

文章编号: 0258-7025(2009)10-2763-06

# 随机并行梯度下降自适应光学对主振荡功率放大器激光系统的光束净化实验

王三宏 梁永辉 马浩统 许晓军 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** 主振荡功率放大器(MOPA)固体激光系统中的功率放大器会将热致波前畸变引入到被放大的激光束中,造成输出光束质量变差,可以通过自适应光学(AO)系统实时补偿光束的波前畸变以改善光束质量。采用随机并行梯度下降(SPGD)算法控制一个 37 单元变形镜,通过光电探测器测量远场光斑的桶中功率作为评价光束质量的判据,建立了一个迭代速率为 100 Hz 的最优化自适应光学系统,对由 Nd:YAG 主振荡器与 Nd:YAG 功率放大器组成的 MOPA 激光系统在不同抽运电流情况下的输出光束进行了净化实验。结果显示,净化后光束质量都得到了提高,甚至  $\beta$  因子大于 9 的光束在净化后其  $\beta$  因子也减小了 58%,表明基于随机并行梯度下降算法的自适应光学方法确实可以用于光束净化。

**关键词** 自适应光学; 光束净化; 随机并行梯度下降算法; 主振荡功率放大器; 固体激光

**中图分类号** TP273.2; TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093610.2763

## Beam Cleanup Experiments for Master Oscillator Power Amplifier Laser System by Adaptive Optics Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Wang Sanhong Liang Yonghui Ma Haotong Xu Xiaojun Yu Qifeng

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

**Abstract** Thermal aberrations are introduced into the amplified laser beam in power amplifier of a master oscillator power amplifier (MOPA) solid state laser system and degrade the beam quality. Adaptive optics (AO) system can be used to compensate for the wavefront aberrations in real time to improve the beam quality. An optimization-type adaptive optics system with the iteration rate of 100 Hz was built up. In this system, a 37-element deformable mirror is controlled by the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm with the power-in-bucket of the far-field laser beam as the metric, which is measured by a photoelectric detector. The beam cleanup experiments were performed by the SPGD AO system for the MOPA laser system comprised of Nd:YAG master oscillator and Nd:YAG power amplifier at different pumping currents. The results show that the beam quality is improved in all cases, and even for the beam with a beam quality of  $\beta > 9$ , the  $\beta$  factor is decreased by 58% after cleanup. It is indicated that adaptive optics based on stochastic parallel gradient descent algorithm can be used to beam cleanup.

**Key words** adaptive optics; beam cleanup; stochastic parallel gradient descent algorithm; master oscillator power amplifier; solid state laser

### 1 引言

在主振荡功率放大器(MOPA)固体激光系统

中,功率放大器中的增益介质因吸收抽运辐射而发热,需要冷却装置对其表面散热,因此造成增益介质

收稿日期: 2009-01-15; 收到修改稿日期: 2009-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(60708029)资助项目。

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

导师简介: 于起峰(1958—),男,教授,博士生导师,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

内部不均匀的温度梯度分布,并由此产生机械应力。温度和应力的改变使折射率发生变化,导致激光束的畸变,其中最主要的热效应是热透镜效应与热致双折射<sup>[1]</sup>。热致双折射可通过旋转偏振光束,交换径向与切向偏振分量使之经历相同的畸变过程来消除。热透镜效应则常通过在激光器中插入负透镜来补偿,但这种简单方式不能补偿激光束中动态变化的高阶波前畸变,而这些高阶畸变会严重降低光束质量,限制输出功率的提高。利用受激布里渊散射效应制成的相位共轭镜使激光束沿相同路径以相反方向两次通过放大器,原则上可以完全补偿热致光学畸变,但是这种方法要求激光具有足够高的强度<sup>[2]</sup>。

对于连续波激光器,在功率放大器中加入自适应光学(AO)系统对热致波前畸变进行实时校正,也可以达到净化光束、提高光束质量的目的<sup>[3,4]</sup>。其中基于系统性能评价函数最优化的波前校正方法因其结构紧凑、算法实现简单更适合用于光束净化,该方法根据光束质量评价标准定义一个标量的系统性能评价函数,采用优化算法控制变形镜的校正电压使系统性能评价函数逐渐逼近极值以达到光束净化的目的。作为优化算法中的一种,随机并行梯度下降(SPGD)算法具有收敛速度快、便于在超大规模集成(VLSI)芯片中实现的突出优点<sup>[5]</sup>,因此近几年在自适应光学中得到了广泛研究<sup>[6~10]</sup>,先后在远距离成像<sup>[11]</sup>、空间光通信<sup>[12,13]</sup>与光束相干合成<sup>[14,15]</sup>等应用领域得到了实验验证,取得了很好的校正效果。通过先期研究<sup>[16~19]</sup>,我们在实验室内建立了一套迭代速率为100 Hz的SPGD AO系统,用于净化Nd:YAG功率放大器中的受畸变光束。

## 2 实验方案

### 2.1 实验装置

实验装置如图1所示。Nd:YAG固体激光器作为主振荡器(MO),输出波长为 $1.064\ \mu\text{m}$ ,直径为1 mm的 $\text{TEM}_{00}$ 光束,经4倍扩束镜E1扩束后导入功率放大器(PA)。PA中的增益介质为直径5 mm,长126 mm的Nd:YAG晶体棒,两端被削成凹面以预补偿热透镜效应;Nd:YAG晶体棒由5组激光二极管(LD)环绕侧面抽运,且恒温环绕水冷;功率放大器的抽运电流在10~30 A范围内可调。从PA输出的激光束在功率被放大的同时受到热致畸变,导致光束质量下降。由于变形镜DM直径为100 mm,需要用扩束镜E2将畸变光束扩束到100 mm左右。用分束镜BS1截取适当功率的反射

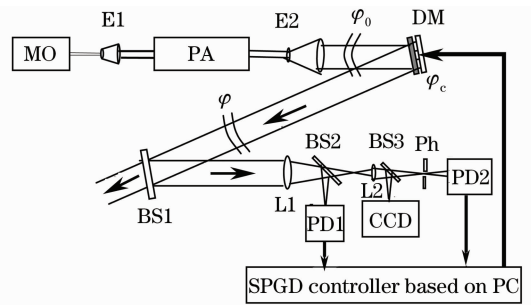


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental system

光束用于测量系统性能评价函数,透射光束即为净化后的输出光束。采用透镜组L1,L2将光束聚焦于针孔Ph上,透过针孔Ph的光经光电探测器PD2采集后输出电压值 $U_2$ ,分束镜BS2反射的光经光电探测器PD1采集输出电压值 $U_1$ 。将同步采集得到的 $U_2$ 与 $U_1$ 之比作为系统性能评价函数 $J = U_2/U_1$ 。CCD用于监视被分束镜BS3反射出的远场光斑。随着抽运电流的增大,输出光束的总功率也得到了增强,为了防止CCD出现饱和,需要根据情况调节衰减片使入射在CCD光敏面上的光功率处于CCD探测范围内。

### 2.2 SPGD控制方法

系统性能评价函数 $J = U_2/U_1 = (R \cdot G_2 \cdot P_2)/(R \cdot G_1 \cdot P_1) = (G_2/G_1) \cdot (P_2/P_1)$ ,其中 $G_1, G_2$ 分别为PD1与PD2的增益倍数(实验中所用光电探测器的增益倍数可在不同档位上切换,通过采用不同的增益倍数 $G_1, G_2$ 以避免超出光电探测器的量程范围), $R$ 为光电探测器的响应率, $P_1, P_2$ 分别为辐照在PD1,PD2上的光功率,显然 $J$ 与远场光斑的桶中功率<sup>[20]</sup> $P_{\text{PIB}} = P_2/P_1$ 成正比,因而可用于衡量光束质量。设 $t$ 时刻待校正波前的相位分布为 $\varphi_0(\mathbf{r}, t)$ ,变形镜引入的补偿相位分布为 $\varphi_c(\mathbf{r}, t)$ ,则光束中的残余相位分布 $\varphi(\mathbf{r}, t) = \varphi_0(\mathbf{r}, t) + \varphi_c(\mathbf{r}, t)$ 。显然 $J(t)$ 是残余相位分布 $\varphi(\mathbf{r}, t)$ 的函数,当 $\varphi(\mathbf{r}, t) = 0$ 时, $J(t)$ 达到唯一极大值。实验中所用37单元变形镜引入的补偿相位分布可进一步表示为 $\varphi_c(\mathbf{r}, t) = \sum_{j=1}^{37} u_j(t) S_j(\mathbf{r})$ ,其中 $S_j(\mathbf{r})$ 为第 $j$ 个校正单元的影响函数, $u_j(t)$ 为加在该单元上的控制电压。由于 $\varphi_0(\mathbf{r}, t)$ 相对于控制电压 $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), \dots, u_{37}(t)]$ 是缓变量,所以可将 $J(t)$ 仅表示为波前校正器控制电压的函数: $J(t) = J[\mathbf{u}(t)]$ 。

按照SPGD算法流程,在每步迭代过程中,先

对所有控制电压同时施加服从 Bernoulli 分布的随机扰动  $\delta \mathbf{u} = (\delta u_1, \dots, \delta u_{37})$ , 然后再施加反向的扰动  $-\delta \mathbf{u}$ , 利用两次扰动后  $J$  的变化量  $\delta J = J(\mathbf{u} + \delta \mathbf{u}) - J(\mathbf{u} - \delta \mathbf{u})$  可以得到  $J$  关于各分量的梯度的随机估计  $\delta J \delta \mathbf{u}$ . 将其代入梯度法的迭代公式即可得到 SPGD 算法的基本迭代公式

$$\mathbf{u}^{(n+1)} = \mathbf{u}^{(n)} + \gamma \delta J^{(n)} \delta \mathbf{u}^{(n)}, n = 0, 1, \dots, \quad (1)$$

其中  $\gamma$  为迭代增益系数, 上标  $n$  表示迭代步数. 当经过多步迭代后,  $J$  趋于极值.

### 2.3 SPGD AO 系统校正精度分析

为简化分析, 设待校正相位分布  $\varphi_0(\mathbf{r})$  的均值为零. 由于变形镜的空间分辨率有限, 因此不可能完全补偿相位畸变, 不过总是存在最优的控制电压使得光束中残余相位分布  $\varphi(\mathbf{r})$  的方差最小. 定义  $L = \frac{1}{s} \iint \varphi^2(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}$ , 其中  $s$  为光束横截面积. 当  $L$  达到最小值时, 存在关系式  $\frac{\partial L}{\partial u_i} = 0, (i = 1, 2, \dots, 37)$ , 展开后可得到

$$\frac{2}{s} \iint \left[ \sum_{j=1}^{37} u_j S_j(\mathbf{r}) + \varphi_0(\mathbf{r}) \right] S_i(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, 37 \quad (2)$$

令  $SS_{ji} = \frac{1}{s} \iint S_j(\mathbf{r}) S_i(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}$  为矩阵  $\mathbf{SS}$  第  $j$  列第  $i$  行的元素,  $B_i = \frac{1}{s} \iint \varphi_0(\mathbf{r}) S_i(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}$  为矢量  $\mathbf{B}$  的第  $i$  个分量, 则(2)式可用矩阵表示为

$$\mathbf{SS} \cdot \mathbf{u}^T = -\mathbf{B}^T, \quad (3)$$

设满足方程(3)的解为  $\hat{\mathbf{u}} = (\hat{u}_1, \dots, \hat{u}_{37})$ , 此时光束的残余相位为  $\hat{\varphi}(\mathbf{r}) = \varphi_0(\mathbf{r}) + \sum_{j=1}^{37} \hat{u}_j S_j(\mathbf{r})$ , 容易证明其均值为零. 采用反证法, 若其均值为  $a$ , 且  $a \neq 0$ , 则

$$\frac{1}{s} \iint \hat{\varphi}^2(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r} = \frac{1}{s} \iint [\hat{\varphi}(\mathbf{r}) - a]^2 d^2 \mathbf{r} + a^2, \quad (4)$$

这与  $\hat{\mathbf{u}} = (\hat{u}_1, \dots, \hat{u}_{37})$  是令  $L = \frac{1}{s} \iint \varphi^2(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r}$  达到最小值的解的事实相矛盾, 因此  $a$  只能为零. 从而方差

$$\sigma_{\hat{\varphi}}^2 = \frac{1}{s} \iint \hat{\varphi}^2(\mathbf{r}) d^2 \mathbf{r} \quad (5)$$

达到最小值,  $\hat{\mathbf{u}}$  即为最优控制电压. 展开(5)式, 并利用(3)式可以得到

$$\sigma_{\hat{\varphi}}^2 = \sigma_{\varphi_0}^2 - \sigma_{\varphi_c}^2, \quad (6)$$

采用 SPGD 波前控制方法来校正相位畸变, 即使控

制电压达到最优控制电压, 但由于总是存在扰动幅度为  $\sigma$  的扰动电压  $\delta \mathbf{u}$ , 因此残余相位分布为

$$\varphi(\mathbf{r}) = \varphi_0(\mathbf{r}) + \sum_{j=1}^{37} \hat{u}_j S_j(\mathbf{r}) + \sum_{j=1}^{37} \delta u_j S_j(\mathbf{r}), \quad (7)$$

其方差为

$$\sigma_{\varphi}^2 = \sigma_{\varphi_0}^2 - \sigma_{\varphi_c}^2 + \sigma_{\delta \varphi}^2. \quad (8)$$

由(8)式可以看出, SPGD AO 系统的校正精度主要受限于变形镜的空间分辨率, 当待校正波前畸变的空间高频分量增大时, 必然导致收敛后残余相位的方差也增大; 另外, SPGD AO 系统的校正精度也受限于扰动电压的幅度, 当扰动电压幅度增大时, 残余相位的方差也会增大. 实际校正过程中, 由于测量噪声的存在, 收敛后残余相位的方差还会进一步增大.

### 3 实验结果

当功率放大器的抽运电流不同时, 光束所经受的热致畸变也不相同, 为此在不同抽运电流情况下采用图 1 所示实验装置对输出光束进行了净化实验, 以验证 SPGD AO 方法用于光束净化的可行性. 图 2~6 分别给出了抽运电流为 0 A, 10 A, 13 A, 16 A 与 19 A 时的光束净化结果. 图中“Closed Loop”标示 50 次净化实验的平均  $J$  值的收敛曲线, “Open Loop”标示未净化时  $J$  值随时间的起伏曲线. 为了直观地比较净化前、后光束质量的提高, 图中照片给出了远场光斑的归一化光强分布图(用净化后各自远场光斑的最大光强值作归一化因子), 左边照片对应 SPGD AO 系统开环情况, 右边照片对应 SPGD AO 系统闭环情况. 图中照片以相同比例尺显示. 照片下标注了对应远场光斑按环围功率(86.5%)定义计算出的直径.

图 2 对应功率放大器未加抽运电流, 系统中不存在动态热致波前畸变的光束净化情况. 开环  $J$

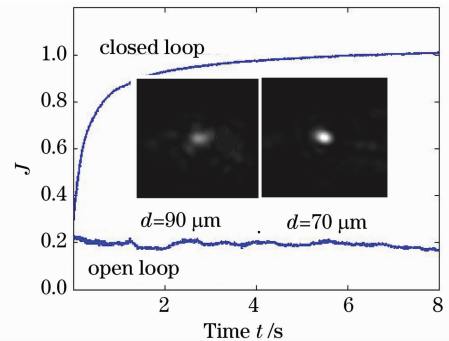


图 2 0 A 时 50 次实验的光束净化结果

Fig. 2 Beam cleanup results of 50 trials at 0 A

值曲线波动很小,变化平稳。SPGD AO 系统仅对系统中的固定像差进行校正,经过大约 1 s 时间即可收敛。净化后远场光斑能量集中度增加,直径减小,将此时的光斑直径记为  $d_0$ 。

当施加抽运电流,功率放大器开始工作后,光功率得到了放大。与图 2 相比,图 3 显示净化前远场光斑形状略有变化,开环  $J$  值曲线随时间变化依然平稳,说明此时出现了热致波前畸变,但与系统中的固定像差相比仍然比较小,动态特性不明显,SPGD AO 系统对此时光束中的波前畸变具有与无抽运电流时一样好的校正效果。需要说明的是,开环  $J$  值的大小与针孔位置的精密调节有关,由于针孔无需恰好对准光斑上光强最强区域而只需要大致地位于光斑上即可,因此当抽运电流不同时远场光斑形状发生变化,开环  $J$  值也会有所不同。当抽运电流增加到 13 A 时,与图 3 相比,图 4 显示净化前远场光斑扩散,热致波前畸变增强,但动态特性依然不明显,SPGD AO 系统对光束的净化效果仍然很好。

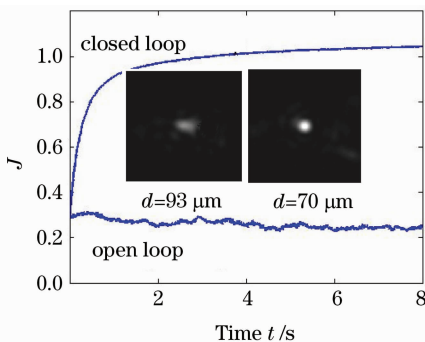


图 3 10 A 时 50 次实验的光束净化结果  
Fig. 3 Beam cleanup results of 50 trials at 10 A

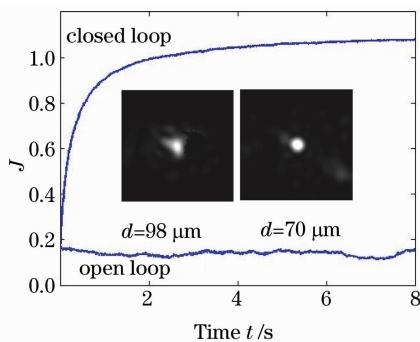


图 4 13 A 时 50 次实验的光束净化结果  
Fig. 4 Beam cleanup results of 50 trials at 13 A

当抽运电流达到 16 A 时,由图 5 开环  $J$  值曲线可以明显看出热致波前畸变已经较为严重,动态起伏增大。净化前远场光斑则破碎成多块子光斑。SPGD AO 系统闭环后  $J$  值曲线依然较为迅速地收敛,但是收敛后的  $J$  值仅达到 0.9,远场光斑虽然集

中为单个光斑,但明显大于图 2~4 中净化后远场光斑且形状不规则。根据 2.3 节关于校正精度的分析,显然此时光束中残余了大量高阶波前畸变,37 单元的变形镜由于空间分辨率不够已经无法校正这些高阶畸变。

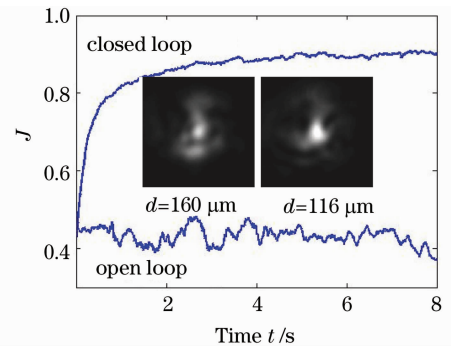


图 5 16 A 时 50 次实验的光束净化结果  
Fig. 5 Beam cleanup results of 50 trials at 16 A

图 6 显示了抽运电流为 19 A 时的光束净化情况。净化前的远场光斑已经扩散到  $9.3 d_0$  大小,造成开环  $J$  值大为减小。闭环后收敛速度下降,经 12 s 校正后的远场光斑仍有大量杂散光没有汇聚到中心,光斑直径仅比净化前光斑直径减小了 28%。造成闭环收敛速度下降的主要原因是热致波前畸变很严重,动态起伏较大,针孔直径相比于远场光斑直径太小导致收敛过程中变形镜扰动引起的  $J$  值变化量相比于动态波前畸变引起的  $J$  值变化量降低,从而影响校正效果。通过在图 7 中对抽运电流为 10 A 与 19 A 时各自 50 次净化实验的  $J$  值标准偏差  $\sigma_J$  随时间变化曲线的比较,可以直观地看到在热致波前畸变增强时, $J$  值收敛过程的不稳定性也增大了。

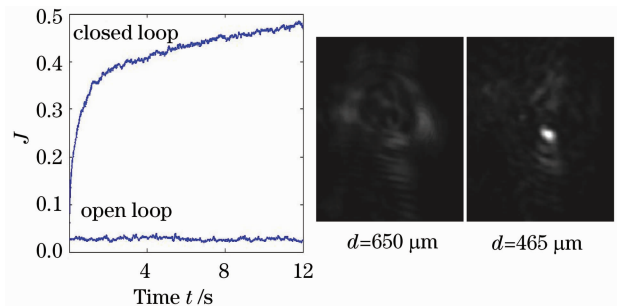


图 6 19 A 时 50 次实验的光束净化结果  
Fig. 6 Beam cleanup results of 50 trials at 19 A

为了改善抽运电流为 19 A 时的光束净化效果,需要增大针孔直径相对于远场光斑直径的比例。图 1 中使用透镜 L2 主要是为了对透镜 L1 焦点上的远场光斑起放大作用,以与  $90 \mu\text{m}$  的针孔直径匹配,因此只需要去掉透镜 L2,使针孔直接位于透镜 L1



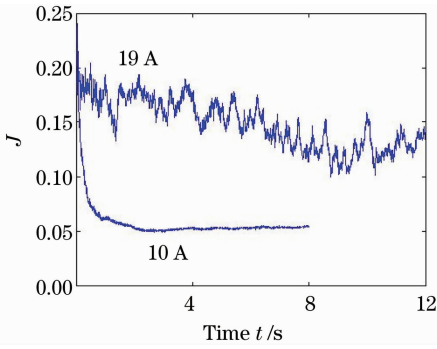


图 7 50 次实验之间  $\sigma_j$  随时间的变化曲线

Fig. 7 Evolution curves of  $\sigma_j$  of 50 trials

的焦点上以增大针孔直径相对于远场光斑直径的比例,如图 8 所示。在调整后的实验装置上对抽运电流为 19 A 时的畸变光束重做了净化实验,实验结果示于图 9,图中照片比例尺与图 2~6 中照片比例尺不同。从图 9 中可以看出,通过提高针孔直径与远场光斑直径的比例,提高了收敛速度,改善了校正过程,净化后远场光斑直径比净化前光斑直径减小了 58%。为了验证新方案确实抑制了  $J$  值波动较大的缺点,图 10 中绘出了改变针孔位置前、后 50 次净化实验的标准偏差  $\sigma_j$  随时间变化的曲线,显然可以看出在新实验中校正过程更为稳定。

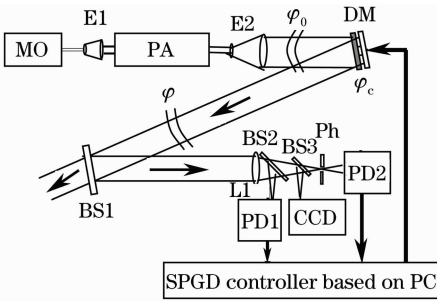


图 8 改进后的实验系统示意图

Fig. 8 Schematic of the experimental system after improved

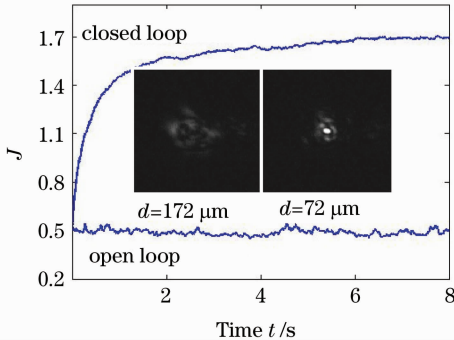


图 9 19 A 时在改进装置上进行 50 次实验的光束净化结果

Fig. 9 Beam cleanup results of 50 trials at 19 A with improved system

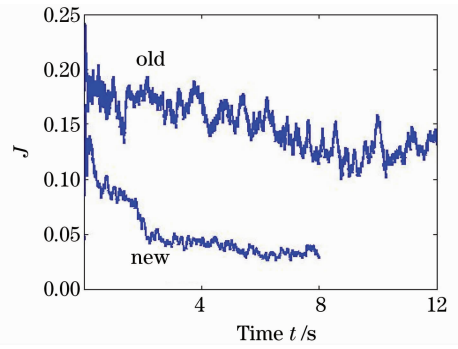


图 10 改进装置上 50 次实验之间  $\sigma_j$  随时间变化曲线

Fig. 10 Evolution curves of  $\sigma_j$  of 50 trials with improved system

### 4 结 论

针对 MOPA 结构的 Nd:YAG 固体激光系统,采用一套具有 37 个控制单元,100 Hz 迭代速率的 SPGD AO 系统进行了光束净化研究。在功率放大器的抽运电流为 0 A,10 A,13 A,16 A 与 19 A 时,对热致波前畸变逐渐增强的光束分别进行了 50 次净化实验。实验结果显示,对热致波前畸变不同的光束,净化后光束质量都得到了不同程度的提高,即使对远场光斑大于 9 倍衍射极限的低质量光束,这套 SPGD AO 系统依然具有较好的校正能力,说明 SPGD AO 方法确实可以用于光束净化。理论上分析了特定空间分辨率的 SPGD AO 系统的校正精度主要受限于待校正波前畸变中空间高频分量的多少,解释了在大抽运电流情况下的光束净化效果要差于小抽运电流情况下的光束净化效果的实验现象。

### 参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 357
- 2 W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 357
- 3 D. A. Rockwell. A review of phase-conjugate solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, QE-24 (6): 1124~1140
- 4 U. Wittrock, I. Buske, H. Heuck. Adaptive aberration control in laser amplifiers and laser resonators [C]. *SPIE*, 2003, 4969: 122~136
- 5 B. Xu, H. Xian, Q. Zhang, et al.. Test of beam cleanup for the annular beam using the 61-element AO system[C]. *SPIE*, 1999, 3762: 296~299
- 6 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, J. C. Ricklin. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(12): 907~909
- 7 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
- 8 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, M. Cohen 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
- 8 M. A. Vorontsov. Decoupled stochastic parallel gradient descent optimization for adaptive optics; integrated approach for wave-front sensor information fusion[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(2): 356~368
- 9 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov. Dynamic wave-front distortion compensation with a 134-control-channel submillisecond adaptive system[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(9): 751~753
- 10 M. Yu, M. A. Vorontsov. Bandwidth estimation for adaptive optical systems based on stochastic parallel gradient descent optimization[C]. *SPIE*, 2004, **5553**: 189~199
- 11 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
- 12 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov. Free-space laser communication with adaptive optics: atmospheric compensation experiments[J]. *J. Opt. Fiber. Commun. Rep.*, 2004, **1**(4): 355~379
- 13 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
- 14 L. Liu, M. A. Vorontsov. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller[C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 58950P
- 15 M. Aubailly, M. A. Vorontsov. Imaging with an array of adaptive subapertures[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1): 10~12
- 16 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
- 17 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
- 18 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
- 19 Wang Sanhong, Liang Yonghui, Long Xuejun *et al.*. Experimental research for real-time beam cleanup in turbulence based on stochastic parallel-gradient-descent method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 582~586  
王三宏, 梁永辉, 龙学军等. 随机并行梯度下降湍流场光束净化的实时校正实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 582~586
- 20 Lü Baida. *Laser Optics: Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 85  
吕百达. *激光光学: 光束描述, 传输变换与光腔技术物理* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 85