

文章编号: 0253-2239(2009)02-0431-06

随机并行梯度下降算法模拟两路光纤放大器 相干合成与实验研究

周 朴 刘泽金 马阎星 王小林 许晓军 郭少锋

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 对利用随机并行梯度下降(SPGD)算法对多路光纤放大器相干合成进行了数值模拟,并进行了两路瓦级光纤放大器相干合成的实验。实验结果表明,SPGD算法能够有效控制各路光纤激光的相位,系统闭环将目标圆孔内的能量提高了 1.57 倍;并使得目标圆孔内能量大于理想值 80% 的概率从 27.7% 提升到了 70.3%。取得了较为明显的相干合成效果。对算法用于多路大功率光纤放大器相干合成的可行性进行了探讨。

关键词 激光器; 光纤放大器; 相干合成; 随机并行梯度下降算法

中图分类号 TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0431

Simulation and Experimental Investigation on Coherent Beam Combination of Two Fiber Amplifiers Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Zhou Pu Liu Zejin Ma Yanxing Wang Xiaolin Xu Xiaojun Guo Shaofeng

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

Abstract Numerical simulation on coherent beam combination of multiple fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is carried out. Coherent beam combination of two watt-level fiber amplifiers is experimentally achieved. Phase controlling is performed by SPGD algorithm. The whole system in close-loop performs well. The probability of energy encircled in the target pinhole to be more than 80% of its ideal value is increased from 27.7% to 70.3%, and the energy encircled in the pinhole is enhanced by a factor of 1.57 when the system evolves from open loop to close loop. The feasibility of coherent combination of high-power fiber amplifiers using the method proposed is also discussed.

Key words lasers; fiber amplifier; coherent beam combination; stochastic parallel gradient descent 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^[1]。合成后的光束功率大、光束质量好,可以达到衍射极限,能实现远距离传输,在国防和民用的多个领域都将有广阔的应用前景。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^[2~16],比较常用的方法有多芯光纤输出端直接耦合法^[2]、自组织相干合成^[3~6]、以及基于主振荡功率放大器(MOPA)结构的主动相位控制方案^[9~16]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的^[7,8,13]。在该方案中,通常采用的主动相位控制方法主要有三种,即外差法^[7~11]、多抖动法^[12,13]以及随机并行梯度下降法(SPGD)^[14~16]等。对于 N 路子光束的相干合成,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

收稿日期: 2008-06-17; 收到修改稿日期: 2008-07-15

作者简介: 周 朴(1984—),男,博士研究生,主要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

控制;多抖动法需要 1 个光强探测器以及 N 个相位解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,控制信号由计算机执行算法产生。相比之下,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。美国马里兰大学 Ling Liu 等^[14,15]和麻省理工学院的 Jan E. Kanskya 等^[16]已经分别实现了基于 SPGD 算法的多路光束相干合成,但都限于种子光分束后直接合成,各路光束没有经过放大,相位起伏是由于各路光纤长度不同而引起的静态噪声^[14~16],并没有引入放大器带来的动态相位噪声。本文采用 MOPA 方案,利用 SPGD 算法对各路光束的相位进行实时控制,对两路瓦级保偏光纤放大器的输出光束进行相干合成。

2 基本原理

SPGD 算法是在同时扰动随机近似 (SPSA - Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation) 控制算法基础上开发的自适应光学校正技术,它实际上也是一种“盲优化”方法。SPGD 算法使用优化算法直接对系统性能指标进行优化,以往的多元高频振动及爬山法比起来,具有实

现容易、控制参数的所有维并行计算的特点,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应用^[18~20]。利用 SPGD 算法实现 N 路光纤放大器相干合成的系统结构如图 1 所示(图中以两路光纤激光为例)。主振荡激光器(MO)发出的光束通过分束器后被分为 N 路,每一路均各含有一个 LiNbO₃ 相位调制器(PM)和一个光纤放大器(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。各路光束经过准直器(CO)后形成阵列光束,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,光阑半径小于或等于理想相干合成情形下合成光束的主瓣宽度为宜^[15],探测器探测到的信号经 A/D 转换后输入计算机和示波器,计算机上执行 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 LiNbO₃ 相位调制器用于相位控制,示波器用于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。

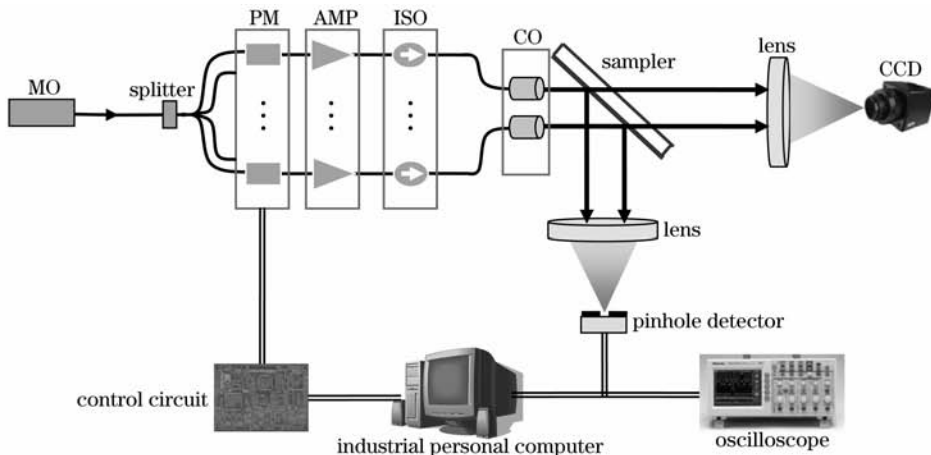


图 1 利用 SPGD 算法实现光纤放大器相干合成的系统结构

Fig. 1 System setup for coherent beam combination of fiber amplifiers using SPGD algorithm

系统的工作过程:首先定义探测器探测到的合成光束的目标圆孔宽度内部包含的能量为评价函数 J 。主动向各路相位调制器施加随机扰动电压 δu ,观察随机扰动电压带来的评价函数变化量 ΔJ ,通过运行 SPGD 算法得到下一时刻施加在相位调节器上的电压信号 u 并作用于相位调制器,如此迭代进行,直至 J 不再变化,算法收敛。SPGD 算法的

实现过程如下:

定义评价函数 J 的变化量

$$\Delta J^{(k)} = \Delta J_+^{(k)} - \Delta J_-^{(k)},$$

其中

$$\Delta J_-^{(k)} = J[u^{(k)} - \Delta u^{(k)}] - J[u^{(k)}],$$

$$\Delta J_+^{(k)} = J[u^{(k)} + \Delta u^{(k)}] - J[u^{(k)}],$$

其中上标 (k) 表示第 k 次迭代。施加在相位调节器

上的电压信号 u 的迭代计算公式为 $u^{(k+1)} = u^{(k)} + \gamma \Delta u^{(k)}$, $\Delta u^{(k)} = \{\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_n\}^{(k)}$ 为第 k 次迭代时施加的扰动电压向量, γ 为增益系数, 在实际应用中, 如使目标函数向极大方向优化, γ 取正值; 反之, γ 取负。SPGD 算法的执行过程(第 k 次迭代时)为:

- 1) 随机生成扰动向量 $\Delta u^{(k)} = \{\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_n\}^{(k)}$, 各 Δu_i 相互独立且同为伯努利分布, 各分量幅值相等, 取正负值的概率同为 50%;
- 2) 计算目标函数的变化量 $\Delta J^{(k)}$;
- 3) 更新控制参数, 进行第 $k+1$ 次迭代, 直至满足算法结束条件。

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。

3 数值模拟

为了验证基于 SPGD 算法多路光纤放大器相干合成的有效性, 对该算法的执行过程进行了数值模拟。取单元子光束的腰斑半径为 5 mm, 光束中心的间距为 15 mm。对于两路($N=2$)光纤放大器的相干合成, 在理想情况下, 即每个激光器单元的输出保持相位一致, 此时远场光斑光强分布如图 2(a)所示, 合成光束的大部分能量集中在中央主瓣内。在实际情形中, 由于光纤激光器的热效应导致的折射率变化等因素造成激光器单元输出光束的相位不一致, 并且随时间的变化而变化, 这就导致了中央主瓣内的能量也随时间不断变化, 图 2(b)为两路光纤激光相位差为 2 rad 时的远场光斑图样。

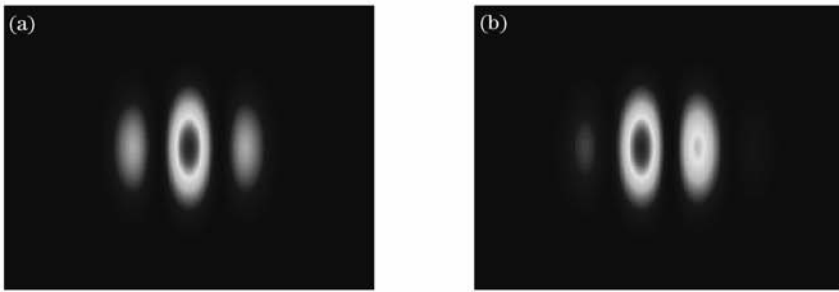


图 2 $N=2$ 时的远场光斑图样。(a) 理想情形, (b) 两路光纤激光相位差为 2 rad

Fig. 2 Far-field pattern for $N=2$ (a) the ideal case, (b) the case when the phase difference between two beamlets is 2 rad

为了便于和实验结果进行对照, 对数值计算的光强进行了归一化, 使得理想相干合成情形下主瓣内包含的能量 $J=2$ 。对于图 2(b)的情形, 分别执行多次 SPGD 算法, 并对主瓣内的能量 J 的变化过程取平均, 计算结果如图 3(a)所示[取 $\gamma=0.4/(J+0.01)$, $|\delta u_j|=0.3$]。可以看出, 随着算法的不断迭代进行, 合成光束主瓣内的能量不断增大, 直至最后收敛。如

以 J 值上升到理想值的 95% 所需的迭代步数来衡量算法的收敛速度, 可以看出, 对于图 2(b)所示的相位差为 2 rad 的情形, 算法的平均收敛速度为 24 次。

另外还模拟了 6 路光纤放大器相干合成的情形, 仍取单元子光束的腰斑半径为 5 mm, 光束中心的间距为 15 mm, 光束的排布方式如图 3(b)右侧光斑分布所示, 理想情形下远场光强分布如图 4(a)所

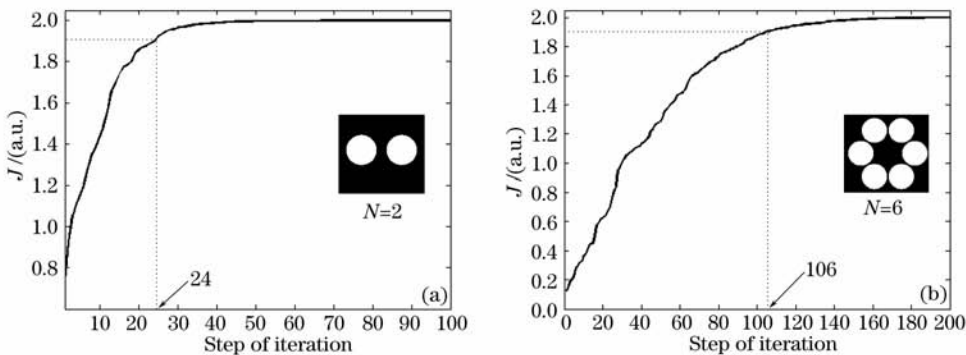


图 3 J 值的收敛过程

Fig. 3 Convergence process for J

示。为了验证 SPGD 算法的有效性,取各路光束的相位分布满足均值为 0,方差为 2π rad 的正态分布,此时远场光强分布如图 4(b)所示。对于图 4(b)对应的情形,分别执行多次 SPGD 算法,并对主瓣内的能量 J 的变化过程取平均,计算结果如图 3(b)所

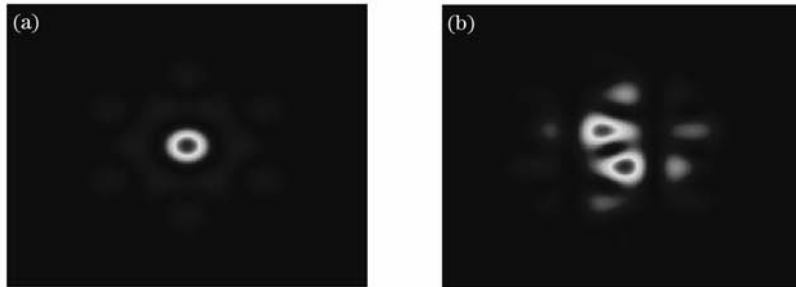


图 4 $N=6$ 时的远场光斑图样。(a) 理想情形,(b) 各路光束的相位分布满足均值为 0,方差为 2π rad 的正态分布情况
Fig. 4 Far-field pattern for $N=6$. (a) the ideal case, (b) the case when the phase distribution obeys normal distribution with a mean value of 0 and variance of 2π rad

4 相干合成实验

进行了基于 SPGD 算法两路瓦级光纤放大器相干合成的实验,实验结构如图 1 所示。所用种子源为 KEOSPSYS 公司的分布反馈(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 IPG Photonics 公司的 YAD-1K 保偏放大器,最大输出功率超过 1 W。光电探测器为 THORLABS 公司的 PDA36A-EC 硅探测器,10 dB 增益时带宽为 1.25 MHz。准直器输出的两路光束腰斑半径均为 1 mm,两束激光中心距离约为 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 $160 \mu\text{m}$ 。位于探测器前侧的小孔为实验室自制,半径为 $95 \mu\text{m}$ 的圆孔。只开启两路激光中的一束,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一路激光,微调准直器的位置,使得示波器探测到的直流电压

示[取 $\gamma=0.4/(J+0.01)$, $|\delta u_i|=0.3$]。可以看出,尽管合成的路数增多,SPGD 算法仍然能够有效控制各路光束的相位使得系统逐步收敛至理想相干合成的情形。算法的平均收敛速度为 106 次,与 $N=2$ 相比,收敛速度明显变慢。

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%。信号的 A/D 与 D/A 转换全部由 NI 公司的 PCI6221 板卡完成,探测器探测到的信号经 A/D 转换后输入计算机,计算机根据采集到的信号执行 SPGD 算法,并将输出信号经 D/A 转换后经自制放大电路后作用于 LiNbO_3 晶体,完成整个系统的闭环。相干合成的效果可由示波器和 CCD(Electronphysics Microviewer 7290A)同时观测。在整个系统处于开环状态、未执行 SPGD 算法,各路光纤放大器输出功率为 600 mW 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 5(a)所示。值在 0 V 到 2 V 之间不断变化,在 20 s 的观察时间内,目标圆孔内能量的平均值为 1.04 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 5(b)是 CCD 长曝光的图样。

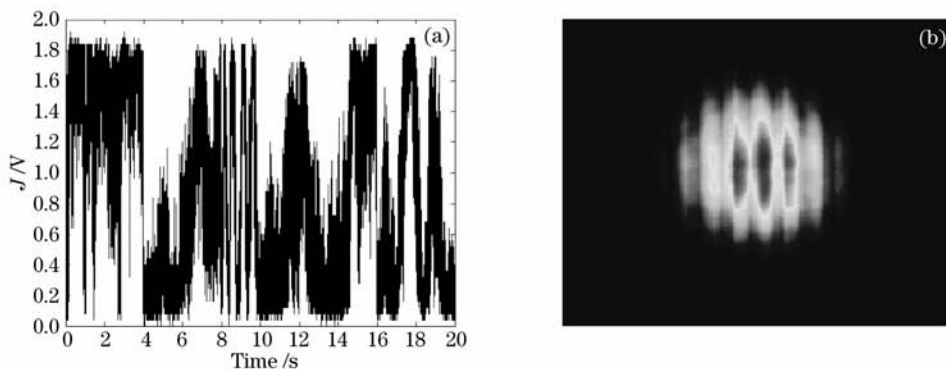
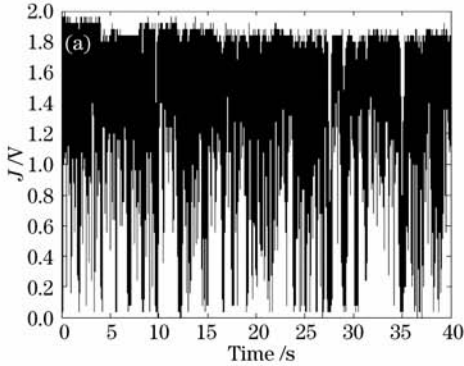


图 5 系统开环时的实验结果。(a) J 随时间的变化曲线,(b) 远场光斑的长时间曝光图样
Fig. 5 Experimental result in open loop. (a) Dependence of J on time evolution, (b) long-exposure far-field pattern

当系统处于闭环状态,执行 SPGD 算法时[根据实际收敛的效果,取 $\gamma=0.2/(J+0.01)$, $|\delta u_j|=0.3$],示波器显示合成光束目标圆孔内包含的能量随时间的变化如图 6(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 2 V 附近,目标圆孔内能量的平均值为 1.63 V,系统闭环将目标圆孔内的能量提高了 1.57 倍。此时 CCD 观测到的远场光斑



基本稳定,图 6(b)是 CCD 长曝光的图样。与图 5(b)相比,光斑的对比度得到了明显提高。图 7 为开环和闭环情形下长时间观察时 J 值的概率分布,可以看出,闭环情形下目标圆孔内所含能量接近理想相干合成情形的概率显著提高,与开环情形相比,SPGD 算法的执行使得目标圆孔内能量大于理想值 80% (1.6 V) 的概率从 27.7% 提升到了 70.3%。

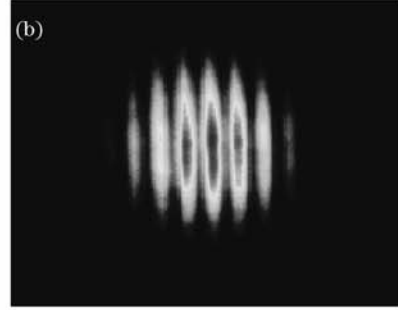


图 6 系统闭环时的实验结果。(a) J 随时间的变化曲线, (b) 远场光斑的长时间曝光图样

Fig. 6 Experimental result in close loop. (a) Dependence of J on time evolution, (b) long-exposure far-field pattern

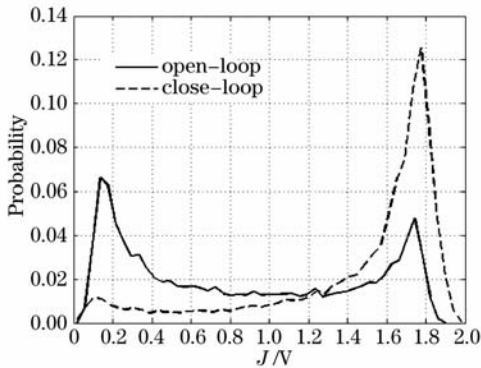


图 7 J 值的概率分布

Fig. 7 Probability distribution of J

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。我们认为,这是由两方面因素造成的。一方面,整个实验是在超净环境中进行的,制冷风机和空调始终处于运行状态,这将不可避免地引入高频相位噪声,使得算法的收敛速度有时跟不上相位的变化速度,算法不能收敛;另一方面,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 $3\sim 4\lambda$),当算法产生的相位控制信号大于相位调制器的行程时,相位调制器将重置^[21],导致系统失锁。

5 结 论

利用 SPGD 算法对多路光纤放大器相干合成

进行了数值模拟,并进行了两路瓦级光纤放大器相干合成的实验。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 1.57 倍,并使目标圆孔内能量大于理想值 80% (1.6 V) 的概率从 27.7% 提升到了 70.3%,取得了较为明显的相干合成效果。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。数值模拟结果还表明,算法的收敛速度将随着合成光束路数的增多而降低,目前最先进的 SPGD 算法执行电路每秒能执行 95,000 次运算^[15],如果用于合成 6 路光纤激光,则可估算算法的控制带宽约为 $95000/106=900$ Hz。除去制冷风机、平台震动等外界因素的干扰,数百瓦量级的光纤放大器相位变化的特征频率小于 100 Hz^[21],因此该方法具有应用于多路高功率光纤放大器相干合成的潜力。我们正在搭建利用该算法实现 $N>3$ 路光纤放大器相干合成的实验平台。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Selected Topics Quant. Electron.*, 2005, **11**: 567~577
- 2 Yanming Huo, Peter K. Cheo, George G. King. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked 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]. *Chin. 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]. *Proc. SPIE*, 2006, **6102**: 61020U-1~5
- 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 J. Selected Topics Quant. Electron.*, 2007, **13**: 480~486
- 14 Ling Liu, Mikhail A. Vorontsov. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5895**: 58950P-1~9
- 15 Ling Liu, Mikhail A. Vorontsov, Ernst Polnau *et al.*. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners [C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6708**: 67080K-1~12
- 16 Jan E. Kanskya, Charles X. Yua, Daniel V. Murphya *et al.*. Charles higgsa, beam control of a 2D polarization maintaining fiber optic phased array with high-fiber count[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6306**: 63060G-1~11
- 17 Vorontsov M A. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): System architecture and wavefront control concept [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5895**: 589501-1~8
- 18 Vorontsov M A, Carhart G W. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**: 907~909
- 19 Vorontsov M A, Carhart G W. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**: 1440~1453
- 20 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
- 21 D. 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