

相干合成中基于 SPGD 算法的平移误差和倾斜误差控制

母杰^{1,2} 景峰^{1,2} 王逍^{1,2} 朱启华^{1,2} 李志林^{1,2,3} 张军伟^{1,2}

¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900
² 等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900
³ 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054

摘要 随机并行梯度下降算法(SPGD)是控制多路激光束的相位锁定,实现相干合成的一种有效方式。在分析平移误差和倾斜误差对相干合成(CBC)影响的基础上,建立 2×2 排布的光束模型探讨了该算法中的增益系数和扰动幅值对平移误差和倾斜误差控制的影响,并对增益系数的优化进行了分析。研究表明,要提高相干合成的效果,必须同时校正平移误差和倾斜误差;随着增益系数和扰动幅值的增加,SPGD 算法的收敛速度加快,但计算精度降低,系统会发生振荡;自适应更新增益系数是一种有效的参数优化方式,可很好平衡算法收敛速度和计算精度问题。为大型固体短脉冲激光装置中基于 SPGD 算法进行相干合成研究提供了理论参考。

关键词 激光光学; 随机并行梯度下降算法; 平移误差; 倾斜误差; 相干合成; 短脉冲激光

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0602002

Error Control of Piston and Tilt Based on SPGD in Coherent Beam Combination

Mu Jie^{1,2} Jing Feng^{1,2} Wang Xiao^{1,2} Zhu Qihua^{1,2} Li Zhilin^{1,2,3} Zhang Junwei^{1,2}

¹ *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*
² *Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Mianyang, Sichuan 621900, China*
³ *State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, 710054 China*

Abstract Stochastic parallel gradient descent (SPGD) is an effective way to achieve multi-channel phase-locked laser beams for coherent beam combination (CBC). In this paper, the influence of piston error and tilt error on CBC is primarily presented. Then, an arrangement model of 2×2 laser beams is built. With this proposed model, SPGD is tested and verified. Key parameters, the gain coefficient and the disturbance amplitude, impacts on the error control performance of the algorithm, are analyzed and optimized. The surveys show that it is necessary to control piston error and tilt error for CBC. When SPGD is used to correct the above errors, the convergence speed of the algorithm is improved with the increase of the gain coefficient and the disturbance amplitude, however, the accuracy of SPGD is reduced and the system is vibrated. In order to improve CBC, the adaptive gain coefficient is studied. Compared with the fixed gain coefficient, the adaptive gain coefficient is able to make a good balance between the convergence speed and the accuracy of the algorithm, which indicates that the adaptive gain coefficient is an effective optimization way. These results in this paper provide a theoretical reference for CBC using SPGD in a large short-pulse laser facility.

Key words laser optics; stochastic parallel gradient descent; piston error; tilt error; coherent beam combination; short-pulse laser

OCIS codes 140.3298; 220.1000; 120.5050

收稿日期: 2013-12-02; 收到修改稿日期: 2013-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(61308040)、国家 863 计划(2013AA8043047)

作者简介: 母杰(1987—),女,博士后,主要从事固体激光器相干组束方面的研究。

E-mail: mujiebest@163.com

导师简介: 景峰(1968—),男,博士,研究员,主要从事高功率固体激光物理和激光技术等方面的研究。

E-mail: jingfeng@163.com(通信联系人)

1 引 言

高功率、高品质激光是激光技术领域的研究热点之一^[1]。由于物质的物理特性、抽运技术、非线性效应等限制,单束激光的输出功率往往是有限的^[2-3]。目前,获取高功率、高品质激光的一种重要技术手段是将多路激光束进行相干合成,通过控制激光束的参数使之实现相干增强叠加,从而获得极高的输出功率密度。很多大型固体短脉冲激光装置中都规划实现多束激光的相干合成(比如美国的 ARC^[4]、日本的 LFEX^[5]、欧洲的 HiPER^[6]等),为强场物理实验和极端条件下的物质特性研究提供条件。

光纤激光质量好、热管理方便、结构紧凑,实现相干合成相对简单,仅通过控制激光束间的平移误差就能获得较好的相干合成效果^[7-8]。与光纤激光不同,大型固体短脉冲激光装置系统庞大、结构复杂,激光束在传输过程中不仅时间同步性会变差,而且在空间上也无法聚焦于同一目标点。因此,在大型固体短脉冲激光装置中进行相干合成,需要同时控制激光束间的平移误差和倾斜误差。相干合成中

常用的误差控制方法有外差法^[9]、多抖动法^[10]以及基于随机并行梯度下降算法(SPGD)等方法。与前两种方法相比,基于 SPGD 的方法统一监测并控制误差,组成结构简单、紧凑,适合应用在大型固体短脉冲激光装置中。

从相干合成的基本条件出发,本文分析了平移误差和倾斜误差对相干合成的影响,建立 2×2 排布的光束模型探讨了 SPGD 算法中的关键参数对平移误差和倾斜误差控制效果的影响,并对关键参数的优化进行了分析,为大型固体短脉冲激光装置中基于 SPGD 算法进行相干合成研究提供理论参考。

2 平移误差和倾斜误差对相干合成的影响分析

根据夫琅和费衍射理论,若激光束的传播方向在 x, y 方向上的倾斜分别为 α 和 β ,光束的初始相位为 ϵ ,各激光束的近场振幅为均匀分布,激光束相干合成后的远场复振幅可以描述为

$$E(u, v) = c \iint \sum_{j=1}^m \exp\{-ik[\alpha_j(x-x_j) + \beta_j(y-y_j) + \epsilon_j]\} \exp[-i2\pi(f_x u + f_y v)] dx dy, \quad (1)$$

式中 $c = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikf) \exp\left[i \frac{k}{2f}(u^2 + v^2)\right]$ 为系数因子, m 为参与合成的激光束个数, f 为传播距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, (x, y) 和 (u, v) 分别为近场和远场坐标, $(f_u = u/\lambda f, f_v = v/\lambda f)$ 为远场空间频率。相干合成后的远场强度分布为: $I(u, v) = |E(u, v)|^2$ 。

下面分析平移误差和倾斜误差对相干合成的影响。为了简化分析,以 2 路呈 1×2 排布的激光束为例进行研究。

2.1 平移误差对相干合成的影响分析

令束间平移误差 $\epsilon_2 - \epsilon_1$ 在 $[0, 1]\lambda$ 间以 $\lambda/100$ 的

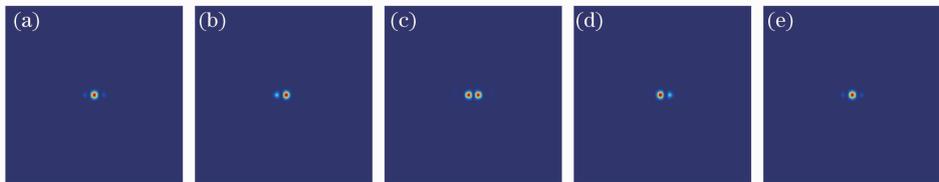


图 1 束间平移误差分别为(a) 0; (b) $\lambda/4$; (c) $\lambda/2$; (d) $3\lambda/4$; (e) λ 时的合成焦斑

Fig. 1 Pattern of synthetic focal spot with piston error of (a) 0; (b) $\lambda/4$; (c) $\lambda/2$; (d) $3\lambda/4$; (e) λ

2.2 倾斜误差对相干合成的影响分析

令束间平移误差为 0,图 2 给出了当 x 方向上的倾斜误差 $\alpha_2 - \alpha_1$ 为 $0, \lambda/D, 2\lambda/D, 3\lambda/D$ 和 $4\lambda/D$ 时

间隔递增变化, x 方向和 y 方向上的束间倾斜误差为 0。图 1 给出了当 $\epsilon_2 - \epsilon_1$ 为 $0, \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$ 和 λ 时的合成焦斑。

从图 1 可以看出,合成焦斑状态随束间平移误差以 λ (即 2π)为周期发生变化:当 $\epsilon_2 - \epsilon_1 = 0$ 时,合成焦斑为理想情况下的整焦斑;当 $\epsilon_2 - \epsilon_1 \in (0, 0.5)\lambda$ 时,主瓣光强逐渐减弱,右边旁瓣光强逐渐增强;当 $\epsilon_2 - \epsilon_1 = 0.5\lambda$ 时,合成焦斑由整焦斑分裂为两个等强度的光斑;当 $\epsilon_2 - \epsilon_1 \in (0.5, 1)\lambda$ 时,左边旁瓣光强逐渐增强;当 $\epsilon_2 - \epsilon_1 = \lambda$ 时,合成焦斑变成整焦斑。

的合成焦斑。

从图 2 可以看出,当束间倾斜误差为 0 时,合成焦斑为一个理想的整焦斑,随着束间倾斜误差的增

加,主瓣光强逐渐减弱,旁瓣光强逐渐增强,当束间倾斜误差为 $2\lambda/D$ 时,合成焦斑已经分裂为两个光斑,且随着束间倾斜误差的增加,激光束已经无法在同一目标处聚焦,导致激光束间完全独立,不再相干,两个焦斑在 x 方向上的距离越来越远。当 y 方

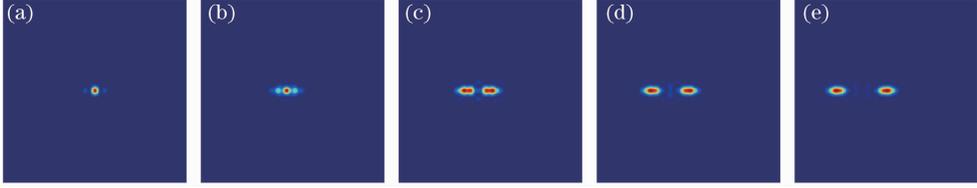


图 2 x 方向束间倾斜误差分别为(a) 0; (b) λ/D ; (c) $2\lambda/D$; (d) $3\lambda/D$; (e) $4\lambda/D$ 时的合成焦斑

Fig. 2 Pattern of synthetic focal spot with tilt error of (a) 0; (b) λ/D ; (c) $2\lambda/D$; (d) $3\lambda/D$; (e) $4\lambda/D$ at x direction

3 SPGD 算法基本原理

1977 年, Vorontsov 等^[11-12] 提出 SPGD 算法, 并将其应用到自适应光学系统中。近年来, SPGD 算法也逐渐被应用到光束净化^[13]、光通信^[14] 等方面。SPGD 算法利用系统性能指标的变化量 ΔJ 和控制参量的变化量 Δu 对控制参量的梯度进行迭代搜索, 最终实现对误差的校正。当第 k 次迭代搜索时, 有

$$u^{(k)} = u^{(k-1)} + \gamma \Delta J^{(k)} \Delta u^{(k)}, \quad (2)$$

式中 $u^{(k)} = \{u_1^{(k)}, u_2^{(k)}, \dots, u_n^{(k)}\}$ 为第 k 次迭代时施加的电压向量, n 为控制的单元数; γ 为增益系数, 当系统性能指标向极大方向优化时, γ 取正值, 反之取负值; $\Delta J^{(k)} = \Delta J_+^{(k)} - \Delta J_-^{(k)}$ 为第 k 次迭代系统性能指标的变化量, $\Delta J_+^{(k)}$ 为施加正扰动电压向量 $u^{(k-1)} + \Delta u^{(k)}$ 时的系统性能指标, $\Delta J_-^{(k)}$ 为施加负扰动电压向量 $u^{(k-1)} - \Delta u^{(k)}$ 时的系统性能指标; $\Delta u^{(k)} =$

向上存在束间倾斜误差时, 结果类似, 只是合成焦斑的变化产生在 y 方向。

结合前面的分析可知, 要实现激光束的相干合成, 必须同时对平移误差和倾斜误差进行控制。

$\{\Delta u_1^{(k)}, \Delta u_2^{(k)}, \dots, \Delta u_n^{(k)}\}$ 为第 k 次迭代时的扰动电压向量, 各 $\Delta u_i^{(k)}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 相互独立, 服从伯努利分布, 即各分量幅值相等 $|\Delta u_i^{(k)}| = \delta$, $\text{Pr}[\Delta u_i^{(k)} = \pm \delta] = 0.5$ 。计算的流程如图 3 所示。

首先, 初始化增益系数 γ 、迭代次数计数器 k 以及初始电压向量 $u^{(0)}$; 其次, 产生随机扰动电压向量 $\Delta u^{(k)}$, 计算施加正扰动电压向量时的系统性能指标 $\Delta J_+^{(k)}$; 再次, 计算施加负扰动电压向量时的系统性能指标 $\Delta J_-^{(k)}$; 最后, 根据系统性能指标的变化量 $\Delta J^{(k)}$ 计算并更新第 k 次迭代搜索后的控制电压向量 $u^{(k)}$, 进行第 $k+1$ 次迭代, 直到满足算法结束条件。

4 数值模拟与结果分析

从(2)式可知, 增益系数 γ 和扰动幅值 δ 直接关系到控制电压向量的计算, 从而影响激光相干合成时平移误差和倾斜误差的控制, 最终影响相干合成的效果。在以下的数值模拟中, 使用 SPGD 算法对平移误差和倾斜误差进行控制, 选取合成焦斑的斯特列尔比(SR)作为优化性能指标, 分析增益系数 γ 和扰动幅值 δ 对相干合成的影响。

令 4 路激光束呈 2×2 排布进行相干合成。激光束的振幅分布均匀, 4 路激光束的平移误差 ϵ 、 x 方向上的倾斜误差 α 和 y 方向上的倾斜误差 β 如下所示, 单位分别为 λ 、 λ/D 和 λ/D (D 为整体光束口径)

$$\epsilon = [0.0403 \quad 0.1232 \quad -0.0075 \quad 0.0735];$$

$$\alpha = [-0.1126 \quad 0.1693 \quad 0.0385 \quad 0.6215];$$

$$\beta = [0.3186 \quad -0.3230 \quad -0.4869 \quad -1.1540].$$

4.1 增益系数 γ 对相干合成的影响

初始化增益系数 $\gamma = 1, 2, \dots, 5$ 、扰动幅值 $\delta = 0.3$, 迭代次数计数器 $k = 1$, 初始电压向量 $u^{(0)} = \{0\}$ 。图 4 给出了合成焦斑的 SR 随 γ 的变化曲线。

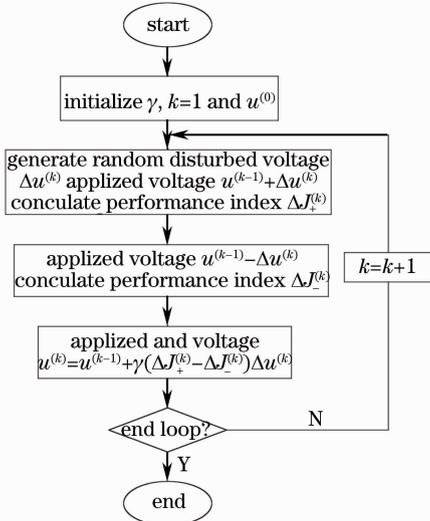


图 3 SPGD 算法流程图

Fig. 3 Flowchart of SPGD algorithm

从图中可以看出, γ 的取值与 SPGD 算法的收敛速度和计算精度紧密相关: 随着迭代次数的增加, SR 逐渐增大, 当 SR 增加到一定值后, 不再发生明显变化; 随着 γ 的增加, 算法的收敛速度不断提高, 当 $\gamma \geq 3$ 时, 收敛后的 SR 已经开始出现振荡现象, 且随着此值的增加, 振荡现象变得更加严重, 算法的精度降低, 收敛后的 SR 的值逐渐减小, 相干合成效果逐渐变差。

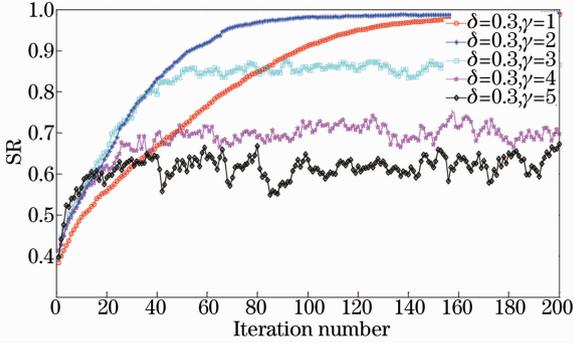


图 4 SR 随增益系数 γ 的变化曲线

Fig. 4 SR evolution curve with gain coefficient γ

4.2 扰动幅值 δ 对相干合成的影响

初始化增益系数 $\gamma=1$ 、扰动幅值 $\delta=0.3, 0.5, \dots, 1.1$, 迭代次数计数器 $k=1$, 初始电压向量 $u^{(0)} = \{0\}$ 。图 5 给出了合成焦斑的 SR 随 δ 的变化曲线。从图中可以看出, 扰动幅值 δ 对相干合成的影响与增益系数 γ 类似, 其取值也与 SPGD 算法的收敛速度和计算精度紧密相关(随着迭代次数的增加, SR 逐渐增大, 当 SR 增加到一定值后, 不再发生明显变化; 随着 δ 的增加, 算法的收敛速度不断提高, 当 $\delta \geq 0.7$ 时, 收敛后的 SR 已经开始出现振荡现象, 且随着此值的增加, 振荡现象变得更加严重, 算法的精度降低, 收敛后 SR 的值逐渐减小, 相干合成效果逐渐变差)。因此, 在进行最优参数的分析时, 可以固定其中一个(不妨设 δ 为固定值), 只寻求 γ 的最优值即可。

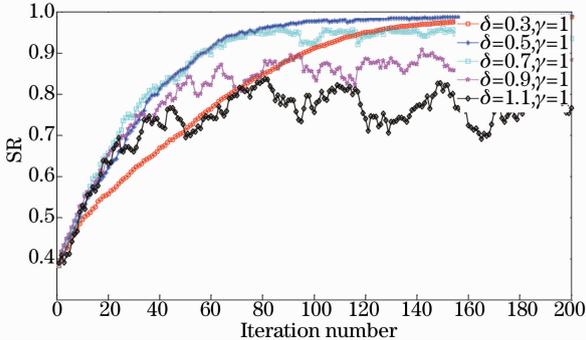


图 5 SR 随扰动幅值 δ 的变化曲线

Fig. 5 SR evolution curve with disturbance amplitude

4.3 参数优化

在 SPGD 算法中, 关于参数值的确定目前还并没有可靠的选取方法, 通常是根据经验结合系统实际情况进行选择。Ling Liu^[15] 提出一种 γ 的自适应更新方法, 其表达式为

$$\begin{cases} \gamma^{(k)} = \gamma^{\max} \alpha[J^{(k-1)}] \\ \alpha[J^{(k-1)}] = \left[\frac{J_{\text{opt}} - J^{(k-1)}}{J_{\text{opt}} + J^{(k-1)}} \right]^p, \end{cases} \quad (3)$$

式中 γ^{\max} 是用户自定义的参数, 可以根据初始条件和需求修改, $\alpha[J^{(k-1)}]$ 为自适应函数, $J^{(k-1)} = [\Delta J_+^{(k-1)} + \Delta J_-^{(k-1)}] / 2$, J_{opt} 为期望的性能指标值, p 为正指数, 是自定义常量。

初始化参数 $\gamma^{\max}=3, 4, 5$, 指数 $p=1$, 目标性能指标 $J_{\text{opt}}=1$, 扰动幅值 $\delta=0.3$ 。图 6 给出了合成焦斑的 SR 随固定 γ 和自适应 γ 的变化曲线。从图中可以看出, 采用固定 γ 和自适应 γ 时, 随着迭代次数的增加, SR 都逐渐增大, 当 SR 增加到一定值后, 均不再发生明显变化; 与固定 γ 相比, 自适应 γ 虽然会使算法的初始收敛速度略微下降, 但是收敛后的 SR 稳定性很好, 振荡现象得到了明显的改善, 且算法的计算精度增加, SR 的值也得到了很大的提高。

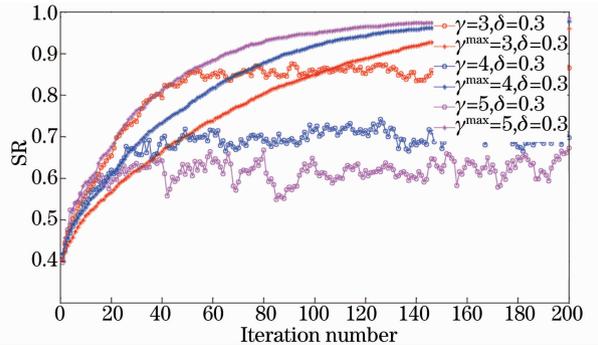


图 6 SR 随固定 γ 和自适应 γ 的变化曲线

Fig. 6 SR evolution curve with fixed and adaptive gain coefficient

5 结 论

有效地控制激光束间的平移误差和倾斜误差, 实现激光束的共相输出是激光相干合成的关键。分析了平移误差和倾斜误差对相干合成的影响, 发现平移误差会使远场焦斑产生分裂, 倾斜误差会使激光束无法在同一目标处聚焦, 降低远场焦斑主瓣能量; 研究了 SPGD 算法中增益系数 γ 和扰动幅值 δ 对激光相干合成中平移误差和倾斜误差的控制速度和控制精度的影响: 随着增益系数 γ 和扰动幅值 δ 的增加算法的收敛加快, 但是计算精度降低, 性能指

标会出现振荡现象,相干合成效果变差;自适应更新增益系数 γ 是一种有效的参数优化方式,可以很好地解决上述矛盾,在保证算法收敛速度的同时有效地保持算法的计算精度,避免振荡现象的产生,从而保证较好的相干合成效果。

参 考 文 献

- 1 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin. Recent progresses and development of fiber laser combining technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 163–166.
程 勇, 刘 洋, 许立新. 激光相干合成技术研究新动向[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2): 163–166.
- 2 Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber laser: current status and future perspectives[J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(11): B63–B92.
- 3 Liu Zejin, Hou Jing, Xu Xiaojun, *et al.*. Research progress of laser beam combining[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2773–2779.
刘泽金, 侯 静, 许晓君, 等. 激光相干合成的研究进展[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2773–2779.
- 4 K L Baker, D Homoelle, S M Utterback, *et al.*. Phasing rectangular apertures[J]. *Opt Express*, 2009, 17(22): 19551–19565.
- 5 N Miyanaga, H Azechi, K A Tanaka, *et al.*. Technological challenge and activation of high-energy PW laser LFEX[C]. *Conf on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, 2007: MA2_1.
- 6 Alexander N, Amiranoff F, Aguer P, *et al.*. High power laser energy research facility: technical background and conceptual design[R]. RAL-TR-2007-008, 2007.
- 7 Zhou Pu, Wang Xiaolin, Ma Yanxing, *et al.*. Phase locking of sixteen laser beams using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(2): 367–369.
周 朴, 王小林, 马阎星. 随机并行梯度下降算法实现 16 路光

- 纤激光相位锁定[J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 367–369.
- 8 Su Rongtao, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. High-speed high-precision phase controller for coherent beam combining of fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1290–1294.
粟荣涛, 周 朴, 王小林, 等. 光纤激光相干合成高速高精度相位控制器[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(6): 1290–1294.
- 9 Gregory D Goodno, Charles P Asman, Jesse Anderegg, *et al.*. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2007, 13(3): 460–472.
- 10 T M Shay, J T Baker, C A Robin, *et al.*. Electronic beam combination of fiber amplifier arrays[C]. *Frontiers in Optics Optical Society of America*, 2008, FWG1.
- 11 M A Vorontsov, G W Carhart, M Cohen, *et al.*. Adaptive optics based in analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. *J Opt Soc Am A*, 2000, 17(8): 1440–1453.
- 12 Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(12): 907–909.
- 13 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.
- 14 韩金凤, 李晓峰. 基于随机并行梯度下降算法的光通信相位控制[OL]. *中国科技论文在线*, 2012, [2014-3-5]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201203-636>.
- 15 Ling Liu. Analysis and Experimental Demonstration of Conformal Adaptive Phase-Locked Fiber Array for Laser Communications and Beam Projection Applications [D]. Maryland: University of Maryland at College Park, 2008. 83–94.

栏目编辑:韩 峰