

文章编号: 0258-7025(2010)03-0668-07

# 61 单元自适应光学系统随机并行梯度下降算法动态实验研究

张金宝<sup>1,2,3</sup> 陈波<sup>1,2,3</sup> 王彩霞<sup>1,2</sup> 李新阳<sup>1,2</sup>

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

**摘要** 随机并行梯度下降 (SPGD) 算法是一种无波前探测自适应光学 (AO) 控制技术, 具有很强的应用潜力。设计并实现了基于现场可编程门阵列 (FPGA) 的 SPGD 算法处理机, 使用热风式湍流模拟装置产生动态波前扰动, 搭建了 61 单元自适应光学系统 SPGD 算法动态波前畸变校正实验系统。用于性能指标测量的 CCD 帧频为 2900 Hz, SPGD 算法处理机迭代速度可达近千次每秒, 自适应光学系统实现了对动态波前畸变的补偿。实验结果表明该自适应光学系统对动态模拟湍流具有良好的校正效果, 闭环后的性能指标比开环时平均提高了 30 倍以上, 远场光斑峰值平均提升了 10 倍。通过对性能指标的频谱分析, 表明该基于 SPGD 算法的自适应光学系统的有效带宽为 10 Hz。

**关键词** 自适应光学系统; 随机并行梯度下降算法; 动态波前畸变; 带宽

**中图分类号** TP273.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0668

## Dynamical Wave-Front Distortion Correction Experiment Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm for 61-Element Adaptive Optics System

Zhang Jinbao<sup>1,2,3</sup> Chen Bo<sup>1,2,3</sup> Wang Caixia<sup>1,2</sup> Li Xinyang<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> *The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*  
<sup>2</sup> *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*  
<sup>3</sup> *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract** The stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is a promising control algorithm for adaptive optics (AO) system without wave-front sensor. In this paper, a 61-element laser beam focusing AO system for correcting dynamical wave-front distortion was established, which used a hot-wind experimental atmospheric turbulence generator and SPGD algorithm controller based on field programmable gate array (FPGA). Up to one thousand iterations per second's speed of the controller and the sub-millisecond response time of the deformable mirror and tilt mirror provided quick compensation for dynamic wave-front distortion induced by the hot-wind experimental atmospheric turbulence generator. The experimental results demonstrated that this AO system can significantly improve the laser beam quality with 30 times' increase of the averaged performance metric and 10 times' increase of the peak-values of far-field intensity distributions. The spectral analysis of performance metric showed that the AO system had an effective bandwidth of 10 Hz.

**Key words** adaptive optics system; stochastic parallel gradient descent algorithm; dynamical wave-front distortion; bandwidth

收稿日期: 2009-04-16; 收到修改稿日期: 2009-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(60978050)和四川省青年科技基金(08ZQ026-053)资助课题。

作者简介: 张金宝(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事自适应光学与现场可编程门阵列(FPGA)等方面的研究。

E-mail: zjb064@gmail.com

导师简介: 李新阳(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: xyli@ioe.ac.cn

## 1 引言

目前大多数的自适应光学(AO)系统都是基于相位共轭原理,通过波前传感器测量波前畸变,使用适当的控制算法将波前信息转化为波前校正器的控制信号,完成对波前畸变的补偿<sup>[1]</sup>。然而在大气激光通信、长距离激光能量传输等应用场合,随闪烁引起的相位不连续导致使用波前传感器测量波前变得困难,甚至不可能<sup>[2]</sup>。因此,发展结构简单、无波前传感的自适应光学(Wavefront-less AO)系统成为近些年来 AO 技术发展的新热点。国外大量研究表明,在无波探测自适应光学控制算法中,随机并行梯度下降(SPGD)算法是一种极具应用潜力的算法。美国的 Vorontsov 等<sup>[3]</sup>最早从数值仿真和实验两方面分析了 SPGD 算法用于扩展目标成像的自适应光学静态扰动校正。文献[4]中 Vorontsov 等从理论上分析了 SPGD 算法,并用超大规模集成电路(VLSI)实现了该算法,进行了点源成像和光束传输静态和动态波前畸变校正实验。文献[5]中, Piotr Piatrou 等对 SPGD 算法在闪烁和强烈大气扰动情况下的应用做了大量的数值仿真。

国内的 SPGD 算法研究始于近几年,中国科学院光电技术研究所的杨慧珍等<sup>[6,7]</sup>仿真与分析了 SPGD 算法,和陈波等<sup>[8]</sup>一起完成了静态波前畸变校正实验。国防科技大学的龙学军、靳冬欢等<sup>[9~11]</sup>也进行了理论及实验研究。但目前国内的研究都限于静态畸变波前的 SPGD 算法校正实验,尚未开展动态波前畸变校正实验(简称动态实验),离实际应用亦有较远距离。本文设计和实现了基于现场可编程门阵列(FPGA)的 SPGD 算法处理器,使用热风式湍流模拟装置和 61 单元变形镜,构建了用于校正动态波前畸变的 SPGD 控制算法自适应光学系统,开展了动态波前畸变校正实验,对 SPGD 算法的校正能力和控制带宽进行了初步的实验研究。

## 2 多单元变形镜控制的 SPGD 算法

在自适应光学中,SPGD 算法利用性能指标的变化量和控制参数的变化量对控制参数的梯度进行估计,通过迭代在该梯度方向上进行搜索,最终找到性能指标的极值,完成对像差的校正。在实验中采用关系式

$$\mathbf{u}^{(n+1)} = \mathbf{u}^{(n)} + \gamma \Delta \mathbf{u}^{(n)} \Delta J^{(n)} \quad (1)$$

的 SPGD 算法更新变形镜上的校正电压。式中  $\mathbf{u}^{(n)} = \{u_1^{(n)}, \dots, u_j^{(n)}, \dots, u_N^{(n)}\}$  和  $\mathbf{u}^{(n+1)} = \{u_1^{(n+1)}, \dots, u_j^{(n+1)}, \dots, u_N^{(n+1)}\}$  分别为第  $n$  次和第  $n+1$  次闭环迭代时施加到变形镜  $N$  个驱动器上的校正电压向量; $\gamma$  为增益常数;

$\Delta \mathbf{u}^{(n)} = \{\Delta u_1^{(n)}, \dots, \Delta u_j^{(n)}, \dots, \Delta u_N^{(n)}\}$  为第  $n$  次迭代时施加的随机扰动电压向量,各  $\Delta u_j^{(n)}$  相互独立且同为伯努利分布<sup>[4]</sup>,即各分量的幅值相等  $|\Delta u_j^{(n)}| = \sigma, Pr[\Delta u_j^{(n)} = \pm \sigma] = 0.5; \Delta J^{(n)}$  为系统性能指标的变化量。

实验时使用帧转移型 CCD 器件测量性能指标,双边 SPGD 算法在第  $n$  次迭代时,首先生成扰动电压  $\Delta \mathbf{u}^{(n)}$ ,把电压  $\mathbf{u}^{(n)} + \Delta \mathbf{u}^{(n)}$  加到变形镜上,在第一帧等待曝光,在第二帧时采集图像并计算性能指标  $J_+^{(n)}$ ;类似地在第二帧时把电压  $\mathbf{u}^{(n)} - \Delta \mathbf{u}^{(n)}$  施加到变形镜上并在第三帧时采集并计算性能指标  $J_-^{(n)}$ ;三帧结束后计算  $\Delta J^{(n)} = J_+^{(n)} - J_-^{(n)}$ ;最后根据(1)式计算  $\mathbf{u}^{(n+1)}$ ,并重复上述迭代过程。这样,如果 CCD 的采样频率为  $f_s$  帧每秒,则 SPGD 算法的迭代速度为  $f_s/3$  次每秒。

根据应用的不同,SPGD 算法所选取的性能指标也不一样。根据国外文献以及陈波、杨慧珍等<sup>[5,6,8]</sup>的研究结果显示,畸变波前的远场光强平方和性能指标在点目标成像自适应光学校正系统中具有较好的效果

$$J = \iint I^2(x, y) dx dy. \quad (2)$$

## 3 实验与分析

### 3.1 实验装置

该实验系统的整体结构如图 1 所示,主要由激光平行光源、倾斜镜(TM)、变形镜(DM)、波前处理机(包括 FPGA 板和 DA 板卡)、高压放大器(HVA)以及 PC 机(Personal Computer)等组成。光源从激光器发出,扩束成为  $\phi 120$  mm 的平行光,经过像差传输后,再从倾斜镜、变形镜反射,最后经缩束系统聚焦至 CCD 成像。FPGA 从 CCD 探测器采集畸变波前对应的光强信号,根据 SPGD 控制算法计算出控制变形镜面形变化的电压信号,根据光源质心位

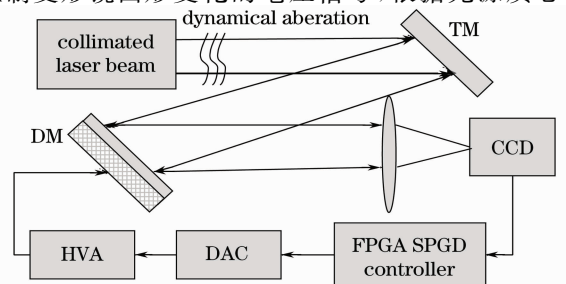


图 1 SPGD 算法自适应光学实验系统

Fig. 1 Diagram of AO system based on SPGD algorithm

置和积分控制算法计算出倾斜镜的电压信号。控制电压通过一个 63 通道的 DA(数模)卡输出,电压范围为 $\pm 5\text{ V}$ ,再经过高压放大到 $\pm 500\text{ V}$ 驱动 61 单元变形镜和倾斜镜。再次由 CCD 探测经变形镜面形校正后的远场光斑,计算性能指标和光斑质心位置,进入下一个控制循环。系统以上述迭代方式对变形镜和倾斜镜进行控制,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 给出了 61 单元变形镜驱动器位置排布。表 1 列出了 SPGD 控制算法实验中所采用的各单元器件型号及其性能参数。其中用于性能指标测量的 CCD 的帧频是 2900 Hz, CCD 的速度决定了系统的控制带宽性能。

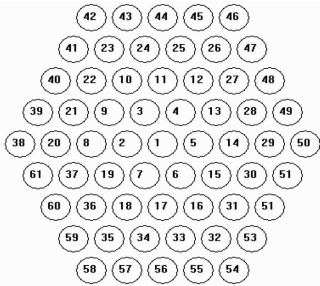


图 2 驱动器排布图

Fig. 2 Actuator arrangement of 61-element DM

表 1 SPGD 控制算法实验用主要单元器件型号及性能参数  
Table 1 Models and parameters of several elements used in SPGD control algorithm experiment

Elements	Models and parameters
Collimated laser beam	solid laser, 532 nm wavelength
CCD	DALSA-CA-D1, $64 \times 64$ pixel resolution, 2900 Hz frame frequency
FPGA	XC2V3000-4bga728, 40 MHz clock frequency
Tilt mirror	180 mm diameter
Deformable mirror	61-element, distance between actuators: 16.4 mm, diameter: 120 mm, maximum distortion: $\pm 3\ \mu\text{m}$

### 3.2 基于 FPGA 的 SPGD 算法处理机

SPGD 算法处理机的硬件部分主要由图 3 中的 FPGA 板, DA 板及母板组成。SPGD 算法则使用硬件编程在 XC2V3000 的 FPGA 内实现。该处理机可同时完成倾斜镜和 61 单元变形镜的控制,它的功能主要包括 8 个部分,分别完成与外部硬件的接口时序处理以及变形镜和倾斜镜的控制。

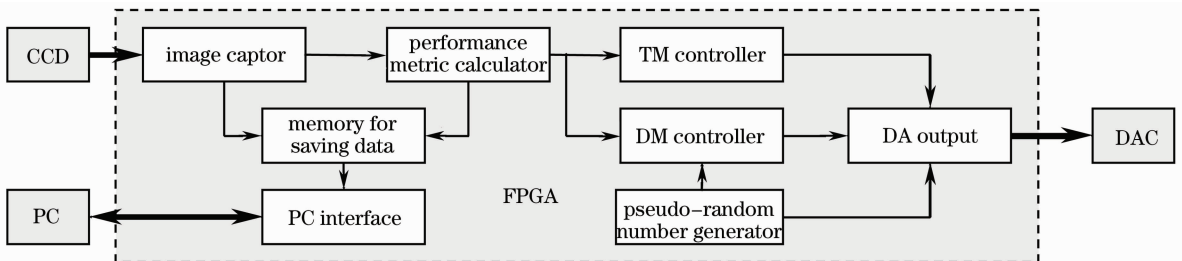


图 3 基于 FPGA 的 SPGD 算法处理机功能模块图

Fig. 3 System architecture of the SPGD controller based on FPGA

处理机的特点如下:

1) 提供与 CCD, PC 机, DA 卡的接口,可从 CCD 读取图像数据,与 PC 机进行数据通信,输出规定数据至 DA 卡。

2) 可生产 68 路伪随机 Gold 序列,以满足 61 单元变形镜的随机扰动叠加<sup>[12]</sup>。

3) 可存储 8 k 次迭代的性能指标以及电压数据。

4) 使用双边 SPGD 算法,每 3 个 CCD 帧为 1 次算法迭代,使用 2900 Hz 帧频的 CCD 时,算法迭代速率为 967 次迭代每秒。

FPGA 是一种可编程的超大规模集成电路,它的硬件电路本质保证了在实现算法时的实时性,同时可编程的特性也使得在算法实现时具有相当大的灵活

性。同时,由于采用流水方式更新变形镜各路驱动单元的电压信号,61 路的电压更新耗费 63 个时钟周期。当系统时钟频率为 40 MHz 时,完成变形镜 61 路电压的更新耗时总计  $1.575\ \mu\text{s}$ 。而用于电压更新的 CCD 消隐期总时长为  $21\ \mu\text{s}$ ,远远大于更新 61 路电压的时长,因此该处理机完全有能力扩展和升级至更多单元数或更快的迭代速度。

### 3.3 动态扰动的模拟

国内外文献资料中提到用多种方式产生人造大气湍流。国内有中国科学院安徽光学精密机械研究所的湍流模拟池,国外有阿拉巴马大学的液晶电视(LCTV)空间光调制装置<sup>[13]</sup>、科罗拉多大学基于冷热空气混合的湍流箱<sup>[14]</sup>以及马里兰州大学的充液式湍流发生管<sup>[15]</sup>等,但这些装置都比较复杂。在本实验

中使用加热器模拟动态扰动。

图 4 所示的是使用加热器实现的热风式湍流模拟装置示意图,装置的主体部分是一个两端不封闭的四方形铁筒。铁筒下部内侧水平放置了 6 只 100 Ω 陶瓷电阻,外加电压使其发热以加热周围的冷空气。陶瓷电阻每 3 个串联后再并联,等效阻值为 150 Ω。铁筒顶部放置一抽气式风扇,风扇向上抽取热空气产生垂直于光束传输方向的横向风。光束从铁筒一端进入,经过流动热空气从铁筒另一端射出后,就叠加了模拟湍流产生的动态波前畸变。通过改变陶瓷电阻的外加电压,可以改变电阻的发热温度,从而调节湍流的强弱。

根据张慧敏等<sup>[16]</sup>的研究,该实验装置能产生基本符合大气湍流统计理论的湍流,因此使用该模拟装置是可行的。

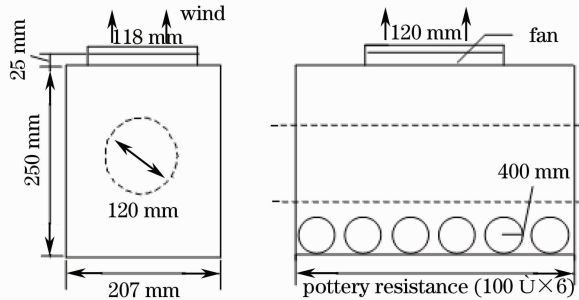


图 4 热风式湍流模拟装置示意图

Fig. 4 Hot-wind experimental atmospheric turbulence generator

### 3.4 动态扰动校正结果

实验时,将湍流模拟装置的陶瓷电阻的电压恒定在 50 V,在预热一定时间,温度基本保持恒定后再进行实验。对于实验结果,从四个方面分别进行了评价:性能指标的平均值;性能指标的归一化标准差;性能指标的直方图统计以及远场光斑的灰度分布图。

动态闭环实验得到的性能指标收敛曲线如图 5 所示,取 20 次实验结果的平均。纵坐标为性能指标曲线,横坐标为迭代次数,总计 8191 次迭代,时间约 8.47 s。曲线 1 为开环情况时的曲线,曲线 2 为使用变形镜及倾斜镜同时校正的闭环曲线前。2000 次迭代主要以校正静态像差为主,曲线有一个向极大值收敛的过程,并且由于动态扰动的幅度较大,收敛速度较慢。在完成静态校正过程之后,性能指标保持在一个较高的值,较之于开环情况下,4000~8000 次迭代区间内的性能指标平均提升了 30 倍以上。

归一化标准差反应了性能指标的波动程度,表达式为

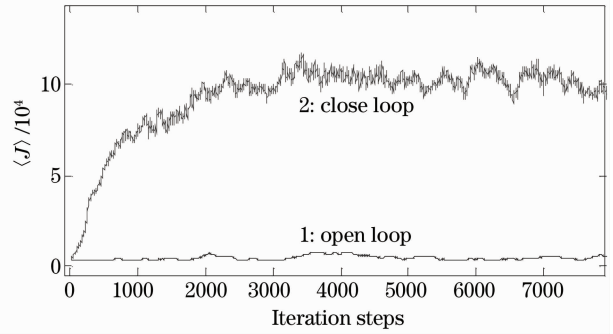


图 5 动态实验的性能指标曲线

Fig. 5 Performance metric curves obtained from averaging over 20 trials of dynamical wave-front distortion correction experiment

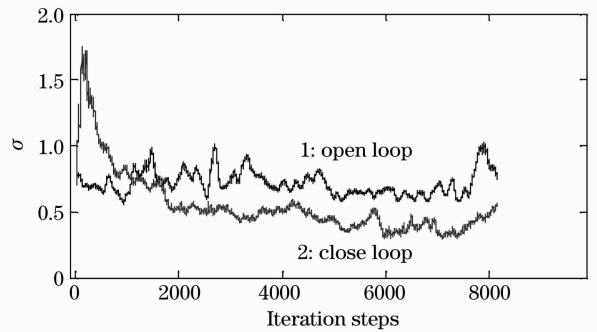


图 6 动态实验的标准差曲线

Fig. 6 Standard deviations curves of open loop and close loop

$$\sigma_J = \frac{\langle [J(m) - \langle J \rangle]^2 \rangle^{1/2}}{\langle J \rangle} \quad (3)$$

结果如图 6 所示,在收敛的后期,性能指标的归一化标准差都有所减小,说明算法对性能指标的波动有控制作用。较之于校正前的波动程度,校正后的性能指标波动幅度虽然较大,但相对幅度却有所减少。

直方图是将性能指标的值划分为多个等长区间,统计落入每个区间内的性能指标值而绘制成的图,Mst 表示性能指标 J 在某一区间的数量,它体现了性能指标值的分布情况,如图 7 所示,在校正前,

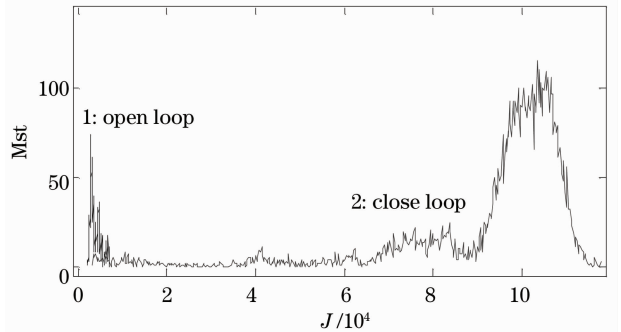


图 7 性能指标的直方图分布

Fig. 7 Performance metric histograms of open loop and close loop



性能指标都分布在值较小的范围内,经过校正后,性能指标大部分都分布在值较高的范围。从图 7 也能明显推断出动态波前畸变的校正效果。

图 8 为各种情况下的远场光斑分布图,图中  $x$  和  $y$  轴坐标分别为 CCD 像素数。多幅图像平均后,即长曝光情况下,闭环后的峰值较开环提高了 10 倍。单次实验的远场光斑分布其校正后的峰值比较正前亦提高了约 12 倍。根据图 8,单次开环的峰值

要高于平均开环,而单次闭环的峰值亦高于平均闭环,这是因为开环时,光斑的质心由于扰动会发生变化,因此在多幅图像平均后,峰值会下降;而闭环时使用了倾斜镜,可以将光斑质心校正到 CCD 靶面中心,但由于校正是一个动态的过程,此过程中不可能完全使得峰值正好在中心点上,故而多幅图像平均后,闭环平均远场光斑的峰值仍比单次闭环的峰值要小。

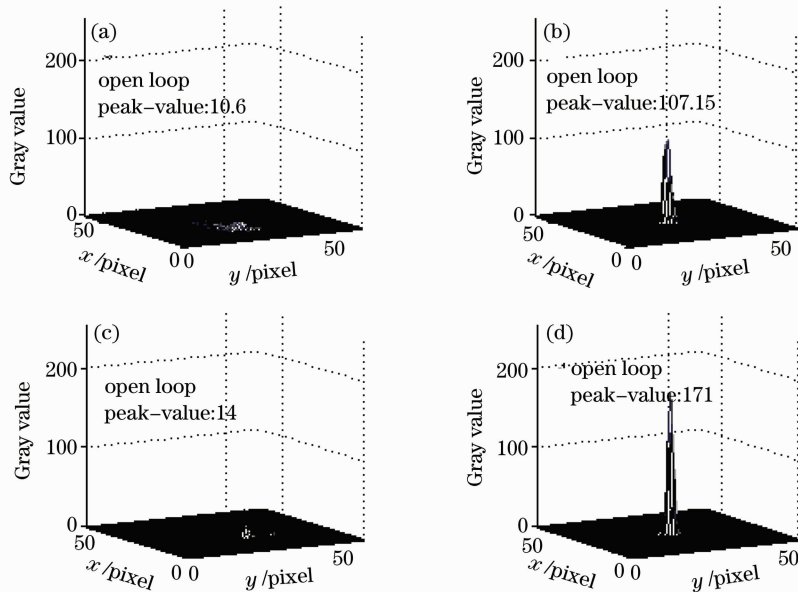


图 8 动态实验中不同情况下的远场光斑分布。(a),(b)为 20 次实验平均后的图像;(c),(d)为单次实验的图像

Fig. 8 Far-field intensity distributions and peak-values. (a),(b) averaged results from 20 trials;

(c),(d) result from one trial

### 3.5 讨论与分析

通过实验结果,可以看出基于 FPGA 实现的 SPGD 控制算法 AO 系统具有较好的校正效果,能够大幅度提升性能指标以及光束质量。以上是定性的实验结论,下面从频谱的角度定量分析本 AO 系统对动态扰动的校正能力。

选取一次实验中校正前与校正后的性能指标曲线的 4096 个样点(选取校正后的性能指标曲线,消除静态误差之后的部分),对它们分别做快速傅里叶变换(FFT)运算后得到一次实验的开闭环性能指标曲线的频谱对比图。之后将 10 次实验得到的频谱做平均,可得到图 9。因为开闭环时性能指标的水平幅度都不相同,为了方便对比,对频谱进行了归一化处理,即除以各自频谱总能量。这样所比较的就是各频率成分在总能量中所占的比重,记作  $S_j$ 。由于 AO 系统能够校正较低频率成分的扰动,因此校正后性能指标曲线的低频成分应该低于校正前,而高频成分则高于校正前,在低频与高频之间两条频

谱会出现一个交叉点,这个交叉点就可认为是 AO 系统的控制带宽。

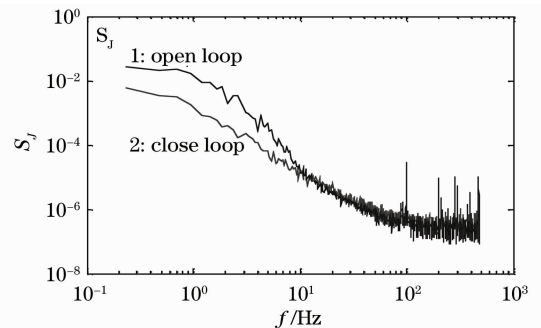


图 9 性能指标曲线频谱对比图

Fig. 9 Spectrums of the performance metric from both with and without adaptation

从图 9 不容易观察到交叉点,可对其进行适当处理,即将使用闭环曲线除以开环曲线后做对数曲线,二者之比记作 ratio,单位为 dB(图 10),该曲线与零值曲线的交叉点可以明显测量出在 10 Hz,因此,通过对比开闭环频谱,分析可知本文基于 FPGA

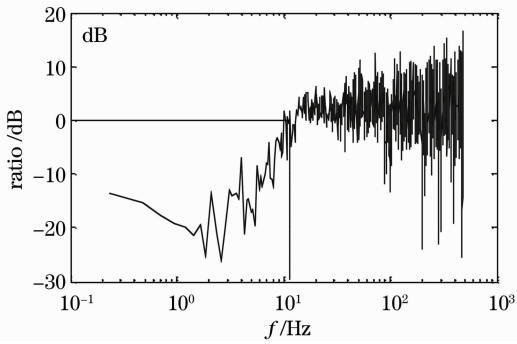


图 10 频谱差曲线

Fig. 10 Subtraction curve of two spectrums in Fig. 9,

the dashed line corresponds to zero

实现的 SPGD 控制算法 AO 系统的有效控制带宽约为 10 Hz。

根据李新阳等<sup>[17]</sup>的研究,常规自适应光学系统存在 2~3 个采样周期的时间延迟,因而有效带宽在 CCD 帧频的 1/30~1/20。由于 1 单元的 SPGD 算法迭代公式与常规自适应光学的迭代方法近似,可认为其有效带宽与常规基于波前测量的 AO 系统的控制带宽相同。本文中 SPGD 算法每迭代 1 次需采样 3 帧,延迟是 3 帧,再考虑到曝光和 DA 保持的时间延迟,总的时间延迟为 4 帧左右,因此 1 单元的 SPGD 算法 AO 系统等效于 4 帧时间延迟的常规 AO 系统,其带宽约为 CCD 帧频的 1/40,即 70 Hz 左右(使用的 CCD 帧频为 2900 Hz)。同时,国外文献表明,对于  $N$  单元的 SPGD 算法自适应光学系统,其收敛速度与  $\sqrt{N}$  成反比<sup>[18]</sup>。于是最后可估算 61 单元的 SPGD 算法自适应光学系统的有效带宽约为  $70/\sqrt{61}$  Hz,即 10 Hz 左右。结合这一推论,表明实验达到的 10 Hz 控制带宽是合理的。

## 4 结 论

使用 FPGA 设计了专用的 SPGD 算法处理机,搭建了 61 单元自适应光学系统,对热风式模拟动态湍流进行了校正实验。校正后的性能指标曲线较校正前平均提升了 30 倍以上,远场光斑峰值也有约 10 倍的提升,充分说明本文所设计的基于 SPGD 算法的自适应光学系统对热风式模拟湍流有较好的校正效果。最后通过对性能指标的频谱分析,表明本自适应光学系统对约 10 Hz 以内的动态扰动具有校正效果。

研究还表明,基于 SPGD 算法的自适应光学系统动态校正能力较弱。要使之能够校正更快的扰动,自适应光学系统应设法得到更快的迭代速度,如

果采用速度更快的 CCD 相机,或者使用光电倍增管阵列等。同时,使用专用的硬件 SPGD 算法处理机也是得到更快迭代速度的保证。本文所设计的基于 FPGA 的专用 SPGD 算法处理机也具有一定的通用性,稍加改造即可实现更多单元或更高的处理速度。

## 参 考 文 献

- 1 R. K. Tyson. Principles of Adaptive Optics[M]. New York: Academic, 1991
- 2 B. M. Levine, A. Wirth, H. DaSilva. Active compensation for horizontal line-of-sight turbulence over near-ground paths[C]. SPIE, 1998, **3233**: 221~232
- 3 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient descent optimization[J]. Opt. Lett., 1997, **22**(12): 907~909
- 4 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
- 5 Piotr Piatrou, Michael Roggemann. Beaconless stochastic parallel gradient descent laser beam control: numerical experiments[J]. Appl. Opt., 2007, **46**(27)
- 6 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2008, **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
- 7 Yang Huizhen, Cai Dongmei, Chen Bo *et al.*. Analysis of adaptive optics techniques without a wave-front sensor and its application in atmospheric laser communications[J]. Chinese J. Lasers, 2008, **35**(5): 680~684  
杨慧珍,蔡冬梅,陈波等. 无波前传感自适应光学技术及其在大气光通信中的应用[J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 680~684
- 8 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
- 9 Long Xuejun. The study of the adaptive wavefront control technique based on the optimization of the image-quality-metric function [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006  
龙学军. 基于像质评价函数最优化的自适应波前控制技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2006
- 10 Jin Donghuan. Research on wave-front correction technique based on the stochastic parallel gradient descent algorithm [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006  
靳冬欢. 基于随机并行梯度下降算法的波前校正技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2006
- 11 Wang Sanhong, Liang Yonghui, Long Xuejun *et al.*. Multilevel wavefront correction technique based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Chinese J. Lasers, 2009, **36**(5): 1091~1096  
王三宏,梁永辉,龙学军等. 基于随机并行梯度下降算法的多级波前校正技术[J]. 中国激光, 2009, **36**(5): 1091~1096
- 12 Zhang Jinbao, Chen Bo, Li Xinyang. A method of generating multiple pseudorandom sequences based on FPGA technology and its application[J]. Control & Automation, 2009, **25**(10): 153~

155

张金宝,陈波,李新阳. 基于FPGA的多路伪随机序列的生成方法及其应用[J]. 微计算机信息, 2009, **25**(10): 153~155

13 T. S. Taylor. Turbulence simulation and optical processing through turbulence media[C]. *SPIE*, 1997, **3073**: 404~415

14 A. K. Majumdar, J. A. Diubaldo. Laboratory simulation of atmospheric turbulence for laser propagation: design and characterization[C]. *SPIE*, 1998, **3432**: 50~56

15 C. C. Davis. Characterization of a liquid-filled turbulence simulator[C]. *SPIE*, 1998, **3432**: 38~49

16 Zhang Huimin, Li Xinyang. Measurement of a hot-wind laboratory atmospheric turbulence generator with Hartman wavefront sensor [J]. *Opto-Electronics Engineering*, 2004, **31**(z1):

4~7

张慧敏,李新阳. 热风式大气湍流模拟装置的哈特曼测量[J]. 光电工程, 2004, **31**(z1): 4~7

17 Li Xinyang, Jiang Wenhan. Effective bandwidth analysis of adaptive optics control system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1697~1702

李新阳,姜文汉. 自适应光学控制系统的有效带宽分析[J]. 光学学报, 1997, **17**(12): 1697~1702

18 G. W. Carhart, J. C. Ricklin, V. P. Sivokon *et al.*. Parallel perturbation gradient descent algorithm for adaptive wavefront correction[C]. *SPIE*, 1997, **3126**: 221~227

## 《中国激光》“新型光纤传感器件及网络技术”专题 征 稿 启 事

光纤传感是光传感领域的重大技术革命,光纤传感以其独特的优越性,已成为现代传感技术发展的主流方向。光纤传感是一门发展十分迅速的新兴技术科学,所提出的新原理、新方法和新技术已取得了诸多辉煌的成就。同时,伴随着网络技术的发展,光纤传感对现代光传感技术的发展产生了不可估量的作用。《中国激光》计划于2010年6月正刊(EI核心收录)上推出“新型光纤传感器件及网络技术”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“新型光纤传感器件及网络技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 光纤传感及网络技术: 如基于光纤及光纤光栅的化学、生物、环境、物理、机械等传感器件、传感系统及传感网络技术等;
- 新型光纤传感及技术: 如光纤干涉及偏振传感技术、光子晶体光纤传感技术、微光纤传感技术等;
- 分布式光纤传感技术: 如以拉曼散射、布里渊散射等为基础的光纤传感技术;
- 光纤智能结构和材料: 包括结构设计、诊断方法、制作工艺、典型应用等;
- 用于光纤传感的无源及有源器件: 如光源、探测器等;
- 其他

特邀组稿专家:

徐安士 教授 北京大学

张伟刚 教授 南开大学

截稿日期: 2010年3月20日

投稿方式以及格式: 可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“新型光纤传感器件及网络技术”投稿), 详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>。本专题投稿文体不限, 中英文皆可, 其电子版请使用 MS-word 格式, 有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话: 021-69918427。

《中国激光》编辑部