到惯性力的作用向相反的方向运动。质量块发生的位移受到弹簧和阻尼器的限制,通过输出电位移而产生的电压就能测得外界的加速度大小,进而实时测量载荷平台沿X、Y、Z轴三个方向的平动加速度和绕着X、Y、Z轴三个轴转动的转动加速度。通过对星载平台的六自由度数据的采集便可以实现对平台振动的探测。

3.3 振动补偿系统的工作原理

平台振动的补偿系统采用基于MEMS技术的液晶空间光调制器来实现。由于卫星平台的振动产生的噪声多为宽频噪声,而对于液晶器件来说,低频响应一般比较好,但是响应速度的提高一直是液晶材料

需要解决的问题,所以要求液晶空间光调制器具有很高的响应频率,这样才能达到补偿的效果。与透射式液晶空间光调制器相比,反射式空间光调制器具有更高的响应频率,有些产品响应频率可以达到 1 kHz。

反射式液晶空间光调制器的核心部件是一个液晶盒,基本结构类似于三明治,在大规模集成电路的基座上,正方形像素电极和反射镜阵列作为电路驱动电极,反射镜上覆盖着一层数微米厚的液晶材料,液晶被玻璃盖板覆盖,玻璃盖板内表面覆盖着一层导电薄膜。液晶空间光调制器的结构如图 2 所示。

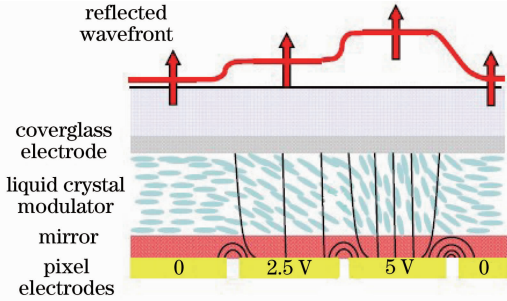


图 2 液晶空间光调制器结构图

Fig. 2 Structure of liquid crystal spatial light modulator

液晶空间光调制器工作时,入射光进入装置的顶部,透过玻璃罩、透明电极和液晶层,照射到像素电极上,并被像素电极上的反射镜反射。驱动信号通过引脚上的集成电路传递给像素电极,电压使像素电极和覆盖电极之间产生电场,电场改变中间液晶层的排列,进而实现对光束的偏折作用。

4 振动补偿系统的算法与控制

4.1 波前斜率法

液晶空间光调制器实现光束偏折的原理类似于闪耀光栅,在器件的驱动电极上施加一定的电压,使入射光波通过器件的相位调制后获得周期性锯齿状相位延迟分布,形成一个闪耀光栅,从而实现光束的偏转。光束偏转角度 θ 由光栅方程决定^[10]。

$$\sin \theta + \sin \theta_{inc} = \lambda / \Delta, \quad (4)$$

式中 θ_{inc} 为入射角, λ 为入射光波长, Δ 为光栅周期。形成相位光栅的基本原理是通过对液晶分子施加电场,改变其排列状态来实现对入射光波的相位的调制。入射光束的波前相位畸变 $\phi(x, y)$ 可以用波前校正器的各个驱动器的影响函数 $F_j(r)$ 展开,设输入信号 V_j 是加载于第 j 个驱动器上的有效电压,则有

$$\phi(x, y) = \sum_{j=1}^n V_j F_j(r), \quad (5)$$

式中 n 为相位调制器上的液晶单元个数。相位调制

器的驱动结构影响函数是指在单个驱动器上施加单位控制电压后,相位变化的分布函数。将(5)式表示为下述的矩阵模式:

$$\mathbf{G} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{V}, \quad (6)$$

式中 \mathbf{G} 为波前相位斜率向量, \mathbf{F} 为相位调制矩阵。采用奇异值分解法便可以求出相位调制矩阵 \mathbf{F} 的广义逆矩阵 \mathbf{F}^+ , 求出相位调制器上的各驱动结构的控制电压

$$\mathbf{V} = \mathbf{F}^+ \cdot \mathbf{G}. \quad (7)$$

4.2 相位调制与控制反馈

振动补偿系统采用闭环负反馈的方式工作,这种方式可以减小系统的校正滞后,保证系统稳定工作。系统工作时三轴加速计实时测量系统的振动情况并将振动信息传递给控制器,控制器对接收到的信息进行处理,得到控制电压信号并输出,输出信号通过 D/A 转换后再进行信号放大,信号放大后的输出信号控制液晶的分子,改变其排列状态,实现可控的相位调制。振动补偿系统的控制原理图如图 3 所示。

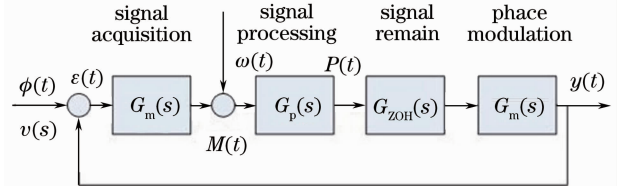


图 3 振动补偿系统控制原理图

Fig. 3 Diagram of vibration compensation control system

在振动补偿系统控制器的设计中使用三种传递函数来全面表示系统的控制特性,这三种传递函数分别为开环传递函数、闭环传递函数和误差传递函数。系统的开环传递函数为

$$G_o(s) = G_m(s)G_p(s)G_{zoh}(s)G_s(s), \quad (8)$$

式中 $G_m(s)$ 信号采集部件参数的函数; $G_p(s)$ 为信号处理部件参数的函数; $G_{zoh}(s)$ 为信号采样保持部件参数的函数。

闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{G_o(s)}{1 + G(s)}, \quad (9)$$

误差传递函数为

$$G_s(s) = \frac{1}{1 + G(s)}. \quad (10)$$

每一组液晶微透镜阵列对应一个校正单元,运用最小二乘法或者其他优化算法,得到一个相位调制量。依据(7)式倒推出一个反馈矩阵,得到控制电压分量。依据所得到的控制电压分量控制液晶透镜子单元中液晶分子指向矢的改变,达到相位调制的目的,

实现对光束的偏折^[11-12]。

5 振动补偿系统的补偿结果与分析

目前,对卫星平台的振动仿真方法主要有物理实验模拟和数学建模仿真两种。由于各种航天器的振动谱分布并不一致,所以通过建立仿真系统进行实验模拟的物理实验模拟法存在一定的局限性,很难对复杂的振动形式进行仿真,所以从安全性、可行性和合理的成本上考虑,使用实验模拟的方法进行仿真和验证是不现实的。而传统的通过 Simulink 等采用因果建模进行仿真的方法,要将系统分解成具有因果联系的结构框图,研究模型的物理学特性,得到描述系统特性的常微分方程,再把这些常微分方程进行转换,以框图的形式加以实现,这是非常繁重和耗时的工作,并且容易出现错误,无法应对复杂的多领域物理系统^[13]。基于上述分析,本实验采用半实物半仿真的方法对星载平台振动补偿系统性能进行测试。首先,由计算机对星载平台振动进行仿真,并通过星载平台振动补偿系统 MEMS 芯片和控制器对平台振动情况进行采集与分析,生成相应的控制信号,加载到液晶空间光调制器上对光束进行控制,使光束发生偏折。然后,由四象限探测器采集光束的偏折量,将偏折信息传入计算机,由计算机将该信息与振动量进行拟合输出实际的振动补偿效果。星载平台振动补偿系统测试平台结构如图 4 所示。

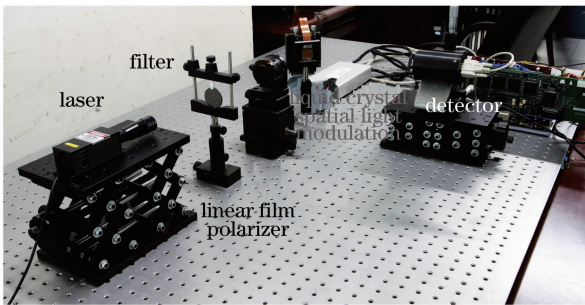


图 4 测试平台结构图

Fig. 4 Diagram of test platform

系统的核心部件,基于 MEMS 的液晶空间光调制器采用的是美国 BNS 公司的 Model P12288 型液晶空间光调制器。该液晶空间光调制器光束调制面尺寸为 19.66 mm×19.66 mm,对光束的调制时间小于 5 ms。对光束的最大偏转角为±7°。测试系统采用波片 808 nm 的半导体激光器作为光源,激光器发散角为 0.02 mrad。通过振动补偿因子 η 来评价星际激光通信振动补偿系统对星载平台振动的补偿效果:

$$\eta = 1 - \frac{\omega_{\min}}{\omega_{\max}}, \quad (11)$$

式中 ω_{\min} 为补偿后的信号平均幅值, ω_{\max} 为补偿前的信号平均幅值。 η 越接近 1,则系统对振动的补偿效果越好; η 越接近 0,则系统对振动的补偿效果越差。

卫星平台的振动频率多为宽谱噪声,从振动频率这个角度来说,卫星平台的振动分为由卫星刚体运动引起的低频振动和由卫星有效载荷的运动引起的中频和高频的振动。对星际激光通信影响最大的振动频率集中在 10~100 Hz 之间,振幅在 10 μ rad 以下,并且多数具有周期性^[14]。首先选取测试平台的振动频率为 $f=10$ Hz,振幅为 10 μ rad。设定四象限探测器的采样频率为 1 kHz,采样时间 $T=2$ s 对系统进行测试。测试结果的示波器图形如图 5 所示,其中图 5(a)为未开启振动补偿系统时的振动曲线,图 5(b)为开启振动补偿系统后的振动曲线。

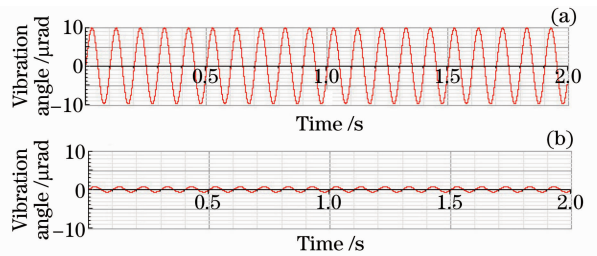


图 5 10 Hz 时角振动对比图。(a) 振动补偿前;
(b) 振动补偿后

Fig. 5 Comparison of vibration at 10 Hz. (a) Without vibration compensation; (b) with vibration compensation

可以看到对于振动频率为 10 Hz,振幅小于 10 μ rad 的振动,振动补偿系统对振动进行了较好的补偿,系统的振动补偿因子 η 高达 0.93,系统的残余误差小于 0.7 μ rad。证明了振动补偿系统对于低频振动补偿的有效性。为了进一步研究振动补偿系

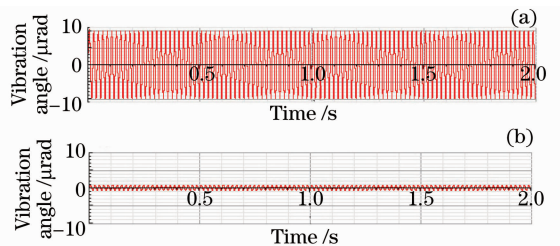


图 6 50 Hz 时角振动对比图。(a) 振动补偿前;
(b) 振动补偿后

Fig. 6 Comparison of vibration at 50 Hz. (a) Without vibration compensation; (b) with vibration compensation

统对高频振动补偿的性能,在前面实验的基础上进一步提高平台振动频率,选取振动频率为 50 Hz, 100 Hz 分别进行实验,实验结果的示波器图形如图 6,7 所示。

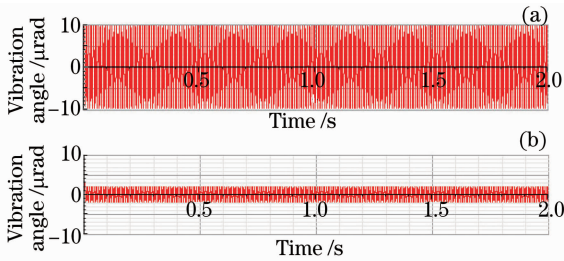


图 7 100 Hz 时角振动对比图。(a) 振动补偿前;
(b) 振动补偿后

Fig. 7 Comparison of vibration at 100 Hz. (a) Without vibration compensation; (b) with vibration compensation

可以看到随着振动频率的增加,振动补偿系统对振动的补偿效果有所下降,在 50 Hz 时,系统的振动补偿因子 η 为 0.9,系统的残余误差为 $1 \mu\text{rad}$ 。此时振动补偿系统对振动的补偿仍然十分有效,补偿性能下降不明显。但是,当振动频率提高到 100 Hz 时,振动补偿因子 η 下降到 0.8,但系统残余误差仍控制在 $2 \mu\text{rad}$ 以内,满足激光通信系统对于动态跟踪精度的要求。振动补偿系统对振动的补偿性能下降十分明显,这主要是受到系统的执行器液晶光调制器带宽的限制,若采用更高带宽的液晶光调制器作为系统的振动补偿器件,则对于高频振动的补偿性能还可以进一步提高。可见本振动补偿系统对于振动频率在 10~100 Hz,振幅小于 $10 \mu\text{rad}$ 的振动有很好的补偿效果。

6 结 论

根据星际激光通信系统高动态跟踪精度、体积小、重量轻的要求,设计并构建了基于反射式液晶光调制器的星载平台振动补偿系统,并介绍了该振动补偿系统的结构和工作原理。最后,构建了验证实验系统对振动补偿系统的性能进行了验证。实验结果证明:基于液晶光调制器的振动补偿系统对于振动频率在 10~100 Hz,振幅小于 $10 \mu\text{rad}$ 的角振动有很好的补偿效果,振动补偿因子高于 0.80,系统残余误差小于 $2 \mu\text{rad}$,满足星际激光通信系统要求。本系统为空间光通信卫星平台振动的补偿提供了一个新的选择。

参 考 文 献

- Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The Technologies and Systems of Space Laser Communication [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 27-29.
姜会林, 佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. 27-29.
- Gerardo G Ortiz, William H Farr, Virginio Sannibale. A Sub-Hertz, Low-Frequency Vibration Isolation Platform [Z/OL]. NASA'S Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, Saturday, January 01 2011. <http://www.techbriefs.com/Comporrent/content/article/9011>.
- Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.*. Optical principle research of space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006003.
姜会林, 胡源, 丁莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006003.
- Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Liu Liren, *et al.*. Effect of aberration on performance of the bit error rate in an inter-satellite coherent optical communication receiving system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0106002.
刘宏展, 纪越峰, 刘立人. 像差对星间相干光通信接收系统误码率性能的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0106002.
- Olav Solgaard. Photonic Microsystems[M]. Huang Qing'an, Yu Hong, Lei Wei, *et al.* Transl.. Nanjing: Southeast University Press, 2011. 2-7.
Olav Solgaard. 光子微系统[M]. 黄庆安, 于虹, 雷威, 等译. 南京: 东南大学出版社, 2011. 2-7.
- Ding Tao, Xu Guoliang, Zhang Xuping, *et al.*. Control of bit error rate introduced by platform vibration for free space optical communication[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(4): 499-502.
丁涛, 许国良, 张旭苹, 等. 空间光通信中平台振动对误码率影响的抑制[J]. 中国激光, 2007, 34(4): 499-502.
- Ma Jing, Tan Liying, Jin Enpei, *et al.*. Analysis of influence of vibration to bit error rate for a system of space optical communication[J]. Journal of Astronautics, 1999, 20(3): 76-81.
马晶, 谭立英, 金恩培, 等. 振动对空间光通信系统误码率影响的分析[J]. 宇航学报, 1999, 20(3): 76-81.
- Morio Toyoshima, Yoshihisa Takayama, Hiroo Kunimori, *et al.*. In-orbit measurements of space craft microvibrations for satellite laser communication links[J]. Opt Eng, 2010, 49(8): 083604.
- Wang Xiang, Zhao Shanghong, Shi Lei, *et al.*. Performance analysis of inter-high altitude platform optical links with pointing errors modeled by Hoyt distributions [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1005002.
王翔, 赵尚弘, 石磊, 等. 基于 Hoyt 光束指向模型的高空平台间光链路性能仿真[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1005002.
- Zhang Jian, Xu Lin, Wu Liying, *et al.*. Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array[J]. Acta Photonic Sinica, 2008, 37(8): 1497-1052.
张健, 徐林, 吴丽莹, 等. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. 光子学报, 2008, 37(8): 1497-1052.
- Yu Di. Simulation Research on Adaptive Wavefront Correction System Based on Liquid Crystal Microarray [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
喻迪. 基于液晶微透镜阵列的自适应波前校正系统仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- Lane R G, Tallon M. Wave-front reconstruction using a Shack-Hartmann sensor[J]. Appl Opt, 1992, 31(32): 6902-6908.
- Ni Xiaolong, He Jingyi, Kong Yue, *et al.*. New Method to Build a Satellite Vibration Simulation Platform with Six Degrees of Freedom[R]. Changchun, 2012.
- Geng Wenbao, Zhai Linpei, Ding Yalin. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(2): 314-320.
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.