

文章编号: 0253-2239(2008)02-0205-06

自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究*

杨慧珍^{1,2} 陈波^{1,2} 李新阳¹ 姜文汉¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 随机并行梯度下降算法是一种极具应用潜力的自适应光学系统控制算法, 具有不依赖波前传感器直接对系统性能指标进行优化的特点。基于 32 单元变形镜、CCD 成像器件等建立自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验平台。考察算法增益系数和扰动幅度对校正效果和收敛速度的影响, 验证随机并行梯度下降算法的基本原理。实验结果表明参量选取合适的情况下, 随机并行梯度下降控制算法对静态或慢变化的畸变波前具有较好的校正能力。根据实验结果分析了影响随机并行梯度下降算法校正速度的主要因素。

关键词 自适应光学; 随机并行梯度下降算法; 光束净化

中图分类号 TP273.2 **文献标识码** A

Experimental Demonstration of Stochastic Parallel Gradient Descent Control Algorithm for Adaptive Optics System

Yang Huizhen^{1,2} Chen Bo^{1,2} Li Xinyang¹ Jiang Wenhan¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The stochastic parallel gradient descent algorithm (SPGD) is a promising control algorithm for adaptive-optics (AO) system, which is independent of wave-front sensor and can optimize the system performance directly. Based on SPGD, an adaptive-optics test-bed was built with a 32-element deformable mirror and a CCD. The principle of SPGD control algorithm was demonstrated through examining the effects of gain and perturbation amplitude on correction capability and convergence rate. Experimental results show SPGD can correct static distorted wave-front successfully when the gain and the perturbation amplitude were appropriate for distorted wave-front. The main effects on correction speed were discussed through analyzing experimental results.

Key words adaptive optics; stochastic parallel gradient descent algorithm (SPGD); beam cleanup

1 引 言

目前大多数自适应光学系统都是采用波前传感器探测畸变波前相位信息, 由波前处理机根据畸变波前相位信息重构出波前, 再使用波前校正器校正畸变波前。该类技术在硬件上需要有波前传感器、波前处理机、波前校正器来实现, 结构较复杂。在大气光通信等应用领域中, 光波穿过的路径上湍流较强或传输距离较长时, 闪烁现象导致常用的哈特曼波前传感器的波前测量困难, 致使依赖波前测量的常规自适应光学系统不能正常工作^[1], 因此发展结

构简单、不依赖于波前测量的自适应光学系统成为近些年来自适应光学技术发展的新方向。

基于系统性能指标直接优化的自适应光学控制技术^[2], 使用优化算法直接对系统性能指标进行优化, 无需利用波前传感器探测畸变波前相位信息进行波前重构, 因此在降低系统复杂性的同时, 也降低了控制算法的复杂性, 且该技术适用于大多数类型的波前校正器。由于无需波前重构, 在大气湍流较强或光束长程传输应用中有着其独特的优势。近些年来, 由于该技术在硬件实现上的简单性及其对闪

收稿日期: 2007-04-26; 收到修改稿日期: 2007-09-05

基金项目: 国家高技术激光领域资助课题。

作者简介: 杨慧珍(1973-)女, 河南项城人, 博士研究生, 主要从事自适应光学技术方面的研究。

E-mail: yanghz526@126.com

导师简介: 李新阳(1971-)男, 四川资阳人, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学技术方面的研究。

E-mail: xyli@ioe.ac.cn

烁等复杂环境条件的适应性,正越来越受到自适应光学研究领域的重视。

选择合适的优化算法是该技术成功实现的关键,目前国内外常用的优化算法包括随机并行梯度下降 (Stochastic parallel gradient descent, SPGD)^[3,4]、遗传算法 (Genetic algorithm, GA)^[5]、模拟退火 (Simulated annealing, SA)^[6] 等。国内外研究均表明随机并行梯度下降算法是自适应光学控制系统中一种较有应用前途的随机并行优化算法,它是在同时扰动随机近似 (Simultaneous perturbation stochastic approximation, SPSA)^[7] 控制算法基础上开发的自适应光学校正技术,和多元高频振动及爬山法^[8] 比起来,具有实现容易、所有控制回路并行计算的特点。基于随机并行梯度下降算法构建了实验平台,考察算法对静态波前畸变的校正能力及校正速度,为把随机并行优化控制算法应用到实际系统上去进行初步的探索。

2 实验装置

图 1 为实验所采用的光路及系统控制图,主要由激光器、扩束系统、CCD 探测器、计算机、高压放大器及变形镜 (Deformable mirror, DM) 组成,其中计算机内有图像采集卡和 D/A 卡,利用计算机内软件完成随机并行梯度下降控制算法。光源从激光器发出,经反射镜 M₁、M₂、透镜 L₁、棱镜、反射镜 M₃、M₄、透镜 L₂ 扩束成为 φ120 mm 的平行光,经过像差传输后,再从变形镜返回,经 L₂、M₄、M₃、棱镜、放大镜头 L₃ 至 CCD 成像。图像采集卡从 CCD 探测器采集畸变波前对应的光强信号,系统根据随机并行梯度下降控制算法计算出控制变形镜面形变化的

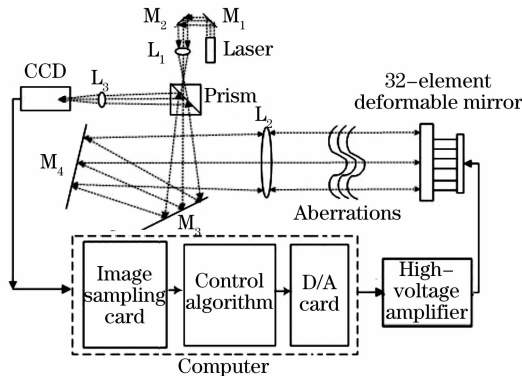


图 1 随机并行梯度下降控制算法实验装置的光路及系统控制回路

Fig. 1 The optical path and system control loop of stochastic parallel gradient descent control algorithm

电压信号。控制电压通过一个 32 通道的 PCI 总线 DA 卡并行输出,电压范围为 ±5 V,再经过高压放大到 ±500 V 驱动 32 单元变形镜各驱动器。再次由 CCD 探测经变形镜面形校正后的残余畸变波前,进入下一个控制循环。系统以上述迭代方式对变形镜进行控制,校正像差,使成像 CCD 上最终得到接近衍射极限的成像效果。图 2 为实验中所用 32 单元变形镜驱动器位置排布图。

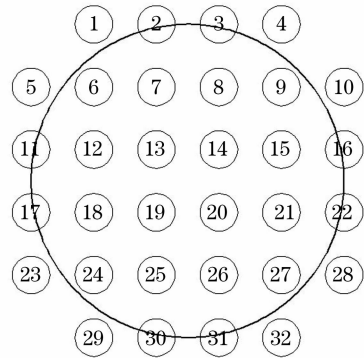


图 2 32 单元变形镜驱动器位置排布

Fig. 2 The actuators location of 32-element deformable mirror

表 1 列出了随机并行梯度下降控制算法实验中所采用的各单元器件型号及其性能参量。

表 1 随机并行梯度下降控制算法实验用各单元器件型号及性能参量

Table 1 Models and parameters of several elements used in stochastic parallel gradient descent control algorithm experiment

Laser	LD, λ=532 nm
CCD	Mode: MTV-1881 from Mintong Corporation; resolution: 768×576, target size: 6.6 cm×4.73 cm
Acquisition card	Model: OK-M70 from JoinHope Image Technology Co. Ltd.; PCI interface; 8 bit output; frame rate: 25 Hz
DM	Actuator number: 32; stroke: ±3 μm; distance between actuator: 23 mm; effective aperture: 120 mm

编程环境为 VC++6.0,采集卡的图像信息处理、控制算法的实现以及整个校正过程的监控都在计算机上实现。另经测量定标,成像系统在 532 nm 波段等效焦距为 8.86 m,理论极限半峰全宽 (FWHM)为 4.57 个 CCD 像素点。

3 随机并行梯度下降算法实现

3.1 性能指标的选取

随机并行梯度下降算法的校正效果一定程度上

依赖于系统性能指标的选取。根据具体的应用不同,系统性能指标的选取要求也不同,一个总的原则就是波前畸变消除后,性能指标函数达到极值。文献[9]总结了基于像平面或接收孔径上光强而定义的几种性能指标函数,其中最常用的有以下几种:

$$S_1 = \iint I^2(x, y) dx dy, \quad (1)$$

$$S_2 = I(x_0, y_0) / I_0(x_0, y_0), \quad (2)$$

$$S_3 = \iint I_0(x, y) I(x, y) dx dy, \quad (3)$$

$$S_4 = \iint M(x, y) I(x, y) dx dy, \quad (4)$$

上述各式中, $I(x, y)$ 为畸变波前远场光斑光强分布, $I(x_0, y_0)$ 为畸变波前远场光斑峰值强度, $I_0(x_0, y_0)$ 为理想波面远场光斑峰值强度, $I_0(x, y)$ 为理想波面远场光斑光强分布, $M(x, y)$ 为光阑的透过率函数。由于理想波面远场光斑分布情况在实际应用中不易获得,所以 S_3 不易实现。 S_2 可以使用峰值光强代替, S_4 中的光阑一般选取一个小孔。实验中曾以 CCD 像面上峰值光强趋于极大,或以质心为中心一个与衍射极限光斑相当的小区域内光强之和趋于极大为优化目标进行实验,结果并不理想。可能由于这两种指标对光强的变化较为敏感,导致性能指标变化曲线抖动幅度较大。实验结果证实选取 S_1 作为系统性能指标是有效且可行的。具体实现时,以 CCD 像面质心为中心截取 256×256 像面大小, S_1 成为如下形式,以符号 J 表示:

$$J = S_1 = \sum_{x=1}^{256} \sum_{y=1}^{256} I^2(x, y). \quad (5)$$

实验用半导体激光器光源比较稳定,如果光源不稳定,则需对 CCD 像面数据进行规一化处理。另外为消除背景噪声的影响,将所截取像面的四个角区域像素强度的平均值作为背景噪声,利用实际所测像面数据减去背景噪声后的像面数据进行性能指标的计算,其中四个角区域的大小为 10×10 个像素。

3.2 随机并行梯度下降控制算法

随机并行梯度下降算法利用性能指标测量值的变化量 ΔJ 与控制参量的变化量 Δu 进行控制参量的梯度估计,以迭代方式在梯度下降方向上进行控制参量的搜索。第 k 次迭代时,电压向量 $\mathbf{u}^{(k)} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 的计算公式为

$$\mathbf{u}^{(k)} = \mathbf{u}^{(k-1)} + \gamma \Delta \mathbf{u}^{(k)} \Delta J^{(k)}, \quad (6)$$

其中 $\Delta \mathbf{u}^{(k)} = \{\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_n\}^{(k)}$ 为第 k 次迭代时施加的扰动电压向量,单位为伏,各 Δu_i 相互独立且同为伯努利分布^[7],即各分量幅值相等 $|\Delta u_j| = \delta$,

$\Pr(\Delta u_j = \pm \delta) = 0.5$; γ 为增益系数,本实验中性能指标向极大方向优化, γ 取正值。随机并行梯度下降控制算法实现流程如图 3。

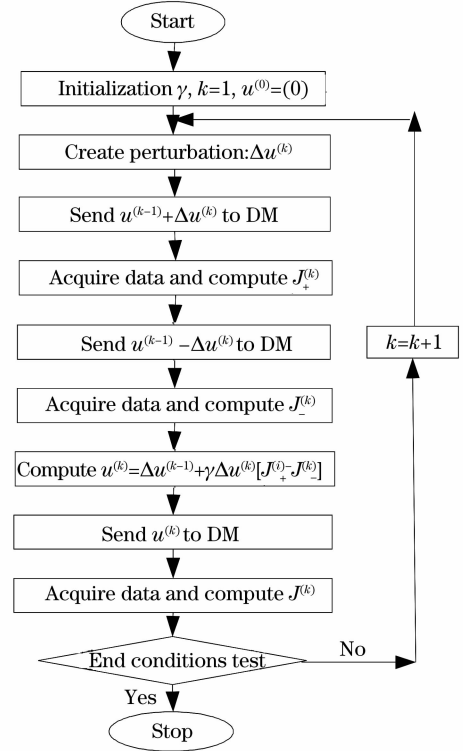


图 3 随机并行梯度下降算法实现流程

Fig. 3 Schematic representation of stochastic parallel gradient descent algorithm

程序初始化 γ 、电压向量 $\mathbf{u}^{(0)}$ 及迭代计数器 k 后,进入主循环。第 k 次迭代时,首先生成扰动电压 $\Delta \mathbf{u}^{(k)}$,把电压 $\mathbf{u}^{(k-1)} + \Delta \mathbf{u}^{(k)}$ 并加到变形镜各驱动器,然后采集 CCD 图像,按照(5)式计算 $J_+^{(k)}$;类似地再把电压 $\mathbf{u}^{(k-1)} - \Delta \mathbf{u}^{(k)}$ 加到变形镜各驱动器,采集 CCD 图像,得到 $J_-^{(k)}$;性能指标 J 的变化量 $\Delta J^{(k)}$ 如下计算:

$$\Delta J^{(k)} = J_+^{(k)} - J_-^{(k)}, \quad (7)$$

然后按照(6)式更新控制电压向量 $\mathbf{u}^{(k)} = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 并施加到变形镜,采集 CCD 图像得到第 k 次迭代时校正结果。一次迭代需要施加 3 次控制电压并采集、处理 3 幅图像。

4 实验结果与分析

4.1 实验参量选取

影响随机并行梯度下降控制算法校正效果和收敛速度的主要参量为扰动幅度 δ 和增益系数 γ 的取值。自适应增益^[4,10]在一定程度上可以提高算法的收敛速度,但其实现过程需要多个参量的调整,在实

际应用中不易实现,以下的实验在算法迭代过程中保持扰动幅度和增益系数不变化。像差变化不大时,只需把 δ 和 γ 其中一个固定在合适的范围内,调整另外一个^[4]。首先要对 δ 进行适当的选取,若取值太小性能指标值的变化可能掩盖不了噪声带来的影响,导致收敛速度太慢;而取值太大,性能指标变化曲线抖动起伏较大。图4给出了 $\gamma = 1.2$ 时两个典型 δ 值时的性能指标变化曲线。从图中可以看出 $\delta = 0.03$ V时,控制算法需要进行800次迭代才能克服系统噪声逐步向优化方向前进;而 $\delta = 0.25$ V时,前200次迅速收敛,但之后性能指标曲线开始大幅抖动。

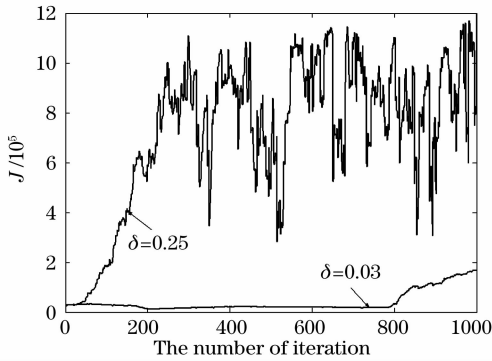


图4 $\gamma=1.2$ 时,不同 δ 对应的 J 变化曲线

Fig. 4 J evolution curves of different δ by stochastic parallel gradient descent control algorithm when γ was 1.2

多次实验发现,在本文实验条件下, δ 在0.05 V至0.2 V之间比较合适,在这个范围内,通过调整 γ ,都可以得到较好的收敛速度和校正效果。以下的实验结果把 δ 固定在0.1 V,考察不同的 γ 对校正效果和收敛速度的影响。

4.2 校正效果和收敛速度实验结果

图5为不同 γ 时,性能指标 J 变化曲线。图6为相应的峰值变化曲线。

从图5和图6可以看出, γ 的大小影响到随机并行梯度下降算法收敛速度和校正效果。 γ 小时,收敛速度相对缓慢,但能够做到全局收敛,如 $\gamma = 1$ 时; γ 大时,收敛速度快,但不易做到全局收敛,且 γ 越大性能指标曲线抖动越明显,如 $\gamma = 1.8$ 时。显然,太大或者太小的增益都是不合适的, γ 对收敛速

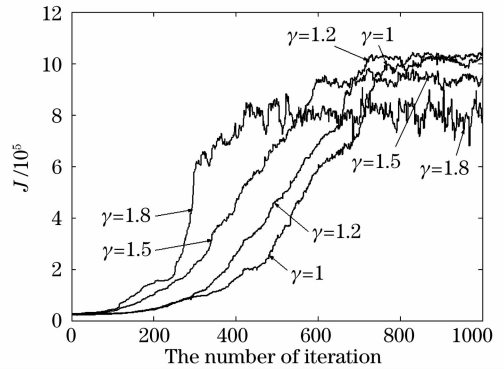


图5 $\delta=0.1$ V时,不同 γ 的 J 变化实验结果

Fig. 5 J evolution curves of different γ by stochastic parallel gradient descent control algorithm when δ was 0.1 V

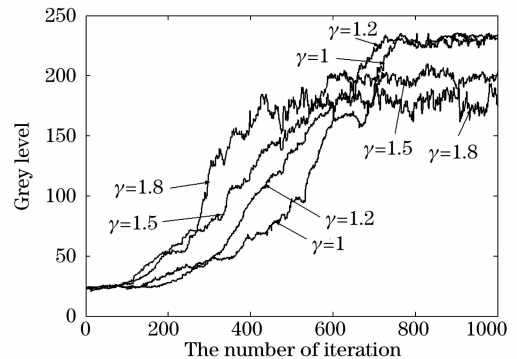


图6 $\delta=0.1$ V时,不同 γ 时的峰值变化实验结果

Fig. 6 Peak value evolution curves of different gains by stochastic parallel gradient descent control algorithm when δ was 0.1 V

度和校正效果的这种影响趋势与文献[4]中的仿真结果是完全一致的。

图7给出了校正前原始光斑与 γ 分别为1,1.2,1.5,1.8时算法各自迭代1000次后的远场光斑。

从图7可以看出, γ 分别等于1.0 1.2 1.5 1.8时,随机并行梯度下降控制算法对畸变波前都有明显的校正效果。下面对不同 γ 时的校正效果进行定量分析。表2给出了不同 γ 时校正后性能指标值、峰值大小、半峰全宽和上升时间对比,其中上升时间以性能指标 J 达到 8×10^5 所需要的迭代次数为标准来衡量。

表2 $\delta=0.1$ V、 γ 分别等于1.0 1.2 1.5 1.8时,随机并行梯度下降控制算法实验结果对比

Table 2 Comparisons of experimental results by stochastic parallel gradient descent algorithm when δ was 0.1 and γ was 1.0 1.2 1.5 1.8 separately

Gain coefficient γ	Performance metric $J / 10^5$	Peak value (gray level)	FWHM (CCD pixel)	Rise time (iteration number)
1.0	10.16	231	5.53	713
1.2	10.60	234	5.74	660
1.5	9.53	203	6.46	551
1.8	7.90	174	6.58	419

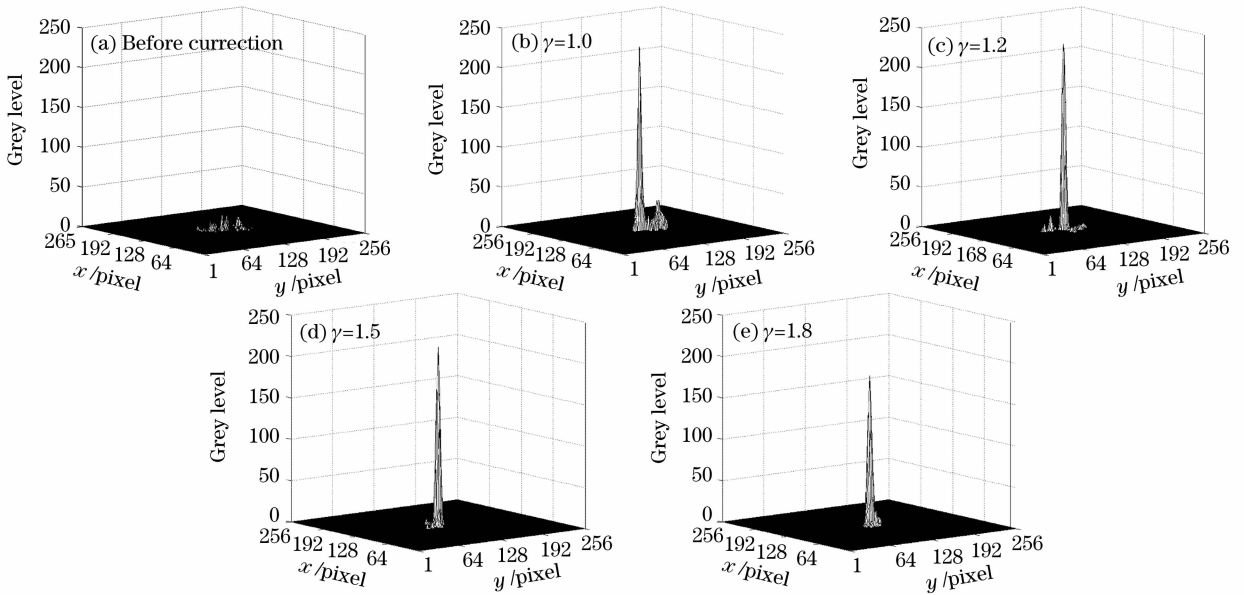


图7 $\delta=0.1$ V时,校正前 CCD 像面光强分布对比, γ 分别为 1 1.2 1.5 1.8 时算法各自迭代 1000 次后 CCD 像面光强分布
Fig. 7 Comparisons of intensity distribution before correction and after 1000 times of iteration by stochastic parallel gradient descent control algorithm when δ was 0.1 and γ was 1.0 1.2 1.5 1.8 separately

从表 2 中数据可以看出, γ 等于 1.0 和 1.2 时,性能指标、峰值和半峰全宽值差别不大,校正效果接近,但参考图 7 可以发现 $\gamma=1$ 时校正后光斑分布不如 $\gamma=1.2$ 时集中。随着 γ 值的增大,性能指标和峰值逐步减小,半峰全宽值增大,校正效果逐步变差。从表中上升时间来看,随着 γ 的增大,算法达到同样的校正效果所需迭代次数逐步减少,也即收敛速度越来越快。通过对校正效果和收敛速度的分析可知二者不可兼得,具体应用时必须在校正效果和收敛速度之间作个权衡。综合比较性能指标、峰值、半峰全宽值和图 7 校正后光强分布可知, $\gamma=1.2$ 时校正效果相对最好。本文实验系统理论极限半峰全宽为 4.57 个像素,此时可以得到 $5.74/4.57=1.25$ 倍衍射极限的校正效果。

4.3 讨论与分析

从 4.2 节实验结果可知,在参量选取合适的情况下,随机并行梯度下降控制算法对静态畸变波前具有较好的校正能力,基本验证了该算法的有效性。对于一些以静态像差或缓变的动态像差为主的应用,如惯性约束聚变等,随机并行梯度下降将是一种比较有效的控制方法。但如果考虑把随机并行梯度下降控制算法应用到实时自适应光学上去校正动态畸变,则必须考虑它的可行性。从随机并行梯度下降算法实现流程可以知道,该算法以迭代方式运行,需要进行多次迭代才能达到收敛,获得较好的校正效果。因此迭代速度成为随机并行梯度下降控制算法能否应用到

实时自适应光学系统上去的关键因素。

为便于分析,我们把扰动电压施加到变形镜、图像采集、数据处理这样一个流程称为一个扰动过程。根据国外资料报道^[11],为了校正大气湍流动态像差,随机并行梯度下降控制算法所需扰动频率大约为 20 倍至 40 倍的 Nf_G ,这样的扰动频率才能跟上变化着的波前扰动,其中 N 为校正器单元数, f_G 为大气湍流动态像差的 Greenwood 频率。如果 $f_G=10$ Hz,采用实验中的 32 单元变形镜,则需要的扰动频率应为 6400 Hz。本实验完成一次电压扰动实际用时约为 50 ms,也即扰动频率为 20 Hz。所用采集卡的采样频率为 25 Hz,一次图像采集约需 40 ms,这样对 CCD 采样时间便占去一次扰动时间的 80%,可见采样频率太低是该系统时间上的最大限制因素。美国陆军研究实验室(Army Research Laboratory)于 1999 年采用 VLSI 完成随机并行梯度下降控制算法的快速计算,并在光通讯^[12,13]等多种应用中开展了实验工作。因此如果采用采样频率较高的探测器完成性能指标的采集,再配以高速的数据处理,随机并行梯度下降控制算法可能适用于大气湍流扰动。

5 结 论

本文基于随机并行梯度下降控制算法、32 单元变形镜、CCD 成像器件等建立了自适应光学系统实验平台,讨论了性能指标的选取,并详细介绍了随机

并行梯度下降控制算法的基本原理、实现方法。实验考察了不同扰动幅度、不同增益系数对校正效果和收敛速度的影响。实验结果表明,随机并行梯度下降控制算法对静态像差具有较好的校正能力,但需要进行多次迭代算法才能收敛,获得较好的校正效果,适用于对实时性要求不高的自适应光学系统。采用频率较高的探测器以及提高数据处理速度是把随机并行梯度下降控制算法应用到实时自适应光学系统中去的可能解决途径。

参考文献

- 1 Wang Yingjian, Wu Yi, Wang Chao *et al.*. Experiment results of atmospheric-compensation in the horizontal propagation path[J]. *Chin. J. Quant. 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
- 2 R. A. Muller, A. Buffington. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1974, **64**(9): 1200~1210
- 3 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(8): 1440~1453
- 4 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): 1355~1360
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): 1355~1360
- 5 R. Mukai, K. Wilson, V. Vilnrotter. Application of genetic and gradient descent algorithms to wave-front compensation for the deep-space optical communications Receiver [R]. *The Interplanetary Network Progress Report*, Vol. 42~161, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, May 15, 2005
- 6 S. Zommer, E. N. Ribak, S. G. Lipson *et al.*. Simulated annealing in ocular adaptive optics[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(7): 1~3
- 7 J. C. Spall. Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation [J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1992, **37**(3): 332~341
- 8 Jiang Wenhan, Huang Shufu, Wu Xubin. Hill-climbing adaptive optics wavefront correction system[J]. *Chin. J. Lasers*, 1988, **15**(1): 17~21
姜文汉,黄树辅,吴旭斌. 爬山法自适应光学波前校正系统[J]. 中国激光, 1988, **15**(1): 17~21
- 9 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Zhao Dazun. *Adaptive Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996 (in Chinese)
周仁忠,阎吉祥,赵达尊等. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 10 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov, T. G. Bifano *et al.*. Microscale adaptive optics: wave-front control with a μ -mirror array and a VLSI stochastic gradient descent controller [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24): 4243~4253
- 11 A. J. Masino, D. J. Link. Adaptive optics without a wavefront sensor[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5895**: 58950T-1
- 12 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov, J. W. Gowens *et al.*. Fiber coupling with adaptive optics for free-space optical communication [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4489**: 177~184
- 13 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov. Atmospheric compensation with a speckle beacon in strong scintillation conditions: directed energy and laser communication applications[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(30): 6388~6401