

自适应光学系统内光路的像差校正研究

蒋鹏志 马浩统 邹永超 杜少军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 自适应光学系统内光路像差的校正对获得好的光束质量至关重要。实际中采用的校正方案是常规共轭式自适应光学。然而系统菲涅耳数较小时,激光在传输过程中的衍射效应严重影响着系统内光路像差的校正效果。基于随机并行梯度下降算法模拟了不同程度衍射效应(以菲涅耳数表征)下的校正效果,模拟结果表明,像差校正效果随着菲涅耳数的变小而变差。同时在此基础上提出了改进方案,并基于双液晶空间光调制器进行了实验研究。模拟和实验结果均表明,同等条件下改进方案的校正效果明显优于常规共轭式自适应光学校正方案的校正效果,且前者像差校正效果几乎不受衍射效应的影响。

关键词 自适应光学;相位校正;菲涅耳数;光学像差

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1214002

Study of Aberration Correction in Light Path of Adaptive Optical System

Jiang Pengzhi Ma Haotong Zou Yongchao Du Shaojun

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The correction of the aberrations in light path of adaptive optical system is of great importance. However, the diffraction effect of the laser beam propagation in the adaptive optical system limits the correction effect of the aberration. By means of stochastic parallel gradient descent, correction effect under different Fresnel numbers is calculated, and an improved method is proposed. The simulated and experimental result indicates that the compensative effect decreases with the decrease of Fresnel numbers, and the correction effect of the improved solution is better than the traditional solution, and little influence of the diffraction effect is on the correction effect of the aberration with the former.

Key words adaptive optics; phase correction; Fresnel number; optical aberration

OCIS codes 140.3290; 010.1290; 010.1300; 010.1285

1 引 言

在自适应光学系统中,需要对光束进行控制以获得好的光束质量,从而将系统输出的激光能量最大限度地集中到目标上^[1~3]。激光光束质量受到很多因素的影响,这些因素可以归结为三类^[1~6]:第一类是内光路中发生的与像差有关的因素,主要有承受强激光的光学镜的热畸变、光学镜的失形和几何像差等;第二类是内光路中发生的非相位的因素,如激光器增益介质不均匀性造成的像差等;第三类是

大气传输对光束质量的影响,主要是湍流和热晕对光束质量的影响。

为了校正自适应系统内光路中第一类像差对光束质量的影响,目前国内外普遍采用的方法是常规共轭式自适应光学^[7~9](本文定义其为传统方案)。其工作原理是:发射端一束信标激光反向通过内光路,波前传感器探测信标激光的入射波前位相,波前控制器控制变形镜,最终使主激光在内光路传输中的像差达到校正。然而系统菲涅耳数较小时,激光

收稿日期: 2011-06-02; **收到修改稿日期**: 2011-07-08

作者简介: 蒋鹏志(1987—),男,硕士研究生,主要从事光束控制方面的研究。E-mail: jiangpengzhi@163.com

导师简介: 杜少军(1972—),男,研究员,主要从事高能激光传输方面的研究。E-mail: d_sj@tom.com

在传输过程中的衍射效应作为一个不可忽略的因素,对系统内光路像差的校正效果有着严重影响。

本文将激光在传输中的衍射效应作为影响自适应系统内光路像差校正效果的因素之一进行研究。针对此问题建立仿真模型,研究不同程度衍射效应对传统方案像差校正效果的影响。同时,在此问题的基础上提出了改进方案,通过模拟与实验对比传统和改进方案的校正效果。

2 传统方案仿真与分析

2.1 仿真模型的建立

图 1 为基于随机并行梯度下降 (SPGD) 算法^[10~12]的自适应系统内部光学像差校正传统方案的仿真模型。图 1 中,实线为主激光传输光路;虚线为信标光传输光路(为方便光路说明将实线与虚线错开,下同);点划线为传感、控制信号传输方向。系统工作原理:信标激光反向通过内光路记录其像差信息,采用 SPGD 算法由变形镜得到此像差信息,主激光经过带有此像差信息的变形镜校正后,系统

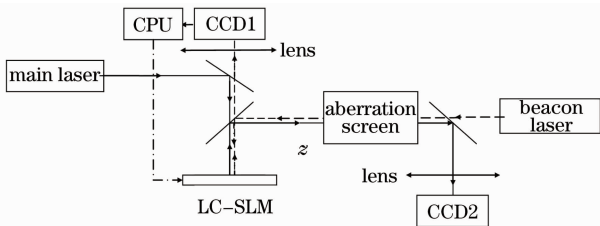


图 1 系统内部光学像差传统校正方案仿真模型框图

Fig. 1 Simulation block diagram of traditional solution of aberration correction in the system

内光路像差得到校正。其中信标光、CCD1、液晶空间光调制器(LC-SLM)和 SPGD 优化算法构成闭环系统,实现对内光路像差的探测;CCD2 则用于观察像差校正效果。

仿真中信标光和主激光均采用平顶光束(超高斯分布)^[6],光束半径为 3 mm,超高斯阶数为 12 阶。波前像差采用 Zernike 多项式的线性组合表示,其表达式为

$$\varphi(r, \theta) = \sum_{k=1}^p a_k Z_k(r, \theta),$$

式中 a_k 是第 k 项 Zernike 多项式系数, p 是采用的多项式总项数, $Z_k(r, \theta)$ 是第 k 项 Zernike 多项式的二维极坐标表达式^[13,14]。液晶空间光调制器相位生成采用模式法,以系数 a_k 为变量,变量总数 p 取 120 项。像差生成则取 $k=4$ 生成离焦像差, $k=5$ 生成像散像差,总像差的大小通过两者系数来调节。以桶中功率(PIB,其定义为给定激光光斑半径内包含功率与激光光斑总功率之比)作为性能评价函数,激光半径选取近似一倍衍射极限。

2.2 仿真结果与分析

根据仿真模型使用 Matlab 软件编写 SPGD 算法的仿真程序,像差屏采用离焦和像差(峰谷值 d_{PV} 分别为 1.5λ 和 1.5λ)的组合。通过模拟,图 2(a), (b)分别为菲涅耳数为 28.2 和 8.5 时的校正后远场光强分布(图左上和右下为其对应方向的截面图)和性能评价收敛曲线(见图左下,纵坐标为对应步数时 PIB 与校正前时 PIB 的比值);图 3 则分别表示其校

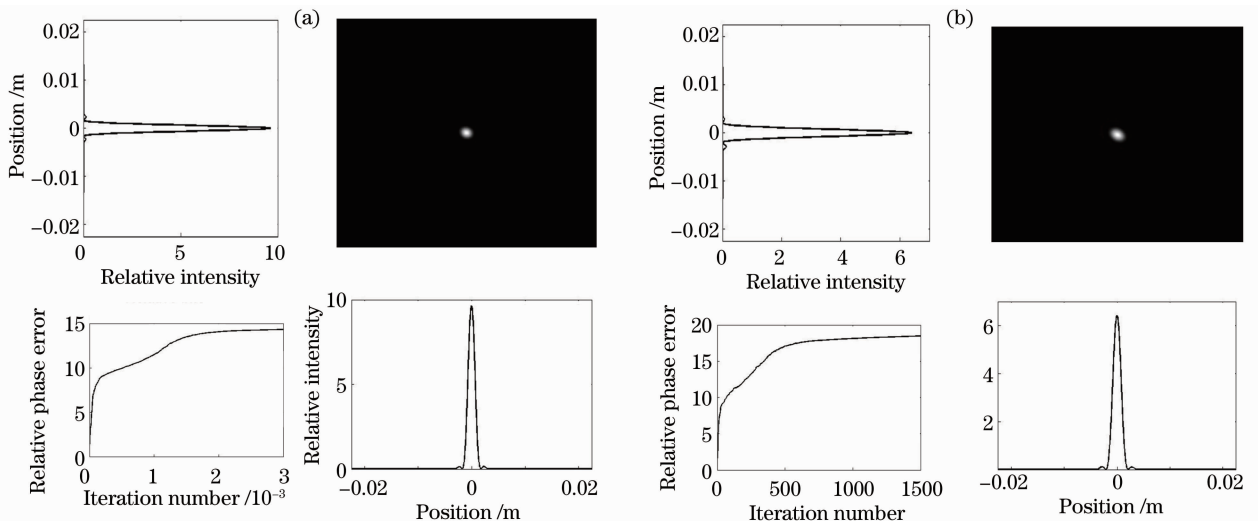


图 2 不同菲涅耳数下光学像差的校正效果。(a)菲涅耳数为 28.2; (b)菲涅耳数为 8.5

Fig. 2 Aberration-correction effects under different Fresnel numbers: (a) 28.2; (b) 8.5

正后光束的远场桶中功率曲线。从图 2,3 可以看出,菲涅耳数为 28.2 时传统方案的像差校正效果明显优于菲涅耳数为 8.5 时的校正效果。

图 4(a)为同等条件下 4 种菲涅耳数 N_F 下校正

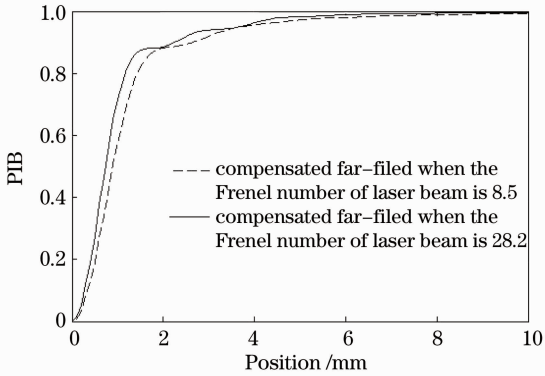


图 3 校正后光束的远场桶中功率曲线
Fig. 3 Far-field power-in-bucket curves of compensated beam

后光束远场桶中功率曲线;图 4(b)为“桶”的直径取艾里斑直径时,桶中功率随菲涅耳数变化的曲线。菲涅耳数为判断衍射效应大小的一个重要物理量,当菲涅耳数远远小于 1 时为夫琅禾费衍射范围,而当菲涅耳数远远大于 1 时衍射效应可以忽略,几何光学近似成立。由图 4(b)可知,如果定义桶中功率小于 0.82 时,校正效果不能接受,则系统要想得到预期的校正效果其对应菲涅耳数至少需大于 6。从图 4 可以看出:传统方案的像差校正效果随着菲涅耳数的减小而变差。此现象产生的本质原因是由于自适应光学系统中像差源(等效位置)与校正器之间存在着一段距离,而激光在传输中的衍射效应改变了光束的相位和振幅,波前探测器探测到的波前并不是系统需补偿的真实波前。随着激光光束菲涅耳数的变小,波前探测器探测到的波前与真实波前之间的差异增大,从而导致自适应系统内光路的相位校正效果逐渐变差。

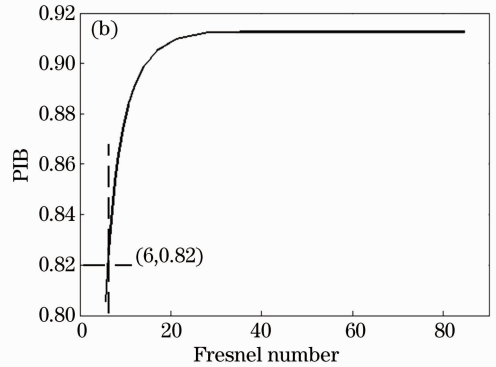
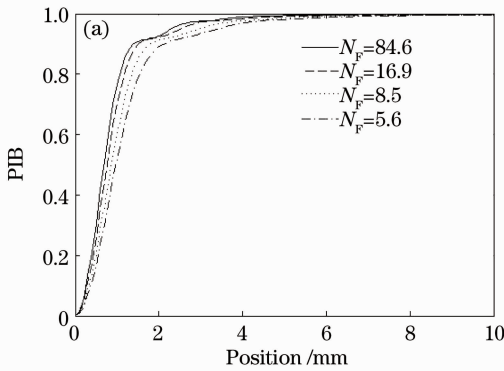


图 4 (a)不同菲涅耳数下校正后光束远场桶中功率曲线; (b)桶中功率随 Fresnel 的变化曲线

Fig. 4 (a) Far-field power-in-bucket curves of compensated beam under different Fresnel numbers; (b) power-in-bucket curves under different Fresnel numbers

3 改进方案仿真与分析

图 5 为基于 SPGD 算法的自适应系统内部光学像差校正改进方案(即优化式自适应光学校正方案)的仿真模型。与传统校正方案的不同之处在于它将信标激光与 CCD1 的位置进行了互换。信标激光与主激光处于同一光路向同一方向传输,能够避免衍射效应等对像差校正效果的影响。

同等条件下,菲涅耳数为 28.2 时改进方案校正效果如图 6 所示。图 6(a)为校正后光束远场光强分布和性能评价收敛曲线;图 6(b)分别表示传统和改进两种方案校正后光束的远场桶中功率曲线。从

图 5,6 可以看出:同等条件下改进方案明显优于传统方案的校正效果。

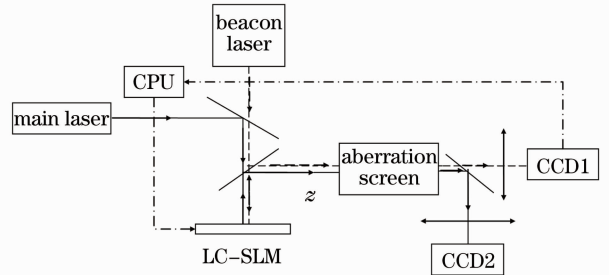


图 5 系统内部光学像差校正改进方案仿真模型框图
Fig. 5 Simulation block diagram of improved solution of aberration correction in the system

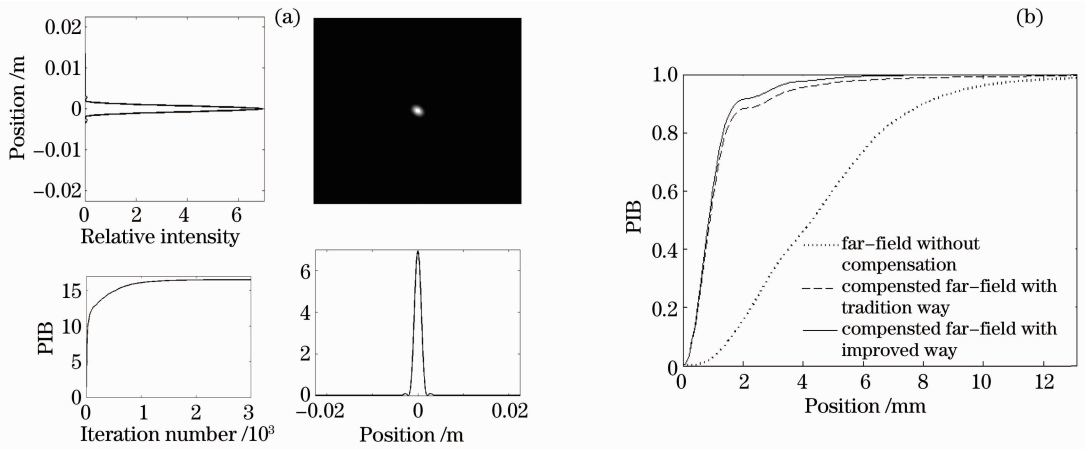


图 6 (a)改进方案校正效果;(b)校正后光束的远场桶中功率曲线对比

Fig. 6 (a) Correction effect of the improved solution; (b) far-field power-in-bucket curves of compensated beam under two solutions

4 两种校正方案对比实验研究

基于以上的理论分析,搭建了实验光路如图 7 所示。其中 CCD-1 相机为 Guppy 系列 F080B 型相机, $1032 \text{ pixel} \times 778 \text{ pixel}$, 像素大小为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$, 每个像素位深 8 bit。CCD-2 相机为 Dolphin F2145B 型 CCD 相机, $1392 \text{ pixel} \times 1040 \text{ pixel}$, 像素大小为 $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$, 每个像素的位深为 12 bit。透镜 1 焦距为 0.68 m, 透镜 2 焦距为 1 m。液晶空间光调制器 (LC-SLM-1) 为美国 BNS 公司生产的 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 纯相位型液晶空间光调制器, 口径为 $6.14 \text{ mm} \times 6.14 \text{ mm}$, 单个像素大小 $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$ 。LC-SLM-2 为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 纯相位型液晶空间光调制器, 口径为 $7.68 \text{ mm} \times 7.68 \text{ mm}$, 单个像素大小 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 。实验中, LC-SLM-2 作为像差产生器, LC-SLM-1 作为校正器。

图 7 中, 1064 nm Nd:YVO₄ 固体激光经过偏振棱镜后与液晶空间光调制器工作方向相同。然后, 经光束准直后经分光棱镜分成信标光(反射光, 光束传输方向如实线所示)和主激光(透射光, 光束传输方向如虚线所示)两束。其具体实验过程主要分为两个部分。第一部分: 传统方案实验。此时光挡板置于 1 处以阻隔主激光, 信标光经过 LC-SLM-2 加载像差, 传输一定距离后利用 SPGD 算法控制程序、CCD-2 和 LC-SLM-1 构成的闭环校正系统, 对光束波前像差进行校正, 记录 LC-SLM-1 产生的校正相位; 然后光挡板置于 2 处, 主激光加载 LC-SLM-1 产生的校正相位, 传输一定距离后再经过 LC-SLM-2 加载像差, 在 CCD-1 处测得其远场光强分布。第二部分: 改进方案实验。光挡板置于 2 处,

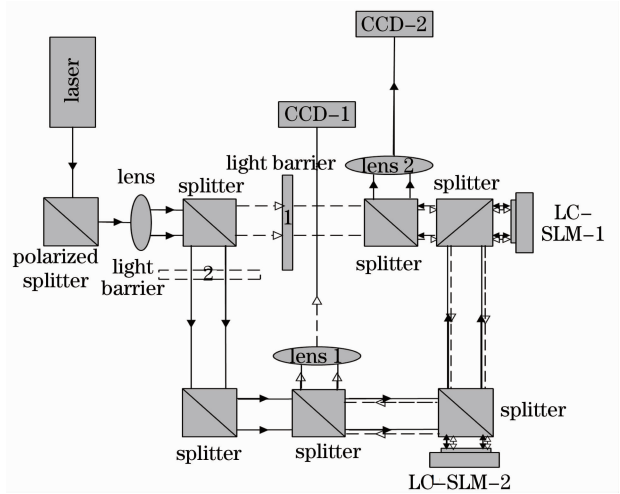


图 7 两种方案对比实验装置图

Fig. 7 Experimental setup of two correction solutions

主激光经 SPGD 算法控制程序、CCD-1 和 LC-SLM-2 构成的闭环校正系统, 对 LC-SLM-1 产生像差进行校正, 在 CCD-1 处测得远场光强分布。

实验中, 激光光斑半径 2 mm, 波长 1064 nm , 距离 z 约为 0.6 m, 因此其菲涅耳数 $N_f = a^2 / (\lambda z) \approx 6.7$; LC-SLM-2 产生像差与模拟时等同。根据上述实验步骤测得两种方案下的像差校正效果如图 8, 9 所示。从图 8, 9 可以看出, 传统方案校正效果明显优于在校正器 LC-SLM-1 上加载 LC-SLM-2 产生像差的共轭相位后的校正效果, 有力的验证了衍射效应对传统方案校正效果的影响; 改进方案校正效果明显优于传统方案校正效果, 表明改进方案几乎不受衍射效应的影响。

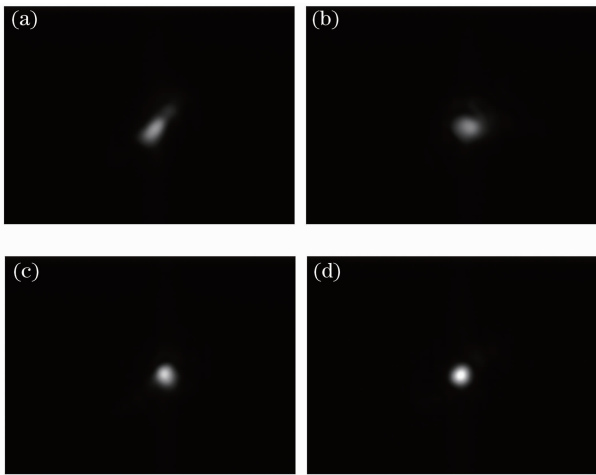


图8 校正前(a)、以 LC-SLM-2 产生像差的共轭相位为校正相位的校正后(b)、传统方案校正后(c)、改进方案校正后(d)远场光强分布

Fig. 8 Far-field before compensated (a); compensated far-field with the conjugate phase of aberration generated by LC-SLM-2 (b); compensated far-field with traditional way (c); compensated far-field with improved way (d)

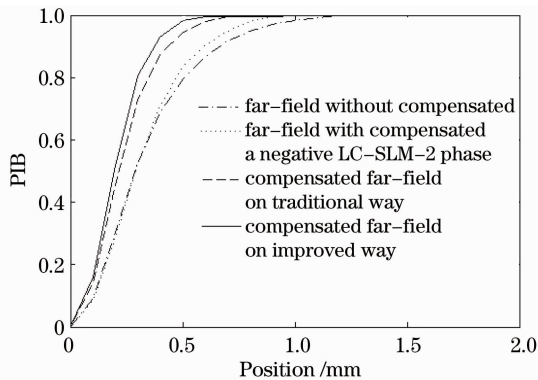


图9 两种方案校正后光束的远场桶中功率曲线

Fig. 9 Compensated far-field power-in-bucket curves of two correction solutions

5 结 论

以双液晶空间光调制器分别作为像差产生器和校正器,基于 SPGD 算法采用传统方案和改进方案两种校正方案进行了自适应光学系统内光路像差校正的仿真和实验。仿真和实验结果表明,采用传统方案进行校正时,衍射效应对自适应光学系统内光路像差校正效果有着严重影响,而且菲涅耳数越小像差校正效果越差;同等条件下改进方案像差校正效果明显优于传统方案像差校正效果,且前者像差校正效果几乎不受衍射效应的影响。

参 考 文 献

- 1 C. A. Primmerman, T. R. Price, R. A. Humphreys *et al.*. Atmospheric compensation experiments in strong-scintillation conditions[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(12): 2081~2088
- 2 Wang Yingjian, Wu Yi, Wang Chao *et al.*. Experimental results of atmospheric-compensation in the horizontal propagation path [J]. *Chin. J. Quantum Electron.*, 1998, **15**(2): 164~169
王英俭, 吴毅, 汪超等. 激光实际大气传输湍流效应相位校正一些实验结果[J]. 量子电子学报, 1998, **15**(2): 164~169
- 3 Wang Xiaolin, Wang Sanhong, Zhou Pu *et al.*. Investigation on influence of laser intensity fluctuation on beam cleanup system based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1396~1401
王小林, 王三宏, 周朴等. SPGD 算法光束净化中光强起伏对校正效果的影响研究[J]. 光学学报, 2009, **30**(5): 1396~1401
- 4 Li Qiang, Shen Mangzuo. Measurement of telescope aberrations using phase diversity method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1553~1557
李强, 沈忙作. 利用相位差法测量望远镜像差[J]. 光学学报, 2007, **27**(9): 1553~1557
- 5 Wang Sanhong, Yu Qifeng. Experimental research of laser beam cleanup for dynamic aberrations based on stochastic parallel gradient descent method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 97~101
王三宏, 梁永辉, 龙学军等. 基于随机并行梯度下降方法的动态光束净化实验研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 97~101
- 6 David L. Shealy, John A. Hoffnagle. Laser beam shaping profiles and propagation [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **45**(21): 5118~5130
- 7 P. J. Lena. Astrophysical results with the come-on adaptive optics system[C]. *SPIE*, 1994, **2201**: 1099~1109
- 8 J. W. Hardy. Active optics: a progress review [C]. *SPIE*, 1991, **1542**: 2~17
- 9 J. Thaddeus Salmon *et al.*. Real time wave-front correction system using a zonal deformable mirror and a Hartmann sensor [C]. *SPIE*, 1991, **1542**: 459~467
- 10 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1355~1358
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1355~1358
- 11 Ma Haotong, Zhou Pu, Wang Xiaolin *et al.*. Near-field beam shaping based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2032~2036
马浩统, 周朴, 王小林等. 基于液晶空间光调制器的激光束近场整形[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 2032~2036
- 12 Haotong Ma, Zejin Liu. Near-diffraction-limited flattop laser beam adaptively generated by stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(17): 2973~2975
- 13 Yang Huizhen. The Development and Application of the AO Without a Wave-Front Sensor on Stochastic Parallel Gradient Descent Control Algorithm[D]. Chendu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, 2008. 27~29
杨慧珍. 无波前探测自适应光学随机并行优化控制算法及其应用研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2008. 27~29
- 14 Zhou Renzhong. Adaptive Optics Theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 43~50
周仁忠. 自适应光学理论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 43~50

栏目编辑: 谢婧