

# 随机并行梯度下降算法用于光纤激光相干合成的理论与实验研究

周 朴 刘泽金 王小林 马阎星 许晓军

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 介绍了随机并行梯度下降(SPGD)算法用于相干合成的基本理论,利用数值模拟的方法对实际相干合成实验中涉及到的算法评价函数、扰动电压分布等参数进行优化选取,确定了实验中应选择的最佳评价函数、扰动电压分布和扰动方式。利用数字信号处理器(DSP)执行 SPGD 算法,实时控制各路光束的相位,实现了三路瓦量级保偏光纤放大器输出光束的相干合成。实验结果表明,SPGD 算法能够有效控制各路光纤激光的相位,系统闭环将合成光束目标圆孔内的能量提高了 2.62 倍,合成效率达到了理想情形的 87%,远场光斑对比度为 85%。

**关键词** 自适应光学; 光纤激光器; 相干合成; 随机并行梯度下降(SPGD)算法

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092908.2232

## Theoretical and Experimental Investigation on Coherent Beam Combining of Fiber Lasers Using SPGD Algorithm

Zhou Pu Liu Zejin Wang Xiaolin Ma Yanxing Xu Xiaojun

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

**Abstract** The fundamental theory for coherent beam combining using SPGD algorithm is introduced. The evaluation function, perturbation mode and the distribution character of perturbation voltages are optimized by using numerical simulation. Coherent beam combining of three W-level polarize-maintained fiber amplifiers is accomplished by implementing SPGD algorithm on a digital signal processor. The experimental results demonstrate that the optical phase for each beam channel can be effectively controlled by the SPGD algorithm, the energy encircled in the target pinhole is increased by a factor of 2.62, and the combining efficiency is as high as 87% compared with its ideal counterpart when the system is in the close-loop.

**Key words** adaptive optics; fiber laser; coherent beam combining; stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm

## 1 引 言

由于掺杂光纤的非线性效应、热损伤等物理机制的限制,单根光纤激光器的输出功率有限。为获取高的激光输出功率同时保持良好的光束质量,一种技术途径是采用激光器相干合成的方法,即激光器采用多模块结构,通过控制各单元激光器输出激光的相位达到锁相输出,实现光束的相干合成<sup>[1]</sup>。目前国内外多家研究机构都开展了激光相干合成技术的研究<sup>[2~16]</sup>,并提出了多芯光纤输出端直接耦

合<sup>[2]</sup>、自组织相干合成<sup>[3~6]</sup>、以及基于主振荡功率放大器(MOPA)结构的主动相位控制方案<sup>[9~16]</sup>等。迄今为止,最高相干合成输出是由基于 MOPA 结构的主动相位控制方案获得<sup>[7,8,13]</sup>。该方案通常采用三种主动相位控制方法,即外差法<sup>[7~11]</sup>、多抖动法<sup>[12,13]</sup>以及随机并行梯度下降法(SPGD)<sup>[14~16]</sup>等。对于 N 路光束的相干合成,外差法需要 N 个光强探测器与 N 个相位解调电路以完成系统的闭环控制;多抖动法需要 1 个光强探测器以及 N 个相位解

收稿日期: 2008-09-10; 收到修改稿日期: 2008-11-14

作者简介: 周 朴(1984—),男,博士研究生,从事光纤激光器及光束合成等方面的研究。E-mail: jnck621@163.com

导师简介: 刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术等方面的研究。

E-mail: zejinliu@vip.sina.com

调电路以完成系统的闭环控制;基于 SPGD 算法的  $N$  路子光束的相干合成系统无需相位解调电路,只需 1 个光强探测器,控制信号由算法产生。SPGD 算法近年来在自适应光学技术和自适应光学系统中得到了广泛的运用<sup>[17~22]</sup>,杨慧珍等<sup>[20~22]</sup>对 SPGD 算法用于自适应光学系统进行了数值模拟与实验研究,并与遗传算法、模拟退火算法进行了比较,证明了 SPGD 算法的优越性。光束的相干合成本质上是一种只校正活塞像差的自适应光学技术,采用 SPGD 算法有望在实现多路光纤激光相干合成的同时不增大系统的复杂性,是一种较有实用前景的相干合成方案。

本文介绍了 SPGD 算法用于相干合成的基本理论,利用数值模拟的方法对实际相干合成实验中涉及到的算法评价函数、扰动电压分布等参数进行优化选取,利用数字信号处理器(DSP)执行 SPGD 算法,实时控制各路光束的相位,实现了三路瓦量级保偏光纤放大器输出光束的相干合成。

## 2 基本原理

利用 SPGD 算法实现光纤放大器相干合成的工作过程为:定义评价函数  $J = J(u_1, u_2, \dots, u_N)$  为施加在各路光束的相位控制信号  $J(u_1, u_2, \dots, u_N)$  的函数。根据梯度估计的方法不同,SPGD 可分为单向扰动 SPGD 和双向扰动 SPGD,主要区别在于  $\Delta J$  的计算方法不同。单向扰动 SPGD 算法中,首先主动向各路相位调制器施加随机扰动电压  $\delta\bar{u}$ ,观察随机扰动电压带来的评价函数变化量  $\delta J^{(m)} = J_+^{(m)} - J^{(m)}$ ,其中  $J_+^{(m)} = J(\bar{u}^{(m)} + \delta\bar{u}^{(m)})$ ,将  $\delta J$  在  $(u_1, u_2, \dots, u_N)$  处展开

$$\delta J = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\partial J}{\partial u_i} \delta u_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial^2 J}{\partial u_i \partial u_j} \delta u_i \delta u_j + \dots, \quad (1)$$

若各个控制变量的扰动  $\delta u_{(i)}$  为统计独立的随机变量,设它们的均值为零、方差相等,即

$$\langle \delta u_i \rangle = 0, \langle \delta u_i \delta u_j \rangle = \sigma^2 \delta_{ij}, \quad (2)$$

且概率密度分布  $P(\delta u_{(i)})$  关于均值对称,则

$$\langle \delta J \delta u_i \rangle = \frac{\partial J}{\partial u_i} \langle (\delta u_i)^2 \rangle + \langle \Psi_i \rangle, \quad (3)$$

其中  $\langle \Psi_i \rangle = \sum_{j \neq i} \frac{\partial J}{\partial u_j} \langle \delta u_i \delta u_j \rangle +$

$$\frac{1}{2} \sum_{j,l} \frac{\partial^2 J}{\partial u_j \partial u_l} \langle \delta u_j \delta u_l \delta u_i \rangle + \dots = O(\sigma^4).$$

根据评价函数变化量  $\delta J^{(m)}$  对各路光束相位的控制

信号作如下更新

$$u^{(m+1)} = u^{(m)} + \gamma \delta u^{(m)} \delta J^{(m)}, \quad (4)$$

则根据(1)式和(4)式可得更新后评价函数的变化量为

$$\begin{aligned} \Delta J &= J[u^{(m+1)}] - J[u^{(m)}] \approx \sum_{i=j}^N \frac{\partial J}{\partial u_i} (-\gamma \delta J \delta u_i) = \\ &= -\gamma \sum_{i=1}^N \frac{\partial J}{\partial u_i} \left[ \frac{\partial J}{\partial u_i} (\delta u_i)^2 + \Psi_i \right] \approx \\ &= -\gamma \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial J}{\partial u_i} \delta u_i \right)^2 - \gamma \sum_{i,j \neq i} \frac{\partial J}{\partial u_i} \frac{\partial J}{\partial u_j} (\delta u_i \delta u_j) + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

对上式求统计平均,可得

$$\langle \Delta J \rangle = J(\bar{u}^{(m+1)}) - J(\bar{u}^{(m)}) = \gamma \sigma^2 \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial J}{\partial u_i} \right)^2 + O(\gamma \sigma^2), \quad (6)$$

上式表明,只要所施加的随机扰动的方差足够小,  $\langle \Delta J \rangle$  将呈单调下降( $\gamma < 0$ )或单调上升( $\gamma > 0$ )的变化趋势,这就在统计平均的意义上保证了算法的收敛性。如使目标函数向极大方向优化, $\gamma$ 取正值;反之, $\gamma$ 取负。通过向各路相位调制器施加随机扰动电压并计算评价函数  $J$  变化量,能够不断更新施加在各路相位调制器上的控制电压信息,直至评价函数  $J$  取全局极大值,对应  $N$  路激光相位一致的情形。这样就达到了锁相运行,实现了  $N$  路激光的相干合成输出。对于双向扰动 SPGD 算法,需要向各路相位调制器施加正向和负向随机扰动电压,评价函数变化量  $\delta J^{(m)} = J_+^{(m)} - J_-^{(m)}$ ,其中  $J_+^{(m)} = J(\bar{u}^{(m)} + \delta\bar{u}^{(m)})$ ,  $J_-^{(m)} = J(\bar{u}^{(m)} - \delta\bar{u}^{(m)})$ ,其余算法执行步骤与单向 SPGD 算法一致。

## 3 参数的优化选取

SPGD 算法的参数之一是评价函数  $J$ 。在自适应光学应用领域,评价函数  $J$  通常有以下五种定义方式<sup>[22, 23]</sup>,即

$$J_1 = \iint I^2(x, y) dx dy,$$

$$J_2 = n_{\text{SR}},$$

$$J_3 = \iint I^n(x, y) dx dy, \quad n > 2$$

$$J_4 = \iint I_0(x, y) \times I(x, y) dx dy,$$

$$J_5 = \iint |I(x, y) - I_0(x, y)|^2 dx dy.$$

其中  $n_{\text{SR}}$  为 Strehl 比,  $I(x, y)$  为存在相位畸变时远场光强分布,  $I_0(x, y)$  是理想的光强分布。而在 SPGD 算法应用于相干合成的实验中,评价函数还

被定义为  $J_6 = \iint_S I(x,y) dx dy$ 。在已经进行的 SPGD 相干合成实验中<sup>[14,15]</sup>,  $S$  小于或等于远场中央主瓣的面积。相干合成的目的之一是获得尽可能高的能量集中度,定义远场半径为  $1.22 \lambda z/D$  大小主瓣为目标区域,用执行算法时桶中功率与理想情形下的桶中功率的比值评价相干合成的效果。根据(1)式~(4)式利用 SPGD 算法圆环状排列<sup>[24]</sup>的 18 束光纤激光进行相干合成的过程进行模拟,取单元子光束的腰斑半径为 5 mm,光束中心的间距为 15 mm,扰动电压暂取服从伯努利分布,  $\delta u_{(i)} = 0.25 \text{ rad}$ ,扰动方式为双边扰动, $J_6$  中  $S$  定义为中央主瓣面积的 50%。为得到更合乎统计意义的评价结果,将程序运行 100 次然后取平均,得出利用不同评价函数时算法的收敛曲线如图 1 所示。由图可见,利用  $J_4$  和  $J_5$  不能使得算法稳定收敛至理想情形,不适宜作为 SPGD 算法用于相干合成领域的评价函数。 $J_1$  会使得算法收敛速度相对较慢,在实际应用中会影响相干合成的效果。而  $J_2, J_3$  和  $J_6$  均能使算法快速收敛至理想情形,可以作为实际实验中采用的评价函数。

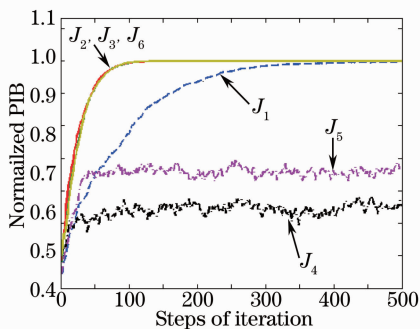


图 1 不同评价函数情形下算法的收敛曲线

Fig. 1 Evolution curves for different cost functions

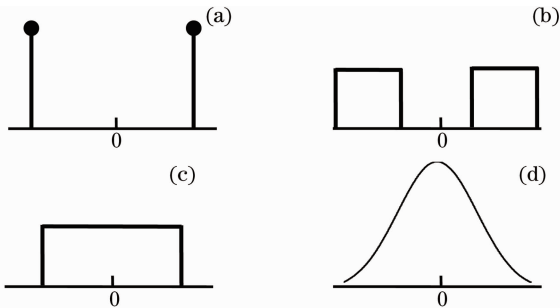


图 2 不同类型扰动电压的概率密度分布

Fig. 2 Probability density for mean-zero random variables

SPGD 算法的参数之二是随机扰动电压的类型。文献报道符合均值为零、方差相等且概率密度分布  $P(\delta u_{(i)})$  关于均值对称的扰动电压分布主要有

四种<sup>[25]</sup>,即伯努利分布,分离的均匀分布,均匀分布和正态分布,如图 2(a), (b), (c)和(d)所示。

仍对利用 SPGD 算法圆环状排列的 18 束光纤激光进行相干合成的过程进行模拟,除扰动电压的类型外,计算参数与图 1 采用的参数一致。在采用不同类型扰动电压时,算法的收敛曲线如图 3 所示。对应图 2 所示的四种扰动电压的概率密度分布,采用伯努利分布时算法的收敛速度最快,正态分布次之,均匀分布使得算法收敛速度最慢。用硬件产生服从伯努利分布的扰动电压十分容易,因此在实际中一般可采用服从伯努利分布的随机扰动电压。

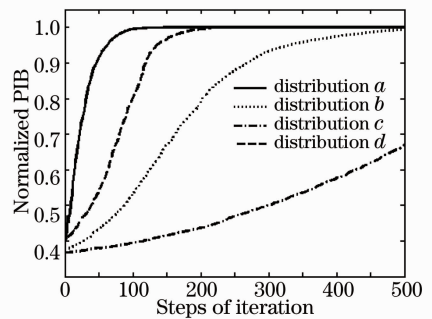


图 3 不同类型扰动电压情形下算法的收敛曲线

Fig. 3 Evolution curves for perturbation with different probability density

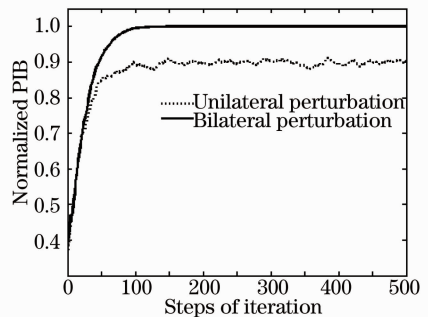


图 4 不同扰动方式下算法的收敛曲线

Fig. 4 Evolution curves for different perturbation methods

SPGD 算法的参数之三是随机扰动电压的扰动方式<sup>[21, 26]</sup>,主要分为单向扰动和双向扰动两种。由于单向扰动比双向扰动在实际试验时减少了一次  $\delta J$  的提取过程,被认为更有望在实时控制系统中得到应用<sup>[26]</sup>。计算参数保持不变,对采用不同类型扰动方式时,利用 SPGD 算法圆环状排列的 18 束光纤激光进行相干合成的过程进行模拟,算法的收敛曲线如图 4 所示。由图可见,两种扰动方式对算法的收敛速度影响不大,但是单向扰动使得算法收敛至局部极值,并且收敛过程不稳定。因此,在实际应用中,应尽可能应用双向扰动 SPGD 算法。

### 4 实验结果

根据第二部分的计算结果,在进行 SPGD 算法相干合成实验时,评价函数有三种选择方案,即文中的  $J_2, J_3$  和  $J_6$ , 扰动电压应服从伯努利分布, 扰动方式应采用双向扰动 SPGD 算法。利用 SPGD 算法实现三路光纤放大器相干合成的系统结构如图 5 所示。主振荡激光器(MO)发出的光束通过分束器(Splitter)后被分为三路, 其中两路各含有一个 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器 (PM) 和一个光纤放大器 (AMP), 另一路只含有一个光纤放大器 (AMP)。相位调制器和光纤放大器分别起到相位控制和功率放大的作用, 放大器的后端接隔离器 (ISO) 加以保护。所用种子源为 DFB 单频光纤激光器, 中心波长为 1083 nm, 线宽小于 1 MHz。 光纤放大器为保偏放大器, 最大输出功率超过 1 W。 各路光束经过准直器(CO)后形成阵列光束, 准直器输出的三路光束腰斑半径均为 1 mm, 排成“品”字形分布, 光束中心距离约为 8 mm, 聚焦透镜的焦距为 1 m, 对应合成光束的主瓣半径约为 160  $\mu\text{m}$ 。 实验中采用  $J_6$  作为评价函数。阵列光束经过分光镜后被分成两部分, 一部分光束经透镜聚焦, 光电探测器放置于透镜的后焦平面上, 紧贴于探测器前端放置小孔光阑, 用示波器实时观测小孔光阑内包含的能量, 并定义此部分能量大小为评价函数  $J$ , 相干合成的目的即是使得  $J$  的值一直处于极大值。小孔为实验室自制的半径为 95  $\mu\text{m}$  圆孔。实验时首先只开启三路激光其中的一路, 微调小孔的位置, 使得此时示波器探测到的直流电压信号最大; 关闭此路激光开启另两路激光, 微调准直器的位置, 使得示波器探测到的直流电压信号最大, 这样小孔的位置就处于合成光束的主瓣内, 半

径约为中央主瓣的 60%。探测器探测到的信号经 A/D 转换后输入 DSP, DSP 根据采集到的信号执行 SPGD 算法, 并将计算得到的相位控制信号经 D/A 转换和放大电路后施加给 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器用于相位控制, 完成整个系统的闭环。用示波器观察相干合成光束的目标圆孔内部包含的能量随时间的变化关系; 阵列光束经过分光镜的另一部分光束经过透镜聚焦, CCD 放置在透镜的后焦平面上, 用来观察光束的远场图样及相干合成的效果。

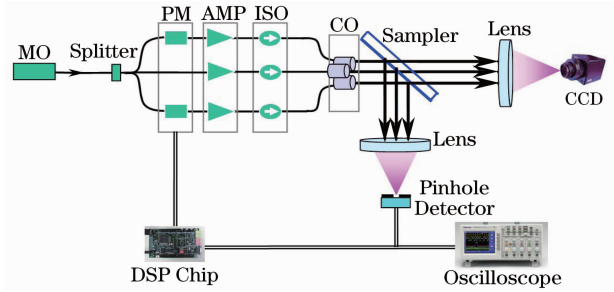


图 5 利用 SPGD 算法实现三路光纤放大器相干合成的系统结构

Fig. 5 System setup for coherent beam combining of three fiber amplifiers using SPGD algorithm

首先分别开启单独光纤放大器至 1 W 输出功率, 调节光电探测器的增益, 使得单路激光输出时光电探测器输出的直流电压为 1 V。同时开启三个放大器, 各路光纤放大器输出功率均为 1 W 时, 示波器显示合成光束目标圆孔内包含的能量随时间变化如图 6(a) 所示。整个系统处于开环状态, 小孔内能量(即值)在 0~9V 之间不断变化, 在 40 s 的观察时间内, 小孔内能量的平均值为 3.09 V, 对应于非相干合成的效果。此时 CCD 观测到的远场光斑处于不断变化中, 图 6(b) 是 CCD 长曝光的图样。小孔内能量的起伏是由于三路光纤放大器输出光束的相位不一致, 并随时间变化引起的。

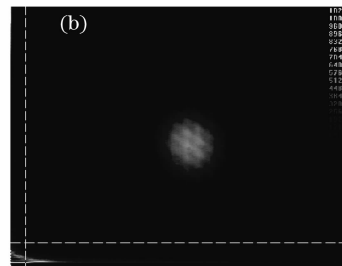
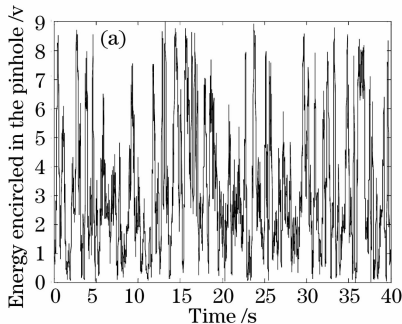


图 6 系统开环时的实验结果 (a) 小孔内能量随时间的变化曲线 (b) 远场光斑的长时间曝光图样

Fig. 6 Experimental result in open-loop (a) Dependence of energy encircled in the pinhole on time evolution (b) long-exposure far-field pattern

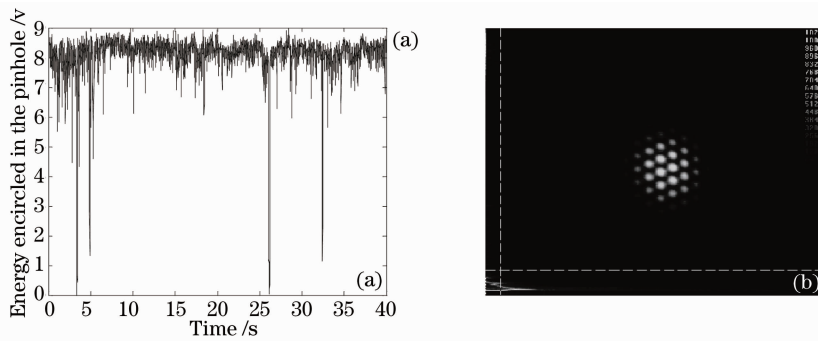


图 7 系统闭环时的实验结果 (a) 小孔内随时间的变化曲线 (b) 远场光斑的长时间曝光图样

Fig. 7 Experimental result in close-loop (a) Dependence of energy encircled in the pinhole on time evolution

(b) long-exposure far-field pattern

对三路光纤放大器出射光束的其中两路进行控制以实现系统闭环。利用 TI 公司的 TMS320C6713 执行 SPGD 算法, DSP 主频为 25 MHz。经测试,利用 DSP 执行 SPGD 算法产生控制电压的速度达到了每秒 16500 次。当执行 SPGD 算法 ( $\gamma=0.5$ ,  $|\delta u_i|=0.1$ ), 系统处于闭环状态时,示波器显示小孔内包含的能量随时间变化如图 7(a)所示,在 40 s 的长时间观察范围内,  $J$  值基本稳定在极大值 9 V 附近,目标圆孔内能量的平均值为 8.10V,系统闭环将目标圆孔内的能量提高了 2.62 倍。在理想情形下,三路激光相干合成能使得远场光斑小孔内的能量为非相干情形下的 3 倍。实验的合成效率达到理想情形的 87%。此时 CCD 观测到的远场光斑基本稳定,图 7(b)是 CCD 长曝光的图样。定义光斑对比度  $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ , 其中  $I_{\max}$  为光强极大值,  $I_{\min}$  为  $I_{\max}$  的临近极小值,算得此时远场光斑的对比度为 85%。图 7(b)所示的远场光斑有较多的旁瓣,这是由于整个激光阵列的填充因子较小引起的。如果采用大口径的准直器使得各路光束光斑半径与相邻光束中心距离的比值增大,远场光斑的主瓣会更加明显。

需要说明的是,在系统执行 SPGD 算法、处于闭环状态时,  $J$  值仍在部分时间内处于 0。这是因为整个系统不对光束的相位进行探测,而是利用算法产生相位控制信号,而相位调制器的行程有限(往往只有  $3\lambda \sim 4\lambda$ ),当算法产生的相位控制信号大于相位调制器的行程时,相位调制器将被重置<sup>[27]</sup>,导致系统失锁。

## 5 结 论

文章介绍了 SPGD 算法用于相干合成的基本理论,利用数值模拟的方法优化选取了算法有关参

数,并实现了三路瓦量级光纤放大器的相干合成。数值模拟结果表明,为获得更好的相干合成效果算法,评价函数有三种选择方案,即文中的  $J_2$ ,  $J_3$  和  $J_6$ , 扰动电压应服从伯努利分布,扰动方式应采用双向扰动 SPGD 算法。实验结果表明,SPGD 算法能够有效控制各路光纤激光的相位,系统闭环将合成光束目标圆孔内的能量提高了 2.62 倍,合成效率达到了理想情形的 87%,远场光斑对比度为 85%,验证了利用 SPGD 算法进行多路光纤放大器相干合成的有效性。理论研究<sup>[18,28]</sup>结果表明,随着参与合成激光路数的增多,SPGD 算法的收敛速度将变慢,而随着功率的提高,光纤激光的相位噪声的幅度与频率均将随之增大,这将在一定程度上影响相干合成的效果,因此需要相应的进行算法执行硬件的升级。

## 参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan, Laser Beam Combining for High-Power, High-Radiance Sources [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, **11**: 567~577
- 2 Yanming Huo, Peter K. Cheo, George G. King, Fundamental mode operation of a 19-core phaselocked Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**: 6230~6239
- 3 Akira Shirakawa, Tomoharu Saitou, Tomoki Sekiguchi *et al.*. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**: 1167~1172
- 4 E. J. Bochove, P. K. Cheo, G. G. King. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28** (14): 1200~1202
- 5 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 113-W in-phase mode output from two ytterbium-doped large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 412~414
- 6 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-Locking and High Coherent Power Output of Two Fiber Lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1154~1158  
何 兵,楼祺洪,周 军 等. 两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1154~1158
- 7 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**: 1247~1249
- 8 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*.



- Coherently Coupled High Power Fiber Arrays[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 9 R. Xiao, J. Hou, M. Liu *et al.*. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**: 2015~2022
- 10 Eric C. Cheung, James G. Ho, Gregory D. Goodno *et al.*. Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**: 354~356
- 11 S. J. Augst, T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**: 474~476
- 12 T. M. Shay, V. Benham, J. T. Baker *et al.*. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**: 12022~12027
- 13 Thomas M. Shay, Vincent Benham, Jeffrey T. Baker *et al.*. Self-Synchronous and Self-Referenced Coherent Beam Combination for Large Optical Arrays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**: 480~486
- 14 Ling Liu, Mikhail A. Vorontsov, Phase-Locking of Tiled Fiber Array using SPGD Feedback Controller[C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 58950P
- 15 Ling Liu, Mikhail A. Vorontsov, Ernst Polnau, Thomas Weyrauch, and Leonid A. Beresnev, Adaptive Phase-Locked Fiber Array with Wavefront Phase Tip-Tilt Compensation using Piezoelectric Fiber Positioners [C]. *SPIE*, 2007, **6708**: 67080K
- 16 Jan E. Kanskya, Charles X. Yua, Daniel V. Murphya *et al.*. Beam control of a 2D polarization maintaining fiber optic phased array with high-fiber count[C]. *SPIE*, 2006, **6306**: 63060G
- 17 Vorontsov M A, Carhart G W. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**: 907~909
- 18 Vorontsov M A, Carhart G W. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **17**: 1440~1453
- 19 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
- 20 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **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
- 21 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Comparisons of several stochastic parallel optimization control algorithms for adaptive optics system [J]. *High power laser and particle beams*, 2008, **20**(1): 11~16  
杨慧珍,李新阳,姜文汉. 自适应光学系统几种随机并行优化控制算法比较[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(1): 11~16
- 22 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
- 23 Zhou Renzhong, Yan Jixiang, Zhao Dazun *et al.*. Adaptive optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996  
周仁忠,阎吉祥,赵达尊等. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 24 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaojun Xu *et al.*. Numerical analysis of the effects of aberrations on coherently combined fiber laser beams [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**: 3350~3359
- 25 James C. Spall, Introduction to stochastic search and optimization[M]. Wiley InterScience, 2003
- 26 James C. Spall, An overview of the simultaneous perturbation method for efficient optimization [J]. *Johns Hopkins APL technical digest*, 1998, **19**(4): 482~492
- 27 C. Jones, C. D. Stacey, A. M. Scott. Phase stabilization of a large-mode-area ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**: 466~468
- 28 Zhou Pu, Liu Zejin, Ma Yanxing *et al.*. Simulation and experimental investigation on coherent beam combining of two fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **29**(2): 431~436  
周朴,刘泽金,马阎星等. 随机并行梯度下降算法两路光纤放大器相干合成的模拟与实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **29**(2): 431~436