

文章编号: 0253-2239(2010)05-1396-06

SPGD 算法光束净化中光强起伏对校正效果的影响研究

王小林 王三宏 周 朴 马浩统 马阎星 许晓军 刘泽金 赵伊君

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 尽管无波前传感自适应光学技术可不受闪烁效应等波前畸变条件的限制,能够有效地补偿高能激光的波前畸变以提高光束质量,但是激光器光强起伏和噪声干扰对校正效果却存在严重的影响。分析了光强起伏和噪声干扰对随机并行梯度下降(SPGD)算法光束净化效果的影响,并进行了相关实验研究。理论分析表明,在光强起伏频率大于等于算法扰动频率时,系统性能随着光强起伏增加而降低;在低频光强起伏时,SPGD算法的抗干扰能力较强。为消除光强起伏对校正效果的影响,提出采用桶中功率作为系统性能评价函数的光束净化方案,理论分析和实验结果都表明,该方案能够有效地消除光强起伏和噪声干扰对校正效果的影响,实现接近校正极限的理想校正效果。

关键词 激光光学;光束净化;随机并行梯度下降算法;光强起伏;性能评价函数;桶中功率

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1396

Investigation on Influence of Laser Intensity Fluctuation on Beam Cleanup System Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Wang Xiaolin Wang Sanhong Zhou Pu Ma Haotong Ma Yanxing
Xu Xiaojun Liu Zejin Zhao Yijun

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

Abstract Although adaptive optics technique without a wave-front sensor can get rid of the restriction of the terms of wave-front aberrations and is an effective way to compensate the wave-front distortion of the high power laser beam to improve the beam quality, the laser intensity fluctuation and the circuit noise will make the performance of the system deteriorate. The influence of intensity fluctuation and the circuit noise on the results of the beam cleanup system based on stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is analyzed, corresponding experiments is done. Result shows that when the frequency of the laser intensity fluctuation is faster than or equal to the disturbance rate, the performance of the system decreases quickly with an increasing amplitude of intensity fluctuation. In the case of low intensity fluctuation rate, the capability of anti-jamming of the SPGD algorithm is excellent. To avoid the influence of the intensity fluctuation and the circuit noise on beam cleanup system, beam cleanup technology based on normalized performance evaluation function: power-in-bucket (PIB) is proposed. Both theoretical and experimental results show that this technology is an effective way to avoid the influence of intensity fluctuation and the circuit noise on beam cleanup system, ideal results approaching the correction limit of the system can be obtained.

Key words laser optics; beam cleanup; stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm; intensity fluctuation; performance evaluation function; power-in-bucket

收稿日期: 2009-06-23; 收到修改稿日期: 2009-07-09

基金项目: 国防科技大学优秀研究生创新(B080702)资助课题。

作者简介: 王小林(1985—),男,博士研究生,主要从事光束净化方面的研究。E-mail: wxllin@nudt.edu.cn

导师简介: 赵伊君(1930—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。

E-mail: zhaoyij70@sina.com

1 引言

自适应光学技术可有效地补偿高能激光的波前畸变以提高光束质量。在较强的湍流效应等情况下,振幅起伏及光束波前产生的不连续性将给基于波前传感器的常规自适应光学技术波前探测带来很大的误差,其补偿效果显著受到限制^[1~5]。基于最优算法的无波前传感自适应光学技术可不受闪烁效应等畸变条件的限制,把波前校正器所需控制信号作为优化参量,以成像清晰度、斯特雷尔比和环围能量等系统性能指标直接作为优化算法的目标函数,从而达到实时消除系统中的各种波前像差,提高系统性能的目的。该技术结构紧凑,不需要复杂的波前探测和波前重构,计算量小,便于向空间高分辨率扩展,适合于在光束净化系统中应用。因此近年来,无波前传感自适应光学技术得到了广泛的研究^[6~13]。由于无波前传感自适应光学系统中,大都以接收光能量作为系统性能评价函数,在无光强起伏和电路噪声干扰情况下,系统将性能评价函数的变化归因于实时的相位扰动。但是光束净化系统中存在的光强起伏和噪声干扰,也必然会导致系统性能评价函数随时间变化,这类变化与相位扰动导致的变化性质不同,而无波前传感自适应光学系统也将其作为相位扰动引起的变化,并以此作为判据对算法进行控制,这将导致相当大的误差,甚至导致波前反而被扰乱。尽管无波前传感自适应光学技术可不受闪烁效应等波前畸变条件的限制,但是光强起伏和噪声干扰对校正效果的影响如何,目前未见相关报道。本文通过数值模拟分析了光强起伏、噪声干扰对随机并行梯度下降(SPGD)算法光束净化效果的影响,给出了光强起伏、噪声干扰与扰动频率和幅度的关系;提出利用桶中功率[桶中功率又称环围功率(PIB),其定义为给定激光光斑半径内包含功率与激光光斑总功率之比^[14]]作为性能评价函数的方案以提高在光强起伏和噪声干扰情况下的光束净化系统的性能。结果表明,该方案能够有效地消除光强起伏和噪声干扰导致的性能评价函数紊乱,得到理想的校正效果。

2 实验原理

基于 SPGD 算法的无波前传感光束净化系统原理如图 1 所示,高能激光器(HEL)输出光经滤波、扩束后入射到波前校正器(变形镜)上。变形镜反射光经过分束镜 BS1 后,反射光作为主激光输

出;透射光经过透镜 L 后被分束镜 BS2 分为两束,一束利用 CCD 进行成像观测,在另一束光的焦斑处放置一小孔 P,探测器 PD1 探测小孔内光强作为系统性能评价函数。性能评价函数的选择有多种方式,选择一倍衍射极限内环围能量作为系统性能评价函数。因此,小孔直径以等于艾里斑直径大小为宜。SPGD 控制器根据性能评价函数,通过相应的算法控制波前校正器,实现光束净化。

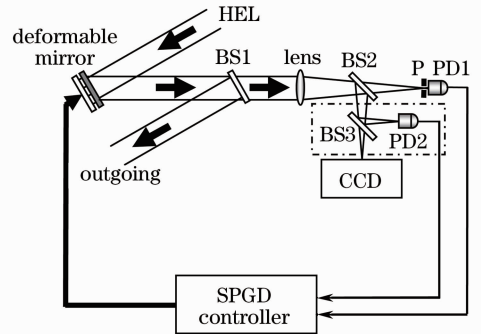


图 1 SPGD 腔外光束净化方案

Fig. 1 Scheme of SPGD extra-cavity laser beam cleanup system

为了提高梯度估计的准确性和算法的收敛性,考虑利用双边扰动 SPGD 算法^[12],其执行过程如下:

- 1) 对波前校正器的各个控制通道施加初始扰动电压 \mathbf{u} ;
- 2) 生成随机扰动电压 $\delta\mathbf{u} = [\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_n]$, 其中 n 为波前校正器的控制通道数;
- 3) 在波前校正器上施加正向的扰动电压 $\mathbf{u} + \delta\mathbf{u}$, 取得正向扰动的性能评价函数 $J^+ = J(\mathbf{u} + \delta\mathbf{u})$; 然后施加反向的扰动电压 $\mathbf{u} - \delta\mathbf{u}$, 取得负向扰动的性能评价函数 $J^- = J(\mathbf{u} - \delta\mathbf{u})$;
- 4) 计算评价函数的变化量 $\delta J = (J^+ - J^-)/2$;
- 5) 根据 $\mathbf{u}^{(k+1)} = \mathbf{u}^{(k)} + \gamma\delta\mathbf{u}^{(k)}\delta J^{(k)}$ (其中 k 为迭代次数), 更新控制参数。

重复步骤 2)~5), 直至评价函数 J 取全局极大值或者指定迭代次数结束。根据 SPGD 算法的原理^[7~13], 当系统性能评价函数取得极值时, 光束质量最优, 从而实现光束净化。理想情况下, 无光强起伏和电路噪声干扰, 但是实际的激光器总存在噪声干扰和光强起伏, 高功率激光的光强起伏尤为严重, 这会严重影响光束净化的校正效果。实际上, 由于光强起伏和噪声干扰反映到最终的系统性能评价函数中, 都是电压信号的变化, 因此, 为了方便, 下面的讨论中将二者都简单描述为光强起伏的作用。

3 数值模拟

3.1 常规无波前传感光束净化系统模拟

基于双边扰动 SPGD 算法,对不同光强起伏幅度和频率下的光束净化效果进行仿真。仿真中,利用 64 单元活塞式变形镜进行波前校正。假设光强起伏服从以光强 I 均值为 1 的高斯白噪声分布。

图 2 为光强起伏频率大于等于算法单次扰动频率的情况。图 2(a)同时给出了校正过程中的性能评价函数演化和校正后的远场光斑分布。可以看到,光强稳定情况下,在 100 步迭代后,已接近系统校正极限,波前均方差(RMS)从 0.094λ 下降到 0.035λ 。当光强起伏为 10% 和 20% 的情形下,系统性能评价函数不能收敛。图 2(b)给出了光强起伏在 $0.05 \sim 0.45$ 时运行 SPGD 算法后的波前均方差。由于一次迭代内,正向、负向扰动时光强改变,不能取得正确的相位信息,校正效果受到激光功率

不稳定的严重影响。仅当光强起伏小于 5% 时,能够得到有效校正效果;在光强起伏大于 10% 时,SPGD 算法运行后的波前均方差反而增加,在光强起伏为 10%,20% 时,SPGD 算法运行后波前均方差为 0.135λ 和 0.271λ ,波前被严重扰乱。

图 3 给出了光强起伏频率为算法单次扰动频率一半的情况。图 3(a)和(b)是在单次迭代中的两次扰动过程中光强无变化的情况得到的结果。仿真结果表明,只要在 SPGD 算法的一次迭代的两次扰动过程中光强不变,当次迭代能够得到正确的相位信息,因此有较好校正效果。分析表明,图 3(a)中达到校正极限后性能评价函数的变化与光强变化是同步的。如果一次迭代内光强发生了变化,不能得到正确的校正相位信息,校正效果较差,甚至反而被扰乱,其实际效果与图 2 类似。

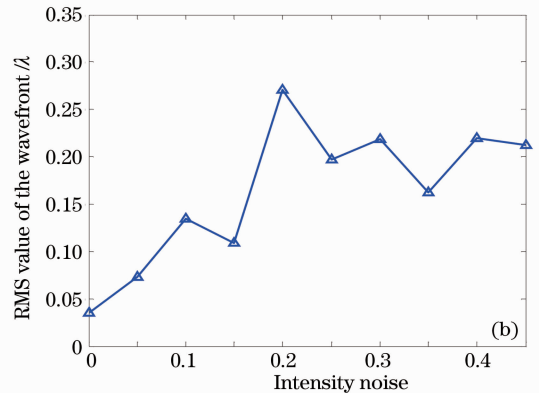
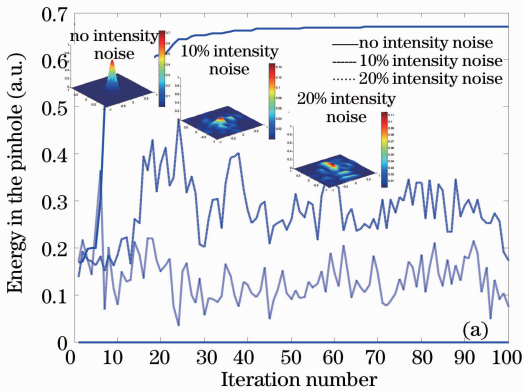


图 2 光强噪声频率大于等于扰动频率的校正结果。(a)小孔内光强变化曲线;(b)不同噪声下得到的波前均方差

Fig. 2 Simulation results when intensity noise frequency is higher than or equal to the disturbance rate. (a) convergence curve of energy in pinhole; (b) RMS value of the wavefront under different intensity noise after the performance of SPGD algorithm

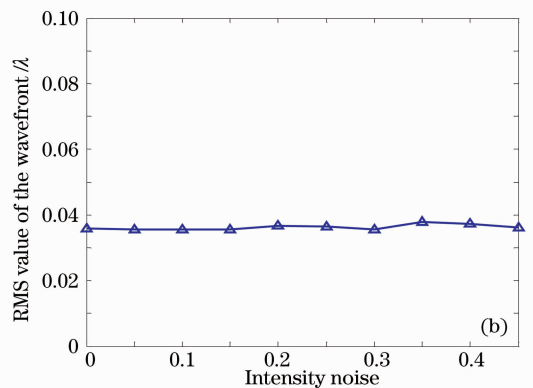
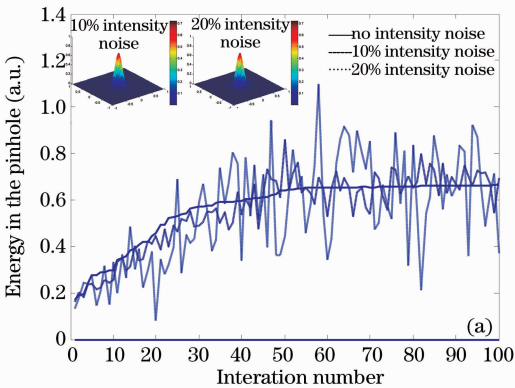


图 3 光强起伏频率为扰动频率的二分之一的校正结果。(a)小孔内光强变化曲线;(b)每次迭代过程中光强不变时不同噪声幅度校正得到的波前均方差

Fig. 3 Simulation results when intensity noise frequency is one half of the disturbance rate. (a) convergence curve of energy in pinhole; (b) RMS value of the wavefront from the different noise amplitude correction when intensity does not change in each iteration

分析表明,在光强起伏频率大于等于 SPGD 算法的扰动频率的情况下,由于每次迭代过程中,正向和负向扰动时光强改变,SPGD 控制器不能取得正确的相位信息,校正效果受到光强起伏的严重影响。在光强起伏频率小于 SPGD 算法频率的一半时,只要保证每次迭代过程中光强不变,当次迭代能够得到正确的相位扰动信息,最终能得到较好的校正效果。因此,SPGD 算法对低频光强起伏和噪声干扰有很好的抗干扰性能。

3.2 改进的“归一化”性能评价函数光束净化系统模拟

为了克服常规无波前传感自适应光学系统中光强起伏对校正效果的影响,可以利用桶中功率作为性能评价函数的方法来消除光强起伏的影响。改进后的光束净化系统如图 1 所示,与原方案不同之处在于增加了一个光电探测器(PD2)用于探测整个光束截面内的光强 I_t ,将艾里斑内光强 I_p 与 I_t 之比作为系

统性能评价函数,即为桶中功率(PIB) $J=I_p/I_t$ 。考虑实际自适应光学系统中,数据采样速率较变形镜系统的响应速率和光强的变化频率高一个数量级以上,对光强 I_t 和 I_p 进行采集时,可以认为光强保持不变。这样,桶中功率作为性能评价函数 $J=I_p/I_t$ 实际上利用归一化的方式消除了光强起伏的影响,理论上能够得到与光强无起伏情况下相同的校正效果。

利用改进的桶中功率作为性能评价函数方案对光强起伏频率大于迭代速率的情况进行数值模拟,得到结果如图 4 所示。图 4(a)的虚线给出了光强起伏均方差为 0.1 和 0.2 时校正过程中归一化性能评价函数演化和校正后的远场光斑分布。图 4(b)为光强起伏均方差在 0.05~0.45 时校正后得到的波前均方差。与图 2 对比可知,利用桶中功率作为系统性能评价函数的方式,得到了与光强稳定情况下相当的校正效果。

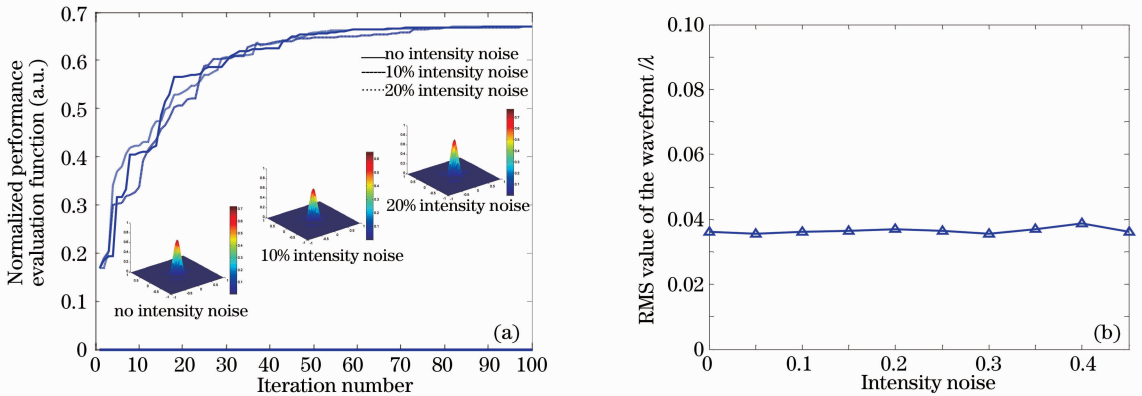


图 4 利用桶中功率作为评价函数得到的校正结果。(a)性能评价函数曲线;(b)不同噪声下校正后波前均方差

Fig. 4 Simulation results when the power-in-bucket is as the performance evaluation function. (a) convergence curve of performance evaluation function; (b) RMS value of the wavefront under different intensity noise after the performance of SPGD algorithm

4 实验与结果分析

实验原理如图 1 所示。实验前测量了在激光器稳定工作前的小孔内光强起伏情况和校正前远场光强分布,如图 5 所示。图 5 描述了无动态波前畸变情况下,小孔内光强在 30 s 内的起伏情况。由于无动态波前畸变,探测到光强变化主要由光强起伏,电路噪声(实验室环境存在峰-峰值为 100 mV 左右的噪声干扰)等引起的。图 5 同时给出了波前校正前的光斑的分布,由于系统静态相差的存在,光斑弥散分布。

实验中,利用图 1 所示的常规光束净化方案,将小孔能量作为系统性能评价函数进行校正。经过 1000 次迭代后,得到的典型实验结果如图 6(a)所示。

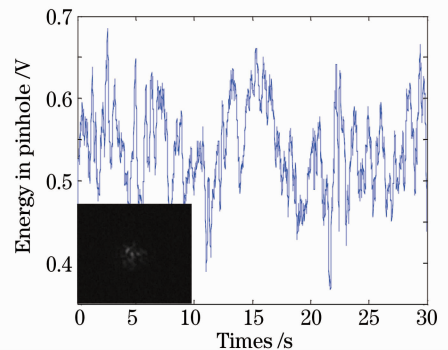


图 5 小孔内光强的变化和校正前光强分布
Fig. 5 Curve of energy in pinhole and laser intensity distribution in far field before correction

由于光强起伏和电路噪声的存在,使得图 6(a)中的判据有一定的起伏,其起伏幅度与测得的小孔光强变化幅度相当。又由于光强起伏的频率(100 Hz 左右)小于算法扰动频率(大于 600 Hz),根据 3.1 节的理论分析,基本能够保证单次迭代内光强不变,因此,尽管光强起伏较大,也能得到很好的校正效果,校正后的光

斑分布如图 6(a)所示。利用桶中功率作为性能评价函数校正后的结果如图 6(b)所示[图 6(b)与图 6(a)中利用的 SPGD 算法参数完全相同],结果表明,系统性能评价函数较图 6(a)平滑,校正后光斑与未归一化无明显的区别。

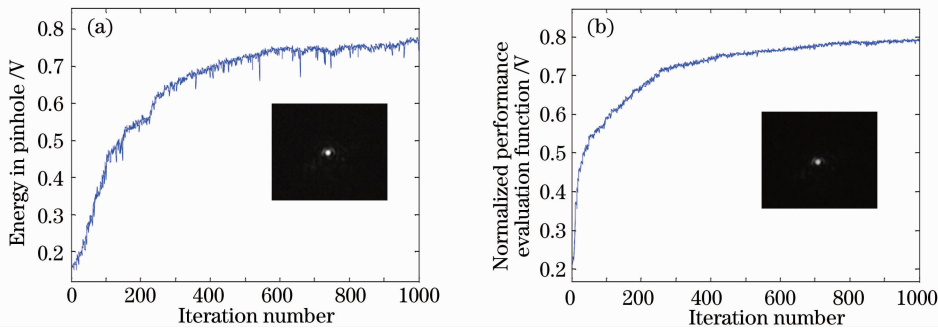


图 6 两种方式下光束净化实验结果。(a)判据未归一化;(b)判据归一化

Fig. 6 Experimental results of the beam cleanup in two ways. (a) performance evaluation function is not normalized; (b) performance evaluation function is normalized

实验表明,只要保证每次迭代过程中光强不变,尽管光强起伏导致校正过程中性能评价函数起伏较大,也能得到较好的校正效果,这与数值仿真结果一致。由于实验使用的激光器光强起伏频率较低,小于迭代频率,桶中功率作为性能评价函数的优势在这里没有完全体现出来,但是从性能评价函数曲线可知,性能评价函数归一化后的确能有效地消除光强起伏的影响,在恶劣电磁干扰和高能激光中光强起伏频率较大时,这种方法的优势将能得到充分体现。

5 结 论

以高功率激光光束净化为背景,分析了光强起伏和噪声干扰对 SPGD 算法光束净化效果的影响。结果表明,光强起伏频率大于等于扰动频率时,仅当光强起伏小于 5% 时,系统能够得到有效的校正;当光强起伏大于 5% 时,SPGD 算法运行后的波前均方差反而增加,以至波前被严重扰乱。在 SPGD 算法执行过程中,只要保证每次迭代过程中光强不变,当次迭代能够得到正确的相位扰动信息,就能够得到较好的校正效果。因此,SPGD 算法对低频光强起伏和噪声有很好的抗干扰性能。为了克服常规无波前传感自适应光学系统中光强起伏对校正效果的影响,提出利用桶中功率作为系统性能评价函数的光束净化进行校正。实验结果表明,桶中功率作为性能评价函数方式能够有效地消除光强起伏和噪声

干扰导致的性能评价函数起伏,得到理想的校正效果。需要指出的是,在光强起伏和噪声干扰存在的情况下,评价光束净化的校正效果,不能单纯以性能评价函数的数值来评判,而应该以校正后的波前来评定。

参 考 文 献

- 1 N. B. Baranova. Wave-front dislocations: topological limitations for adaptive systems with phase conjugation[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1983, **73**(5): 525~528
- 2 C. A. Primmerman, T. R. Price, R. A. Humphreys *et al.*. Atmospheric compensation experiments in strong-scintillation conditions[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(12): 2081~2088
- 3 R. K. Tyson. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(4): 753~758
- 4 Wang Yingjian, Wu Yi, Wang Chao *et al.*. Experimental results of atmospheric-compensation in the horizontal propagation path [J]. *Chinese 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
- 5 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
- 6 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
- 7 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
- 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 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
- 10 Liang Yonghui, Wang Sanhong, Long Xuejun *et al.*. Beam cleanup technique based on stochastic parallel gradient descent wavefront control method [C]. *SPIE*, 2007, **6823**: 11~15
- 11 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
- 12 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
- 13 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
- 14 Su Yi, Wan Min. High-Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 45
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 45

《中国激光》“全固态激光技术”专题 征 稿 启 事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》已于2009年7月出版“全固态激光技术”专集,得到了本领域很多院士和知名专家的大力支持,发表了多篇国内知名课题组的全固态激光技术发展前沿领域的文章,反响非常好。应广大专家、作者和读者的要求,《中国激光》计划于2010年7月继续推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大研究人员征集“全固态激光技术”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:

- 连续全固态激光器;
- 脉冲全固态激光器;
- 光纤激光器;
- 其他

截稿日期:2010年4月15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“全固态激光技术”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