

文章编号: 0253-2239(2010)11-3076-06

基于随机并行梯度下降算法的自适应光学 实时并行处理机

王彩霞^{1,2,3} 李梅^{1,2} 李新阳^{1,2} 叶红卫^{1,2}

¹ 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209
² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 基于随机并行梯度下降(SPGD)算法的自适应光学系统通过直接优化系统的性能评价函数来控制波前校正器以补偿光束中存在的波前畸变。但由于算法收敛速度的影响,在一定程度上限制了SPGD在自适应光学系统中的应用。在对SPGD控制算法分析的基础上,充分提取和发掘算法内在的并发性,采用流水线和并行处理技术,设计并实现了基于现场可编程门阵列(FPGA)加数字信号处理器(DSP)的单指令流多数据流(SIMD)结构实时并行处理机,实现了SPGD控制算法由表达层到结构层的优化映射。该处理机应用在激光光束净化自适应光学系统中,同时实现了对变形镜和倾斜镜的控制。实验结果表明,采用基于SPGD算法自适应光学实时并行波前处理机具有很快的收敛速度,可以有效地校正激光出光过程中的光束波前相差和光束漂移误差。

关键词 自适应光学;随机并行梯度下降算法;波前处理机;并行处理;单指令流多数据流结构

中图分类号 TP273.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3076

Real-Time Parallel Wavefront Processor for Adaptive Optics Based on Stochastic Parallel-Gradient-Descent Algorithm

Wang Caixia^{1,2,3} Li Mei^{1,2} Li Xinyang^{1,2} Ye Hongwei^{1,2}

¹ Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract The adaptive optical system based on stochastic parallel gradient descent algorithm (SPGD) compensates wavefront aberration by direct optimization of a system performance metric. The convergence rate is the key factor that limits the SPGD algorithm application in practical adaptive optics system. On the basis of analysis of SPGD algorithm in which the concurrency is embedded, a pipeline single instruction and multiple data (SIMD) architecture parallel real-time wavefront processor is designed and implemented in which field-programmable gate array (FPGA) and digital signal processing (DSP) are introduced. The optimal mapping of the control algorithm from representative layer to the architecture is realized. The wavefront processor is applied to a laser beam cleanup adaptive optical system to control the deformable mirror and fast steering mirror. The experimental results show that real-time parallel wavefront processor based on SPGD algorithm can compensate the wavefront aberration and tilt excursion of the laser beam involved effectively and that the convergence rate is enhanced enormously.

Key words adaptive optics; stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm; wavefront processor; parallel processing; single instruction and multiple data (SIMD) architecture

收稿日期: 2010-01-22; 收到修改稿日期: 2010-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(60978050)和四川省青年科技基金(09ZQ026-014)资助课题。

作者简介: 王彩霞(1979—)女,博士研究生,助理研究员,主要从事自适应光学技术方面研究。

E-mail: wxioe@hotmail.com

导师简介: 李新阳(1971—)男,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

1 引言

自适应光学(AO)系统可以实时探测并校正系统中存在的波前畸变,被广泛应用在高分辨力成像、激光大气传输、激光核聚变和人眼成像等领域。自适应光学系统探测波前畸变的方法可以分为两类:

1)波前传感器,如哈特曼波前传感器和剪切干涉仪等,直接探测波前畸变相关的参数如波前斜率,再经过波前复原算法^[1],计算出加到波前校正器面形上的电压;2)无波前传感器系统选择探测远场光斑光强分布^[2~4],计算出表示畸变程度的评价函数,通过控制波前校正器上的电压,实现自动寻优。在某些场合不必要或无法使用波前传感器,例如腔内自适应、不规则光束等情况。与有波前传感器自适应光学系统相比,无波前传感器自适应光学系统不但降低了自适应光学系统结构的复杂性,而且在波前无法探测的应用环境中有着其独特的优势^[5,6],采用合适的控制算法是该项技术成功实现的关键。在自适应光学系统中,波前校正器一般是多单元器件,所以控制参数是一个多维向量,选择合适的优化控制算法必须考虑到控制通道的多维性、控制对象的随机性及算法的稳健性。

随机并行梯度下降(SPGD)算法是一种极具应用潜力的无波前探测随机并行类自适应光学系统控制算法^[7~9]。该算法以成像清晰度和接收光能量等系统所关心的性能指标直接作为优化算法的目标函数,通过多维空间的梯度估计来达到控制自适应光学系统的目的。目前,SPGD控制算法是无波前传感器自适应光学系统控制算法的研究热点之一,作为通过迭代方式达到最优化的实时控制方法,实现方式的迭代速度对于自适应光学系统的校正能力有着至关重要的影响。梁永辉等^[10~12]对SPGD控制算法在自适应光学系统中的应用进行了研究,但仅限于实验室内数值仿真和实验,且算法都是通过计算机实现,导致算法迭代速度慢,无法应用在实际的自适应光学系统中。张金宝等^[13]利用现场可编程门阵列(FPGA)完成了自适应光学系统SPGD控制算法的实现,并在实验室内实际的系统中进行了动态和静态试验,算法的收敛速度较前一方法有很大的提高,但由于FPGA内部进行浮点运算比较复杂,且要占用大量的资源,只能将算法定点化后实现,导致算法的控制精度大大降低。

本文研究的目的是设计一个用于无波前传感器的光束净化自适应光学系统波前处理机,通过读取和处理高帧频CCD相机的图像数据,同时完成对变

形镜(DM)和倾斜镜(TM)的控制,其中对变形镜的控制用SPGD算法,对倾斜镜的控制用经典的质心测量和积分控制算法。详细分析了SPGD控制算法的特点,对其内在的并发性进行充分的发掘和提取,研究了控制算法由表达层到结构层优化映射的实现方法,采用流水线和并行处理技术,设计并实现了基于FPGA加数字信号处理器(DSP)的单指令流多数据流(SIMD)结构^[14]实时并行SPGD控制算法处理机。

2 变形镜和倾斜镜的控制算法

2.1 变形镜的SPGD控制算法

定义系统的性能评价函数 J 是施加在变形镜所有驱动器上控制电压信号的函数:

$$J = J(u_1, \dots, u_j, \dots, u_N), \quad (1)$$

式中 N 为系统的校正单元数, u_j 为变形镜第 j 个驱动器的控制电压($j=1, \dots, N$)。SPGD算法利用性能指标测量值的变化量 ΔJ 与控制参数的变化量 Δu 进行控制参数的梯度估计,以迭代方式在梯度下降方向上进行控制参数的搜索。 ΔJ 为加正扰动电压和负扰动电压时性能指标的变化量:

$$\Delta J = J(u_1 + \Delta u, \dots, u_j + \Delta u, \dots, u_N + \Delta u) - J(u_1 - \Delta u, \dots, u_j - \Delta u, \dots, u_N - \Delta u). \quad (2)$$

第 k 次迭代时,电压向量 $\mathbf{u}^k = [u_1^k, \dots, u_j^k, \dots, u_N^k]$ 中第 j 个驱动器的计算公式为

$$u_j^k = u_j^{(k-1)} - \gamma \Delta u_j^k \Delta J, \quad (3)$$

式中 $\Delta \mathbf{u}^k = [\Delta u_1^k, \dots, \Delta u_j^k, \dots, \Delta u_N^k]$ 为第 k 次迭代时各驱动器上施加的扰动电压向量。 $\Delta \mathbf{u}^k$ 相互独立且服从伯努利分布^[15]。 γ 为学习效率参数, $\gamma > 0$ 对应于目标函数的最小化, $\gamma < 0$ 对应于目标函数的最大化。

SPGD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。在处理机的设计中选择两个具有代表性的性能指标:图像锐化函数 S_1 和平均半径 S_2 :

$$S_1 = \iint I(x, y) dx dy, \quad (4)$$

$$S_2 = \frac{\iint |(x, y) - (x_0, y_0)| I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}, \quad (5)$$

式中 $I(x, y)$ 畸变波前远场光斑的光强分布,其中(5)式中 (x_0, y_0) 为图像的质心位置,同时用于TM

的控制:

$$x_0 = \frac{\iint xI(x,y)dxdy}{\iint I(x,y)dxdy}, y_0 = \frac{\iint yI(x,y)dxdy}{\iint I(x,y)dxdy}. \quad (6)$$

由于性能指标的计算与探测器类型关系紧密,在文中探测器采用帧转移型 CCD。其特点为曝光与数据输出为流水结构,当前曝光的图像数据,在下帧才转移并读出。

2.2 倾斜镜的控制算法

TM 的控制算法为经典积分控制,其算法为

$$\begin{cases} V_x^{k+1} = V_x^k + b_x(x_0 - x'_0) \\ V_y^{k+1} = V_y^k + b_y(y_0 - y'_0) \end{cases}, \quad (7)$$

式中 b_x, b_y 为控制参数, (x'_0, y'_0) 为标定质心位置,一般在 CCD 视场的中央。由于积分控制算法已经非常成熟,这里就不赘述。

3 变形镜 SPGD 算法并行性分析

在自适应光学系统中,实时性是波前处理机的关键指标。串行处理虽然占用资源较少,但运算处理延时大,实时性差。根本无法满足自适应光学系统对波前处理机的要求。为了提高处理机的运算速度和处理能力,必须根据算法的特点,利用并行处理技术,提高处理机的实时性。下面就分析 SPGD 控制算法的特点,充分发掘和提取其内在的并发性,为并行处理机的设计提供依据和基础。

首先,根据 SPGD 控制算法,可以将一次迭代划分为以下 3 个粗粒度的子任务,每个子任务中又包含几个细粒度的作业过程:

1) 扰动电压的产生。包含以下作业过程:a) 产生扰动电压 $\Delta u^k = [\Delta u_1^k, \dots, \Delta u_j^k, \dots, \Delta u_N^k]$; b) 计算正扰动电压 $u_{j+}^k = u_j^k + \Delta u_j^k$, 并将其加到变形镜的驱动器上;c) 计算负扰动电压 $u_{j-}^k = u_j^k - \Delta u_j^k$, 并将其加到变形镜上。

2) 性能指标计算。包含以下作业过程:a) 采集图像并计算负扰动的性能指标 S_1^- 和 S_2^- ; b) 采集图像并计算正扰动性能指标 S_1^+ 和 S_2^+ ; c) 计算性能指标的变化量 ΔJ 。

3) 计算更新电压 $u^{(k+1)}$

从(2)~(6)式可以看出 SPGD 控制算法由乘法运算和加法运算组成,算法内部操作比较规则简单。

从算法的流程可以看出,以上各子任务之间具

有时间相关性和数据交互性,如正、负扰动电压 u_{j+}^k 和 u_{j-}^k 的计算必须在扰动电压 Δu 计算之后,扰动电压 Δu 的结果为正、负扰动电压计算的必要输入元素。性能指标的变化量 ΔJ , 为 $u^{(k+1)}$ 的计算要等正、负扰动性能指标计算结束得到指标的变化量 ΔJ 后才能开始。而且,在 SPGD 算法各子任务中,扰动电压的产生、性能指标的采集计算和更新电压 $u^{(k+1)}$ 的计算在时间上是相互重叠、相对独立的子任务,即在产生第 j 个驱动器的扰动电压时,可以计算第 $j-1$ 个驱动器的正扰动电压和负扰动电压,可以进行第 $j-2$ 个驱动器 $u^{(k+1)}$ 运算中的 γ 与 Δu_{j-2} 的乘积运算。所以在算法处理中可以采用流水技术,从而实现算法中的任务级并行。

在电压计算的子任务中,变形镜驱动器电压为多维向量控制 $u^k = [u_1^k, \dots, u_j^k, \dots, u_N^k]$, 但不同驱动器电压 u_j^k 之间是相互独立、互不相关的,可以采用多个处理单元同时计算,利用空间资源重复技术,实现算法的作业级空间并行;另外,同一个驱动器的控制电压 u_j^k , 不但与当前帧的信息有关,还与上一帧的电压 $u_j^{(k-1)}$ 有关,存在着数据的耦合性,设计中采用定向技术,通过硬件专用电路将耦合数据提前传送到相关缓冲寄存器,从而保证后续运算得以不停顿的进入流水线,并及时得到所需要的操作数;而正、负扰动电压 u_{j+}^k 和 u_{j-}^k 在迭代中的不同时刻施加在变形镜上,只有数值相关性,没有时间相关性,因此可以采用同一个处理单元,采取资源共享的方式实现时间重叠的并行。

对于性能指标计算子任务,CCD 相机图像输出采集与性能指标计算之间具有同时性,而两种性能指标 S_1 和 S_2 的计算具有并发性,因此可以采取时间重叠加空间重复的方式,利用 CCD 相机输出的同步信号,第一个像素输出后便开始性能指标的计算,从而实现任务的时间并行和空间并行。

4 基于 SPGD 算法并行处理机的实现

第 3 节对 SPGD 控制算法的特点进行了分析,在对算法内部并行性进行充分发掘的基础上,设计并实现了基于 SPGD 控制算法的 SIMD 结构实时并行处理机。处理机主要由 FPGA、DSP、存储单元及外围控制电路构成。

在设计中,FPGA 对规则运算的超强高速处理能力和丰富的资源结构,使得在片内就能够实现硬件高度并行结构,另外,FPGA 的重复可编程性保证了算法实现的灵活性、扩展性和可移植性;同时

DSP 内部采用哈佛结构,广泛采用流水线操作,并可以方便实现浮点运算,保证了算法的实现精度。在处理机的设计实现中,结合算法中各子任务的特点和不同的数据类型,将不同的任务分配到不同的处理器中。具体的功能框图如图 1 所示。由于 CCD 输出图像数据的特点为速度快、输出方式规则,且像素数值表达为大于等于零的正整数,所以将图像采集和性能指标 S_1 和 S_2 的计算在 FPGA 内并行实现,同时在 FPGA 内部产生全局控制器,系统中所有处理单元均由全局控制器广播来的命令控

制管理。由于变形镜和倾斜镜上控制电压对应到处理机上为 $(-5V \sim +5V)$ 的电压信号,为了提高其计算精度,采用浮点 DSP 来并行流水实现扰动电压 $\Delta u^k = [\Delta u_1^k, \dots, \Delta u_j^k, \dots, \Delta u_N^k]$ 的生成、正扰动电压 u_j^+ 、负扰动电压 u_j^- 和更新电压 $u_j^{(k+1)}$ 的计算,同时将电压输出到数模转换器(DAC),经高压放大后控制变形镜和倾斜镜工作,同时 DSP 将系统中关心的指标参数存储到存储器中,便于事后分析。处理机通过 PCI 总线与监控计算机进行数据交互。

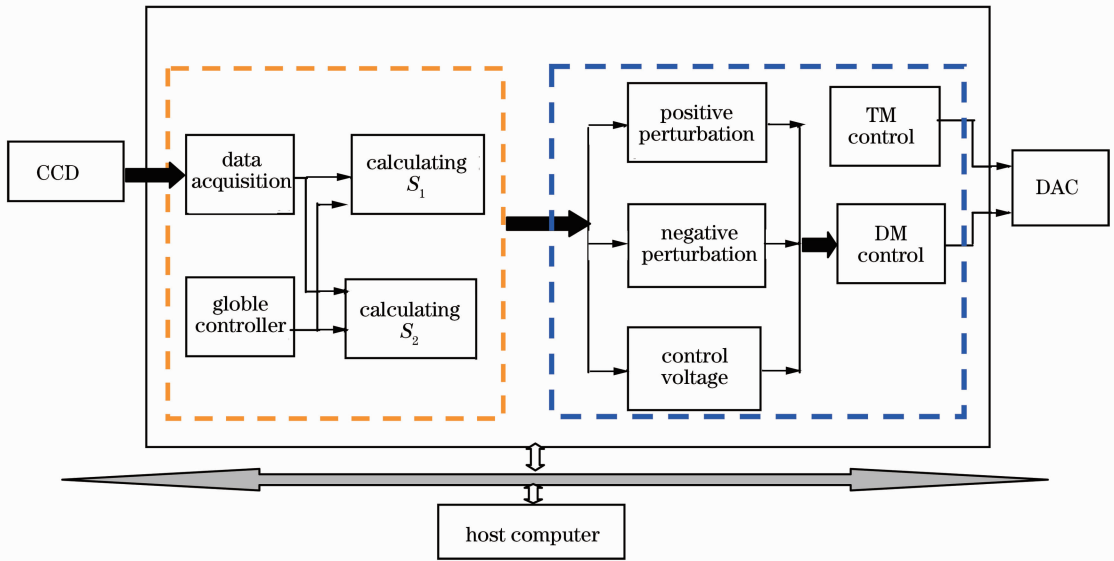


图 1 SPGD 处理机结构框图

Fig. 1 Schematic of SPGD wavefront processor

5 实验结果

为了验证基于 SPGD 控制算法波前处理机的性能,将其应用在一个激光光束净化自适应光学系统中并对其实时性进行了测量。光束净化系统的布局如图 2 所示。激光束的漂移和抖动由 TM 进行校正,激光束的高阶波前相差由 DM 进行校正。成像镜头和 CCD 构成一个性能指标测量传感器,同时也兼作光束漂移传感器和校正效果好坏评价传感器,CCD 的参数为:像素 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$,帧频 500 Hz 。激光束的有效口径为 40 mm ,波长为 1064 nm ,TM 和 DM 均为压电驱动器结构。其中,DM 的驱动器为六边形排布,在 40 mm 口径内的有效单元数为 19 个。激光器的光束经倾斜镜和变形镜后,经过透镜将其会聚在焦点处的 CCD 探测器上。SPGD 处理机实时完成 SPGD 控制运算后,利用控制信号驱动倾斜镜和变形镜工作,校正系统的

波前误差,使系统的性能指标接近最优。试验发现,由于性能指标 S_2 对噪声敏感,以性能指标 S_1 的闭环更加稳定,图 3 为以图像锐化函数 S_1 为系统性能指标的闭环结果,图 4 为性能指标的收敛曲线。

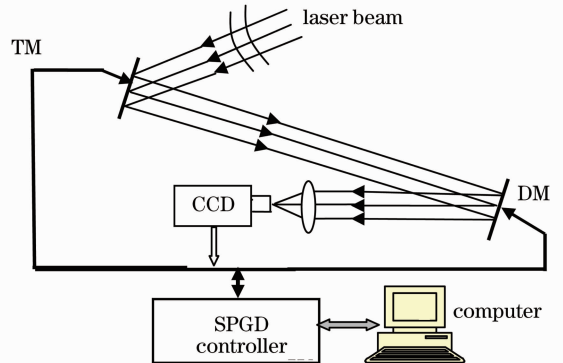


图 2 激光束净化系统实验布局示意图

Fig. 2 Configuration of beam cleanup system

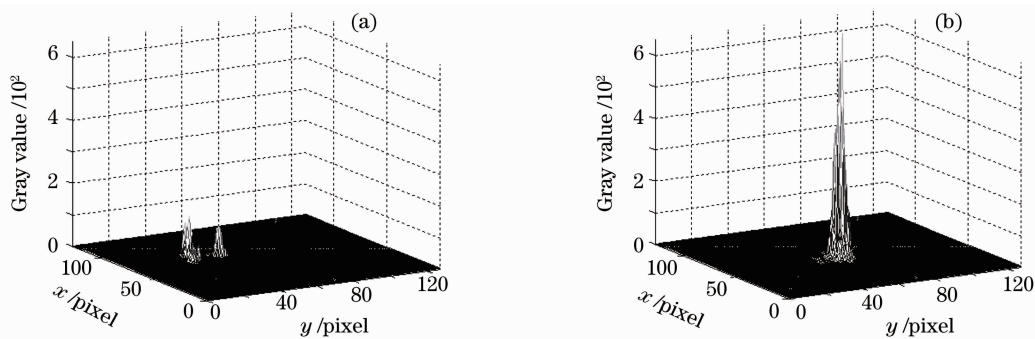


图 3 校正前(a)和校正后(b)的光强分布

Fig. 3 Far-field light intensity distributions of open loop (a) and close loop (b)

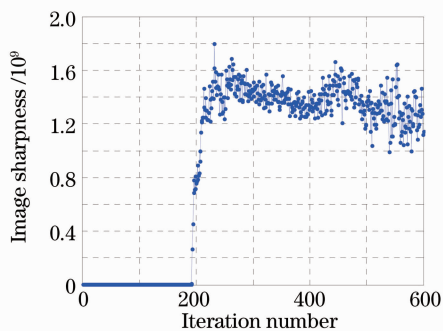


图 4 性能指标收敛曲线

Fig. 4 Evolution curve of metric

从图 4 中可以看出,在前 190 次迭代,激光器未出光,净化自适应光学系统处于等待状态,当激光器出光后,自适应光学系统能够很快实现稳定收敛的校正效果。校正前的光斑的峰值为 605,校正后的峰值为 6987。从性能指标的收敛曲线可以看出,经过 30 次的迭代,系统就能稳定收敛。图 5 为倾斜镜闭环后的光斑质心误差曲线,可以看出,激光器发射光束的实际位置与系统标定值(CCD 视场的中心)有较大的偏移,TM 经过 20~30 frame 的工作,就将发射光束稳定在标定位置附近。

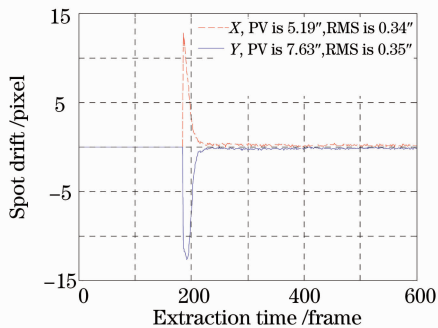


图 5 TM 的校正收敛曲线

Fig. 5 Evolution curves of TM

另外,对 SPGD 波前处理机的实时性进行了测量。在净化自适应光学波前处理系统中,SPGD 波

前处理机的全局同步时钟采用 40 MHz。系统的延时为 155 μ s,而 CCD 的采样频率为 500 Hz,即采样周期为 2000 μ s,系统延时远小于 CCD 的采样周期,远远达到了自适应光学系统实时性的要求,另外如果提高系统全局同步时钟的频率,系统的延时相应缩短,SPGD 波前处理机的处理能力也将有所提高。

结果表明,基于 SPGD 控制算法的自适应光学实时并行处理机能够在实际的系统中运行,能够有效地校正波前畸变,且有较快的收敛速度,为 SPGD 控制算法在自适应光学系统中的实际应用提供了有利保障。

6 结 论

本文分析了 SPGD 控制算法的特点,对算法的并行性进行了提取和发掘,采用并行处理技术,设计并实现了基于 FPGA 加 DSP 的无波前传感器 SPGD 实时控制并行处理机,实现了 SPGD 控制算法由表达层到结构层的优化映射。将 SPGD 实时控制并行处理机应用在实际的光束净化系统中,同时实现了对 DM 和 TM 的控制。实验结果表明,该设计实时性强,具有很快的收敛速度,能够有效地控制系统中波前误差,为 SPGD 控制算法在实际自适应光学系统中的应用拓宽了前景。

致谢 感谢李恩德和甘永东在实验中提供的软件支持。

参 考 文 献

- 1 Deli Geng, Stephen J. Goodsell, Alastair G. Basden *et al.*. FPGA cluster for high performance AO real-time control system [C]. *SPIE*, 2006, **6272**: 627240
- 2 Marc H. Cohen, Mikhail Vorontsov, Gary Carhart *et al.*. Adaptive wavefront correction: a hybrid VLSI/optical system implementing parallel stochastic gradient descent [C]. *SPIE*, 1999, **3866**: 176~182
- 3 Aaron J. Masino, Donald J. Link. Adaptive optics without a wavefront sensor[C]. *SPIE*, **5895**: 58950T

- 4 Piotr Piatrou, Michael Roggemann. Beaconless stochastic parallel gradient descent laser beam control; numerical experiments[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(27): 6831~6842
- 5 Thomas Weyrauch, Mikhail 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
- 6 Thomas Weyrauch, Mikhail A. Vorontsov. Free-space laser communications with adaptive optics; Atmospheric compensation experiments[J]. *J. Opt. Fiber. Commun. Rep.*, 2004, **1**(4): 355~379
- 7 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
- 8 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Comparison of several stochastic parallel optimization control algorithm for adaptive optics system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(1): 11~16
杨慧珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统几种随机并行优化控制算法比较[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(1): 11~16
- 9 M. A. Vorontsov, V. P. Sivokon. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(10): 2745~2758
- 10 Liang Yonghui, Wang Sanhong, Long Xuejun *et al.*. Experimental explorations of the laser beam cleanup system based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 613~618
王三宏, 梁永辉, 龙学军等. 随机并行梯度下降光束净化实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 613~618
- 11 Wang Sanhong, Liang Yonghui, Long Xuejun *et al.*. 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
- 12 Yang Huizhen, Chen Bo, Li Xinyang *et al.*. Experimental demonstration of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 205~210
杨慧珍, 陈波, 李新阳等. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 205~210
- 13 Zhang Jinbao, Chen bo, Wang Caixia *et al.*. FPGA hardware implementation of SPGD control algorithm for adaptive optics system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(9): 46~51
张金宝, 陈波, 王彩霞等. 自适应光学系统 SPGD 控制算法的 FPGA 硬件实现[J]. *光电工程*, 2009, **36**(9): 46~51
- 14 Zhang Defu. *Parallel Processing Technique* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1992. 97~112
张德富. *并行处理技术* [M]. 南京: 南京大学出版社, 1992. 97~112
- 15 M. A. Vorontsov, V. P. Sivokon Stochastic parallel-gradient descent technique for high resolution wave-front phase-distortion correction [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1998, **15**(10): 2745~2758