

文章编号: 0253-2239(2009)03-0582-05

# 随机并行梯度下降湍流场光束净化的 实时校正实验研究

王三宏 梁永辉 龙学军 谢文科 毛宏军 于起峰

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 自适应光学技术可用于补偿高能激光系统出射光束的波前畸变以改善光束质量。为研究随机并行梯度下降(SPGD)自适应光学方法用于光束净化的可行性,分别采用高速光电探测器和高速变形镜作为系统性能评价函数的测量器件和波前校正器件,搭建了迭代速率为 100 Hz 的 SPGD 自适应光学系统,并且对通电电阻丝产生的湍流所造成的动态波前畸变进行了实时校正。实验结果显示,此套自适应光学系统能够对在 4 Hz 以下频率范围内缓慢变化的动态波前畸变进行实时校正,针孔中远场光斑的能量提高 2.2 倍,稳定性提高 1.4 倍。这表明 SPGD 自适应光学系统用于光束净化是可行的。

**关键词** 自适应光学; 光束净化; 随机并行梯度下降; 动态畸变; 针孔

中图分类号 TP273.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0582

## Experimental Research for Real-Time Beam Cleanup in Turbulence Based on Stochastic Parallel-Gradient-Descent Method

Wang Sanhong Liang Yonghui Long Xuejun Xie Wenke Mao Hongjun Yu Qifeng

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

**Abstract** Adaptive optics can be used to compensate wave-front aberrations of output beam from high-power laser system for improving beam quality. To investigate the feasibility of adaptive optics method based on the stochastic parallel gradient descent (SPGD) for beam cleanup, a SPGD adaptive optics system with iterative rate of 100 Hz is built up, in which a high-speed photodetector is used as the measurement device of the system's performance evaluation function, and a high-speed deformable mirror is served as the wave-front corrector. Dynamic wave-front aberrations caused by the heat flow turbulence of a resistance coil, are corrected in-real-time by the SPGD adaptive optics system. The experimental results show that the above-mentioned system can correct dynamic wave-front aberrations changing in the frequency range of 4 Hz below, resulting in both a 2.2-fold increase of the energy and a 1.4-fold increase of the stability of the far-field spot in the pinhole. It is indicated that the SPGD adaptive optics method is feasible for beam cleanup system.

**Key words** adaptive optics; beam cleanup; stochastic parallel gradient descent (SPGD); dynamic aberrations; pinhole

## 1 引 言

在 高 能 激 光 系 统 中, 激 光 介 质 折 射 率 分 布 的 不 均 匀 性、激 光 谐 振 腔 的 失 调 以 及 由 于 加 工 精 度 受 限 和 光 能 吸 收 后 的 热 变 性 所 引 起 的 谐 振 腔 中 各 光 学 器

件 的 面 形 误 差 等 因 素 都 会 导 致 激 光 器 输 出 光 束 的 波 面 发 生 畸 变, 从 而 大 大 降 低 光 束 质 量。近 年 来 对 基 于 随 机 并 行 梯 度 下 降 (SPGD) 方 法 的 自 适 应 光 学 的 广 泛 研 究<sup>[1~4]</sup>, 推 动 了 其 在 高 能 激 光 系 统 光 束 净 化

收稿日期: 2008-04-25; 收到修改稿日期: 2008-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(60708029)资助课题。

作者简介: 王三宏(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: sanhongwang@gmail.com

导师简介: 于起峰(1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事光测图像处理与自适应光学技术等方面的研究。

E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

中的应用,以校正此缓慢变化的波前畸变,改善输出光束质量。这种随机并行梯度下降自适应光学系统通过控制波前校正器件来优化反映波前畸变大小的系统性能评价函数,从而达到实时消除系统中的各种波前像差,提高光束质量的目的。该方法相较于基于波前测量的畸变校正方法具有结构简单、计算量小、便于向空间高分辨率扩展的优势,但同时也存在需要多次迭代才能收敛到极值的缺点。因此为了提高这种自适应光学系统工作的实时性,必须提高系统硬件的执行速度。

在此前基于 CCD 相机测量系统性能评价函数的 SPGD 自适应光学实验中,由于所用 CCD 帧频较低,限制了实验系统只能进行一些静态像差及模拟动态波前畸变的校正实验<sup>[5,6]</sup>。为此,本文采用了新的系统性能评价函数及测量手段,采用针孔截取远场部分光斑,然后用高速光电探测器测量其光强,将输出电压作为系统性能评价函数<sup>[7,8]</sup>。相对于以 CCD 相机测量系统性能评价函数的方法来说,新的评价函数测量方法无论从硬件响应速度还是计算量来说都极大地节约了时间。根据系统硬件的响应速度,本实验中 SPGD 自适应光学系统的迭代速率达到了 100 Hz,初步具备了对缓慢变化的波前畸变进行校正的能力。因此,用电阻丝产生适当强度的湍流,使得通过此湍流的激光束发生动态波前畸变,然后使用 SPGD 自适应光学系统对此波前畸变进行了实时校正实验,从而验证了此系统能够对动态波前畸变进行校正。

## 2 实验方案

### 2.1 实验装置

实验系统结构示意图如图 1 所示。He-Ne 激光束经滤波、扩束后入射到变形镜上,变形镜的面形受 SPGD 控制器输出的电压控制,光束从变形镜面反射后受到加热器(heater)产生的湍流作用而发生波前畸变。受畸变光束再经透镜聚焦到远场并经显

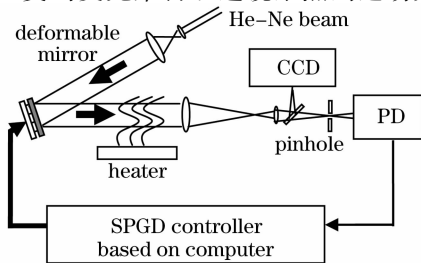


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental system

微物镜放大,分光平片将反射光成像在 CCD 上,用于监视;透射光像面上放置一个针孔(pinhole)截取部分光功率,经光电探测器 PD 测量后输出电压,用 AD 卡采集到 SPGD 控制器中作为系统性能评价函数。

实验使用的变形镜为中科院成都光电技术研究所研制的 37 单元反射式连续面形压电陶瓷变形镜,通光口径为 100 mm,在高压放大器驱动下的一 3 dB 带宽为 2 kHz。成像透镜 L 的口径为 110 mm,焦距为 1100 mm。针孔的孔径为 90  $\mu\text{m}$ ,约为艾里(Airy)斑直径的 0.75 倍。光电探测器为 Thorlabs 公司的 PDA36A-EC,工作于 30 dB 放大档位上时的带宽为 785 kHz,RMS 噪声为 2 mV。AD 转换采用 NI 公司的 NI6251 采集卡,分辨率为 16 bit,单通道最大采样频率为 1.25 MHz。远场光斑监视采用的是德国 AVT 公司的 GUPPY F080B CCD 相机,分辨率为 1032 $\times$ 778,连续工作时帧频为 25 Hz。加热器用弯成“W”形的电阻丝制成,在光束正下方距光轴约为 20 cm,通电后产生的热功率约为 7 W。

### 2.2 SPGD 波前控制方法

设系统性能评价函数  $J$  是施加在变形镜驱动器上的控制电压信号的函数,即:  $J = J(\mathbf{u}) = J(u_1, u_2, \dots, u_N)$ ,  $N$  是驱动器个数。SPGD 算法通过对  $\mathbf{u}$  同时施加统计独立的随机扰动得到  $J$  的各梯度分量的估计,然后按梯度下降算法公式完成迭代。具体地,即在每次迭代过程中,对控制电压先后施加正、反两组随机扰动,利用两次扰动后  $J$  的变化量

$$\delta J = J(u_1 + \delta u_1, \dots, u_j + \delta u_j, \dots, u_N + \delta u_N) - J(u_1 - \delta u_1, \dots, u_j - \delta u_j, \dots, u_N - \delta u_N),$$

将其与单个扰动电压的乘积  $\delta J \delta u_j$  作为梯度分量  $\partial J / \partial u_j$  的近似,代入梯度下降法迭代公式就得到 SPGD 算法的迭代公式:

$$u_j^{(n+1)} = u_j^{(n)} - \gamma \delta J^{(n)} \delta u_j^{(n)}, \quad j = 1, \dots, N \quad (1)$$

其中  $\gamma$  为迭代增益系数,  $\gamma > 0$  对应于  $J$  的极小化,  $\gamma < 0$  对应于  $J$  的极大化;上标  $n$  表示迭代次数。

### 2.3 SPGD 算法参数的确定

SPGD 算法在实际应用中的一个困难是扰动电压幅度  $\sigma = |\delta u_j|$  和增益系数  $\gamma$  的确定,其取值对收敛过程的快慢及收敛终态有很大影响<sup>[8~10]</sup>。扰动电压幅度小,收敛终态好,但是受系统噪声影响,其取值也不可能无限小,而且较小的扰动电压幅度也增加了陷于局部极值的风险;扰动电压幅度大,收敛过程快,但是过大的取值一方面会使梯度分量估计不准确,另一方面也容易造成收敛终态存在较大的振荡。增益系数除受扰动电压幅度取值的影响外,

也存在一定的取值范围。增益系数小,收敛终态起伏小,但是收敛慢;增益系数大,收敛快,但是容易引起收敛过程中起伏较大甚至不收敛。所以扰动电压幅度和增益系数的取值除了需要根据 SPGD 算法本身来考虑之外,也要兼顾实验环境、系统性能评价函数的形式及取值、收敛速度和收敛终态之间的平衡等因素对其取值的影响。

由于系统中存在高压放大器,在光电探测器输出的低压信号中产生较强的线路串扰和辐射噪声,在采取了隔离与屏蔽措施后,光电探测器输出的电压信号噪声大为减低。为进一步减低高频噪声,本文采用连续采集多个电压求平均值作为系统性能评价函数。具体地,实验中设定采集卡的工作频率为 200 kHz,连续采集 100 个电压值然后求其平均值作为系统性能评价函数。

由于测量得到 1 个系统性能评价函数需要的时间约为 1.5 ms(采用应答式工作模式,每次采集光电探测器输出电压信号时,都需要开启 AD 采集卡,因

而多消耗了 1 ms 时间),而系统完成一步迭代所需要的时间约为 10 ms,相当于系统性能评价函数测量周期的 7 倍。为确定在一步迭代周期内系统性能评价函数的噪声大小,连续测量了 7000 个系统性能评价函数,然后计算每连续 7 个系统性能评价函数之间的最大与最小值之差,这样共得到 1000 组一步迭代周期内系统性能评价函数的起伏状况,见图 2(a)。显然,系统性能评价函数的噪声在 0.005 V 以下。

给变形镜的所有驱动器同时施加统计独立的扰动电压,然后将扰动电压幅度以 0.002 V 的增幅从 0 V 逐渐增加到 0.098 V 时测量各个扰动电压幅度下系统的性能评价函数,从而得到性能评价函数的改变量与扰动电压幅度的关系。由于扰动电压的分布是随机均匀的,因此进行了 100 次试验,其平均对应关系曲线见图 2(b)。统计这 100 次试验中性能评价函数的改变量为正时的概率,可得此概率与扰动电压幅度的关系曲线,见图 2(c)。

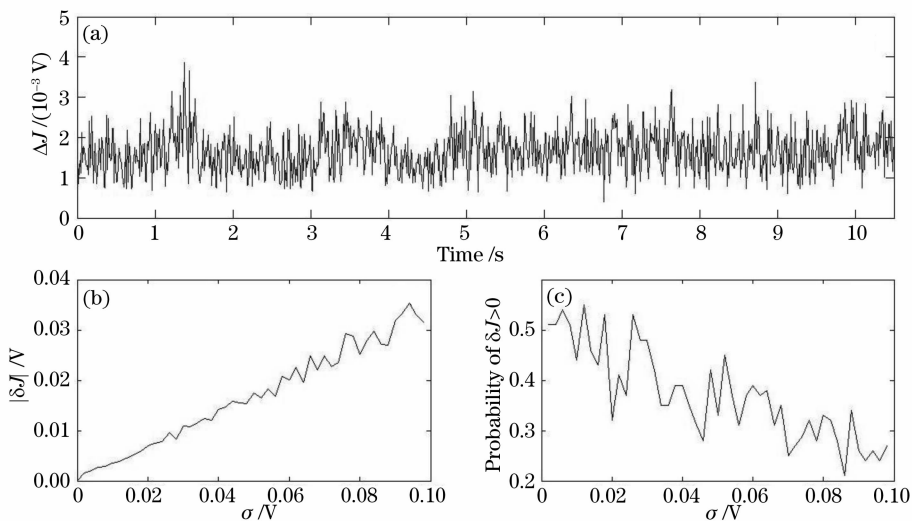


图 2 (a) 单步迭代周期内  $J$  的起伏随时间的变化; (b) 100 次试验对应  $|\delta J|$  随  $\sigma$  的平均变化曲线; (c) 100 次试验对应  $\delta J > 0$  出现的概率随  $\sigma$  的变化

Fig. 2 (a) Fluctuation of  $J$  in an iteration period of single step versus time; (b) averaged evolution of  $|\delta J|$  versus  $\sigma$  over 100 trials; (c) probability of  $\delta J > 0$  versus  $\sigma$  over 100 trials

为得到梯度分量  $\partial J / \partial u_j$  的近似值,必须确保每次扰动后  $\delta J$  至少是  $J$  噪声的两倍。由图 2(b)可知,这要求扰动电压幅度  $\sigma \geq 0.03$  V。然而,由图 2(c)可知,当  $\sigma$  增大时,每次扰动产生的  $\delta J$  出现为正值几率也会减小,导致收敛过程变慢。通常希望  $\delta J$  出现为正值几率应在 40% 以上,这要求扰动电压幅度  $\sigma \leq 0.06$  V。经过对各种因素的综合考虑与反复试验,在本实验中选定扰动电压幅度  $\sigma = 0.05$  V。增益系数则采取了随收敛过程自适应变化的形式:

$$\gamma = \gamma_0 / (c + J), \text{ 其中 } \gamma_0 = 15, c = 0.0001.$$

### 3 实验结果及分析

由于实验中所用的 SPGD 自适应光学系统的迭代速率达到了 100 Hz,已初步具备对动态波前畸变进行实时校正的能力,因此使用此系统对人造湍流产生的波前扰动进行了补偿实验。在实验光路中光束下方放置用电阻丝做成的热源用以产生湍流,电阻丝由可调直流电源供电,可通过调节输出电压

控制温度高低,产生适当强度的湍流场,从而在光束中引入特定的动态波前畸变。

通过调节电源输出电压,将湍流增大到使得实验系统仍能较为稳定地补偿相位畸变而不至于失控的状态。先以 100 Hz 的频率记录下 1000 个在实验系统处于校正开环状态下的性能评价函数值  $J$ ,这 1000 个  $J$  值反映了 10 s 内湍流造成的光束波前畸变的动态变化情况;然后开启校正闭环,同样以 100 Hz 的频率记录下 1000 个系统的性能评价函数。为了统计平均效果,上述过程重复 100 次,实验结果见图 3。图 3(a)和图 3(b)中虚线左侧对应校正开环过

程,右侧对应校正闭环过程。图 3(a)对应 100 次试验的  $J$  值平均演化过程,左侧和右两侧的远场光斑照片分别对应校正开环和闭环过程中的第 500 个  $J$  值。图 3(b)中曲线是 100 次试验的归一化标准偏差  $\sigma_J = \langle [J - \langle J \rangle]^2 \rangle^{1/2} / \langle J \rangle$  的演化过程。可以看出,在施加校正闭环后,经大约 170 步即可收敛到相对稳定状态,相对于校正闭环前,系统性能评价函数提高约 2.2 倍,其起伏稳定性则提高约 1.4 倍。从得到的远场光斑来看,原先散布在较大区域里的能量显著地汇聚到了 Airy 斑内,因此波前畸变得到了补偿,光束质量得到了提高。

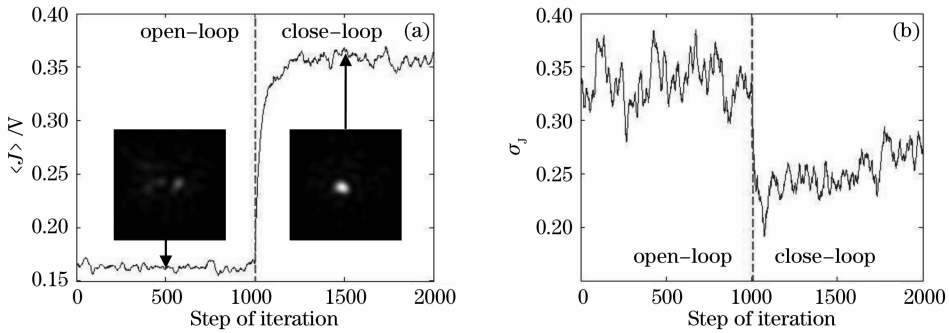


图 3 对通过湍流的光束进行补偿的实验结果。(a)100 次试验的平均性能评价函数曲线,左为校正开环下第 500 步对应的远场光斑,右为校正闭环下第 500 步对应的远场光斑;(b)100 次试验性能评价函数的标准偏差曲线

Fig. 3 Experimental results for compensating the beam propagating through the turbulence. (a) Averaged evolution curve for performance evaluation function over 100 trials. , the left is the far-field spot of the 500th step in open loop, and the right is corresponding to the close loop; (b) standard deviation curve for performance evaluation function over 100 trials

为了分析和比较湍流场产生的波前畸变的动态特性及校正闭环后系统中残存的波前畸变的动态特性,图 4 绘出了图 3 中 100 次试验所对应的系统性能评价函数的平均时间功率谱密度曲线。由于时间零频分量的功率谱密度很大,为了突出显示其他频率成分的功率谱密度,图中没有绘出直流成分。另

外,校正闭环前后,由于系统性能评价函数的大小不同,则其功率也不相同,为了能够比较两者的功率谱,分别用各自的总功率对其功率谱密度曲线做了归一化处理。由图 4 可以看出,此湍流场产生的波前畸变变化较为缓慢,绝大部分频谱分量都集中在 4 Hz 以下。施加校正闭环后,直流成分的功率谱密度得到大大增强,其他频率成分都得到了相当大的抑制,这显示远场光斑要比没有校正前稳定,与图 3(b)结果一致。

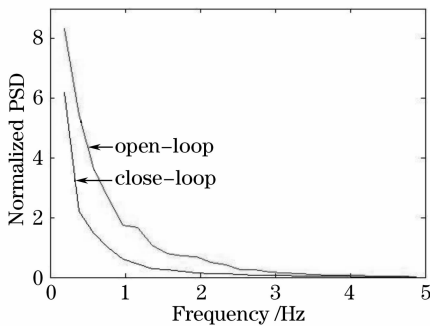


图 4 100 次试验的性能评价函数对应平均功率谱密度曲线

Fig. 4 Aaveraged power spectral density curve for performance evaluation function over 100 trials

### 4 结 论

本文使用针孔截取远场光斑的部分光功率,然后用光电探测器测量并将其输出的电压作为系统性能评价函数。使用工作带宽为 2 kHz 的变形镜作为波前校正器件,在 PC 机上用 VC++ 语言编制的 SPGD 算法程序作为控制器,搭建了迭代速率为 100 Hz 的 SPGD 自适应光学系统。分析了 SPGD 算法中对扰动电压幅度和增益系数进行优化的一些

基本原则和方法。

使用通电的电阻丝产生湍流,使通过此湍流场的光束的波前产生动态畸变。然后用 SPGD 自适应光学系统对此动态波前畸变进行闭环校正。实验表明,对在 4 Hz 以下频率范围内变化的动态波前畸变,迭代速率为 100 Hz 的 SPGD 自适应光学系统可以很好地补偿。实际上,由此湍流引起的波前畸变中存在较大的倾斜分量,如果在 SPGD 自适应光学系统中加入独立的倾斜像差校正闭环,那么则此自适应光学系统所能补偿的动态波前畸变的变化频率还可以更高。

### 参 考 文 献

- 1 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, J. C. Ricklin. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10): 907~909
- 2 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
- 3 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, M. Cohen, G. Cauwenberghs *et al.*. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(8): 1440~1453
- 4 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov, T. G. Bifano *et al.*. Microscale adaptive optics: wavefront control with a  $\mu$ -mirror array and a VLSI stochastic gradient descent controller [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24): 4243~4253
- 5 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  
梁永辉,王三宏,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
- 6 Liang Yonghui, Wang Sanhong, Long Xuejun *et al.*. Beam cleanup technique based on stochastic parallel gradient descent wavefront control method[C]. *SPIE*, 2007, **6823**: 68230H
- 7 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
- 8 V. I. Polejaev, P. R. Barbier, G. W. Carhart *et al.*. Adaptive compensation of dynamic wavefront aberrations based on blind optimization technique[C]. *SPIE*, 1999, **3760**: 88~95
- 9 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov, T. G. Bifano *et al.*. Adaptive optics system with micromachined mirror array and stochastic gradient descent controller[C]. *SPIE*, 2000, **4124**: 178~188
- 10 G. W. Carhart, G. J. Simer, M. A. Vorontsov. Adaptive compensation of the effects of non-stationary thermal blooming based on the stochastic parallel gradient descent optimization method[C]. *SPIE*, 2003, **5162**: 28~36