

文章编号: 0258-7025(2010)03-0631-05

# 基于随机并行梯度下降算法的两路光纤激光 相干合成锁相控制技术的研究

郑 轶<sup>1,2,3</sup> 沈 锋<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 四川 成都 610209  
<sup>2</sup> 中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209  
<sup>3</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 介绍了随机并行梯度下降 (SPGD) 算法, 并设计了基于此算法的两路主振荡并联放大相干合成 (MOPA-CBC) 实验系统。该系统采用 10 W 级掺镱光纤放大器引入相位误差, 同时采用铌酸锂相位调制器进行校正。开环时, 分析了放大器工作在不同状态下系统中的相位噪声。闭环后, 得到了稳定的相干合成光束, 合成光束的平均亮度提高到之前的 1.5 倍, 相位平移峰谷 (PV) 值降低到 100.8 nm, 系统校正精度达到  $1/(10\lambda)$ , 控制带宽约为 100 Hz。实验结果表明, SPGD 算法能有效地发挥锁相控制功能。

**关键词** 光纤激光器; 相干合成; 主振荡并联放大器; 随机并行梯度下降算法; 光纤放大器

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0631

## Research on Phase-Locking Technique for 2-Channels Fiber Laser Coherent Beam Combination Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Zheng Yi<sup>1,2,3</sup> Shen Feng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> The Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>2</sup> The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China  
<sup>3</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is introduced, and the 2-channels master oscillator power amplifier coherent beam combination (MOPA-CBC) system based on this algorithm is designed. This system adopts a 10 W stage ytterbium fiber amplifier to import the phase noise. And the LiNbO<sub>3</sub> phase modulator is adopted to compensate the piston error. When loop is open, the phase noise is analyzed at different working stages of amplifier. After loop closed, the stable coherent combined beam is obtained, the intensity of which increases 1.5 times than before, and piston peak-to-valley (PV) value decreases to 100.8 nm. The precision of correction reaches  $1/(10\lambda)$ , and the bandwidth is 100 Hz. The experimental results indicate that the control ability of SPGD algorithm is effective in phase-locking.

**Key words** fiber laser; coherent beam combination; master oscillator power amplifier; stochastic parallel gradient descent; fiber amplifier

## 1 引 言

高功率、高亮度激光束的获取技术是当今光电技术领域中的一个重要研究内容。光纤激光器具有体积小、效率高、光束质量好等特点, 因此, 采用光

纤激光器获取高功率光束成为国内外研究的热点。近年来, 随着工艺和设计的不断完善, 单根光纤激光器的输出功率有了很大的提高, 已达到数百瓦甚至千瓦量级<sup>[1,2]</sup>。但受非线性效应和热效应的影响<sup>[3]</sup>,

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-07-07

作者简介: 郑 轶(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事激光相干合成技术方面的研究。E-mail: zhengyi\_ioe@163.com

导师简介: 沈 锋(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: shenfeng@ioe.ac.cn

进一步提高单根光纤激光器的输出十分困难,因此,基于光纤激光器阵列的多光束合成(CBC)技术得到了发展。目前此类技术主要分为两种:非相干光束合成和相干光束合成。在非相干光束合成技术中,多束激光简单地耦合成一束,彼此的波长、偏振和相位差异都不予考虑。此种合成方式效率不高,并且输出光束质量不好。在 CBC 技术中,各光束波长、偏振相同,同时相位被控制到一致,使得合成光束达到干涉状态。CBC 技术的优点在于功率放大增益高,并且同时能保持输出光束质量接近于衍射极限。此类技术自提出以来就受到广泛的关注,各国研究机构报道了多种方案,如自组织效应光纤阵列<sup>[4,5]</sup>、主振荡功率放大器(MOPA)<sup>[6,7]</sup>、外腔法<sup>[8,9]</sup>、自适应控制<sup>[10,11]</sup>等。其中基于 MOPA 结构的相干合成(MOPA-CBC)作为一种主动式锁相方案,实现了动态相位误差检测和实时闭环校正,具有校正精度高、闭环速度快的特点,是目前最引人注目的 CBC 技术之一。

## 2 随机并行梯度下降算法原理

相位锁定是 MOPA-CBC 系统的关键和难点,主要包含两个过程:相位噪声探测和闭环校正。锁相技术要求尽量提高系统的控制带宽,简化系统结构。常用于 MOPA-CBC 的锁相技术包括外差信号探测法<sup>[12]</sup>、爬山算法控制<sup>[13]</sup>、自同步射频(RF)信号调制法<sup>[14]</sup>等。其中外差信号探测法最为流行,该方案闭环速度快,控制带宽高,但是光路与电路均比较复杂,不易于实现;爬山法采用单探测器结构,光路简单,但是算法速度慢,控制带宽低;自同步 RF 信号调制法对两方面都有所满足,但是系统的信噪比较低,闭环精度不高。随机并行梯度下降(SPGD)算法是对爬山法的改进,保留了其结构简单的特点,同时提高了控制带宽。

SPGD 算法属于特征值优化算法,由同步扰动随机近似(PSA)<sup>[15]</sup>算法发展演变而来。在自适应光学领域中,该算法作为一种像清晰化技术<sup>[16]</sup>,已成功应用在天文自适应光学观测系统和自由空间光通信领域<sup>[17,18]</sup>中。而对于 MOPA-CBC 系统,采用 SPGD 算法,可以简化光路,无需使用复杂的相位平移误差探测结构,通过优化方式实现锁相。并且,SPGD 算法为并行优化方式,因此,在多路的 MOPA-CBC 系统中,算法也可以保持较快的控制能力<sup>[19]</sup>。

基于  $N$  路 MOPA-CBC 系统的 SPGD 算法原

理为:

1) 采用光电探测器输出电压信号,作为性能评价特征值  $J^{(k)}$ ,此信号表征了  $N$  路合成之后的输出光强;

2) 模拟一系列统计无关的随机电压微扰  $\delta u_i^{(k)}$ ,其中  $|\delta u_i^{(k)}|$  是一个很小的常量;

3) 将此电压微扰序列正向加到相位调制器上,得到改变后的性能评价

$$J_+^{(k)} = J(u_1^{(k)} + \delta u_1^{(k)}, u_2^{(k)} + \delta u_2^{(k)}, \dots, u_N^{(k)} + \delta u_N^{(k)}); \quad (1)$$

4) 将此电压微扰序列负向加到相位调制器上,得到改变后的性能评价

$$J_-^{(k)} = J(u_1^{(k)} - \delta u_1^{(k)}, u_2^{(k)} - \delta u_2^{(k)}, \dots, u_N^{(k)} - \delta u_N^{(k)}); \quad (2)$$

5) 计算性能评价值的改变量

$$\delta J^{(k)} = J_+^{(k)} - J_-^{(k)}; \quad (3)$$

6) 计算反馈电压,输出至相位调制器

$$u_i^{(k+1)} = u_i^{(k)} + \gamma \delta u_i^{(k)} \delta J^{(k)}; \quad (4)$$

7) 下一次迭代循环开始。

式中  $k$  代表反馈循环次数, $i$  代表通道数( $i = 1, 2, \dots, N$ ,对于本文两路实验  $N = 1$ ), $\gamma$  代表算法增益。

重复以上的反馈过程,经过一定次数循环之后,光强即可收敛至最大值附近。若此收敛过程耗费的时间足够小,则可实现相位平移误差的实时补偿,使得光强稳定在最大值附近,达到相干合成。

## 3 光强信号与相位平移误差

光电探测器(PD)靶面为光敏材料,能够将光信号正比转化为电压信号输出,设系统中  $N$  路光波复振幅分别为

$$E_i = A_i e^{j\phi_i}, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

合成后光强为

$$I = \left| \sum_{i=1}^N A_i e^{j\phi_i} \right|^2, \quad (6)$$

该式在满足条件  $\phi_i - \phi_j = 2n\pi$  ( $i, j = 1, 2, \dots, N, n$  为整数)时达到最大值

$$I_{\max} = \left| \sum_{i=1}^N A_i \right|^2, \quad (7)$$

因此,将合成光强达到最大值作为锁相判据是合适的。

特别地,对于  $N = 2$  的情况,通过对(7)式的化简,可以直接建立光强和相位平移误差之间的关系,即

$$I = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\phi), \quad (8)$$

考虑到光电探测器的光强与输出电压的正比关系, 最终可得

$$\Delta\phi = \arccos\left[\frac{2V - (V_{\max} + V_{\min})}{V_{\max} - V_{\min}}\right], \quad (9)$$

由此可以通过探测 PD 的输出电压, 描绘出  $(0, \pi)$  区间即半个波长范围内的相位平移误差变化曲线。

## 4 基于 SPGD 的 MOPA-CBC 实验系统

基于 SPGD 的 MOPA-CBC 实验系统如图 1 所示。实验所用到的器件均为偏振保持型, 以保证光束的相干性。采用熊猫型单模保偏光纤, 接头为

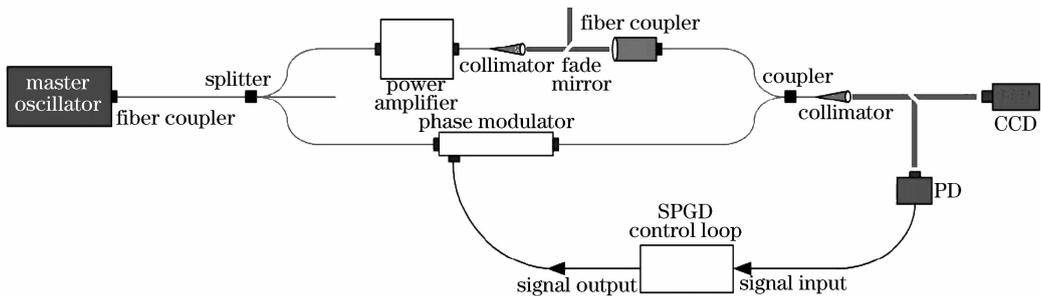


图 1 基于 SPGD 的两路 MOPA-CBC 实验系统

Fig. 1 Experiment system of MOPA-CBC based on SPGD algorithm

PM 是 MOPA-CBC 技术中的一个关键器件, 其核心为  $\text{LiNbO}_3$  晶体。此种晶体具有非线性光学性质, 在外加电场的作用下, 可产生线性电光效应, 晶体的折射率将受到偏置电压的影响。因此, 可以通过控制 PM 的偏置电压, 实现光束的相位调制, 为主动式锁相提供了条件。对于 MOPA-CBC 系统, 光纤放大器引入的相位噪声频率范围较宽 ( $\text{Hz} \sim \text{kHz}$ ), 而相位调制器的调制频率非常高, 理论上可达  $300 \text{ GHz}$ 。因此, PM 能够实现高频相位噪声的补偿, 保证系统的锁相带宽。

## 5 实验结果与分析

### 5.1 算法控制平台

实验的算法控制平台采用基于  $2.93 \text{ GHz}$  CPU,  $1.0 \text{ Gb}$  DRAM 的 PC 机, 操作系统为 Microsoft Windows XP, 算法程序环境为 VC6.0, AD/DA 卡采用 NI 公司的 PCI-6221 卡。对于图 1 的实验系统, 此平台可实现  $26000 \text{ 次/s}$  SPGD 算法循环。

### 5.2 相位噪声分析

图 2 为光纤放大器工作在两种状态下得到的相位平移误差变化曲线。图 2(a) 为放大器未工作时的情况, 图 2(b) 为放大器  $10 \text{ W}$  输出时的工作情形。

FC/PC 标准接头。主振荡种子光源采用 Lumics 公司的半导体激光器, 能够产生波长  $1064 \text{ nm}$ , 最大功率  $150 \text{ mW}$  的单模激光束。光束通过  $1 \times 3$  保偏分束器分束, 保留其中两路, 一路通道配有  $10 \text{ W}$  级掺镱型光纤放大器, 放大后的光束经过衰减, 重新耦合进入光纤; 另一通道配有铌酸锂相位调制器 ( $\text{LiNbO}_3 \text{ PM}$ ), 之后两路光束通过合束器再次耦合。合成光束经过准直器与分光镜, 一束用于 CCD 观测, 另一束用于 PD 探测。PD 探测信号通过 AD 卡采集至算法平台, 经过迭代计算后, 由 DA 卡输出电压控制 PM, 实现相位平移误差的实时补偿。

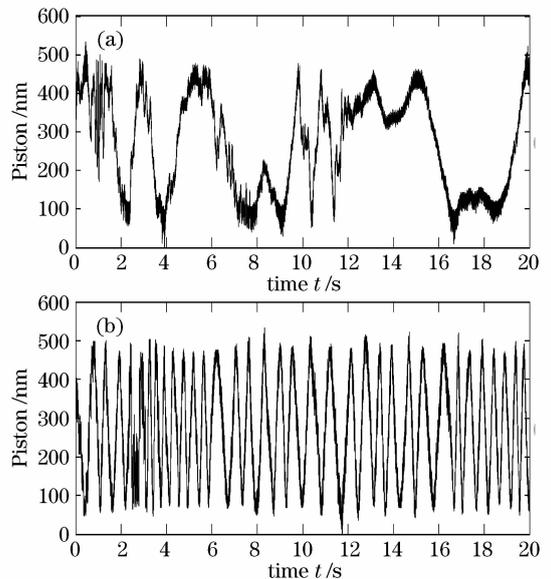


图 2 光纤放大器两种状态下的相位平移误差变化曲线  
(a) 放大器关闭; (b) 放大  $10 \text{ W}$

Fig. 2 Piston error variation curves when fiber amplifier operates in two different stages. (a) power amplifier off; (b)  $10 \text{ W}$  amplifier

光纤放大器未工作时, 相位噪声主要源于外界的机械振动, 频率较低; 放大器正常工作时, 相位噪声主要源于温度升高引起的光纤折射率变化, 频率较高,

同时还有小部分噪声源于光纤热膨胀效应引起的光程差改变,但后者的影响不足前者的 2%<sup>[16]</sup>。

### 5.3 实验结果

图 3 所示为放大器开启到 10 W 输出后,3 个不同时间区间内所完成的闭环实验结果。3 组数据的采样时间为 10 s,并且在第 2.5 s 后闭环。该组曲线显示 SPGD 算法发挥了良好的控制能力:对于不同频率的相位噪声,在锁相开启后,相位平移误差均稳定在最小值附近,相位平移 PV 值降低至 100.8 nm,系统校正精度达到  $1/(10\lambda)$ 。

图 4 为 CCD 采集到的开闭环的合成光斑 10 s 长曝光图,其中图 4(a),(b)为开环图样,(c),(d)为闭环图样。开环时,光斑明暗交替快速抖动,闭环后,光斑稳定保持在最大亮度,无明显抖动。长曝光图显示,闭环后合成光束的平均亮度提高到了之前的 1.5 倍。

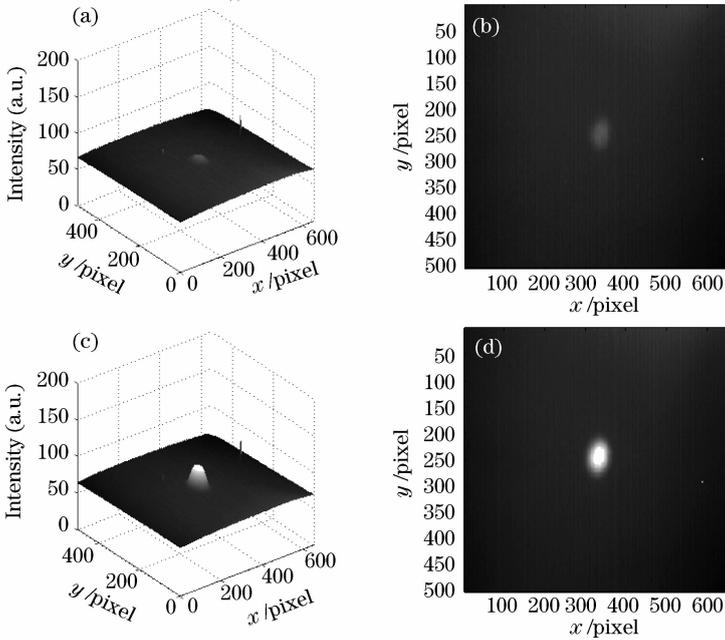


图 4 开闭环合成光斑 CCD 10 s 长曝光示意图。(a) 开环 3D 图;(b) 开环 2D 图;(c) 闭环 3D 图;(d) 闭环 2D 图

Fig. 4 CCD 10 s long exposal patterns of combined beam. (a) three-dimensional (3D) pattern of open loop;

(b) two-dimensional (2D) pattern of open loop; (c) 3D pattern of close loop; (d) 2D pattern of close loop

实验用到的光纤放大器具有 600 mW 放大和 10 W 放大两种工作状态。图 5 为放大器工作在 600 mW(图 5(a))状态和 10 W(图 5(b))状态时,开闭环情况下的相位噪声频谱密度分析。图 5(a)显示低于约 84 Hz 的频率成分得到了有效的补偿;图 5(b)显示低于约 132 Hz 的频率成分得到了有效的补偿。可以推断,系统的有效控制带宽大约为 100 Hz。对比图 5(a),(b)还可以看出,放大器工作在两种状态时,相位噪声的频率成分差异不大,且占

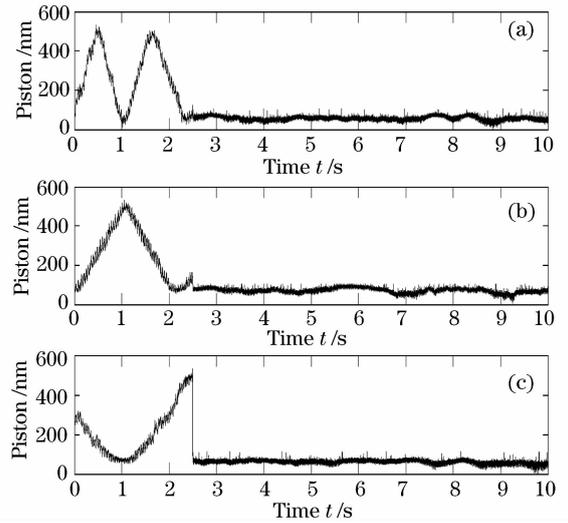
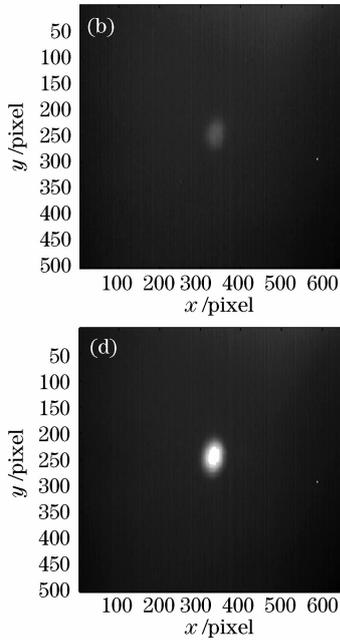


图 3 开闭环实验相位平移误差变化曲线

Fig. 3 Piston error variation curves of open to close loop experiments



主导地位的频率成分低于千赫兹水平。

## 6 结 论

提出了一种基于 SPGD 算法的 MOPA-CBC 锁相控制技术,理论上分析了 SPGD 算法的控制原理,建立了光强信号和相位平移误差之间的函数对应关系。算法通过最大化光强的方式,实现闭环锁相。其最大的优点在于不需要复杂的相位平移误差检测结构,仅用到一个光电探测器。

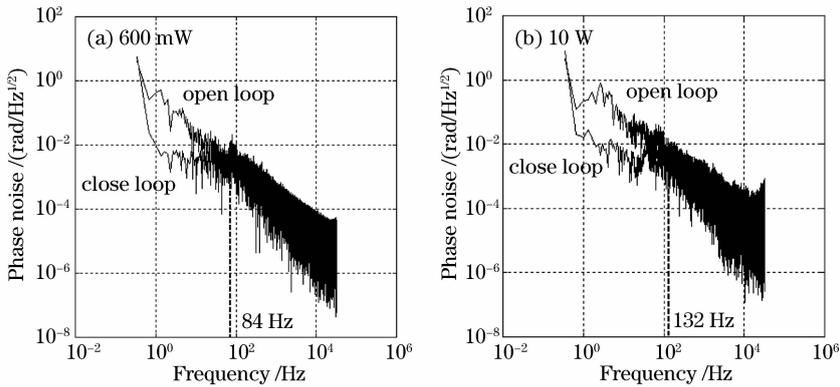


图5 两种放大状态下开闭环的相位噪声频谱分析

Fig. 5 Phase noise spectral analysis of open and close loop when fiber amplifier operates in two different stages

搭建了实验平台,获得了稳定的相干合成光束,充分验证了算法的性能。通过实验数据分析,解释了系统的相位噪声误差来源,也得出了系统的闭环控制精度和带宽。实验结果表明,SPGD算法在两路MOPA-CBC系统中工作良好,是一种可行的锁相技术,此结论为今后实现更多路数的MOPA-CBC系统提供了参考。

### 参 考 文 献

- Li Lijun, Fan Wande, Fu Shenggui *et al.*. Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser with frequency selecting by double-clad fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1):55~58
- 李丽君, 范万德, 付圣贵 等. 双包层光纤光栅选频双包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1):55~58
- Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. A 440W CW high power output with homemade Yb-doped double-clad-fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):20
- 楼祺洪, 周 军, 朱健强 等. 国产双包层掺镱光纤实现 440 W 的连续高功率激光输出[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):20
- M. K. Davis, M. J. F. Digonnet, R. H. Pantell. Thermal effects in doped fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**:1013~1023
- E. J. Bochove, P. K. Cheo, G. G. King *et al.*. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14):1200~1202
- Monica L. Minden, Hans W. Bruesselbach, Jeffrey L. Rogers *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser arrays [C]. *SPIE*, 2004, **5335**:89~97
- G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power zigzag slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9):1247~1249
- T. M. Shay, Vincent Benham, J. T. Baker *et al.*. Narrow linewidth coherent beam combining of optical fiber amplifier arrays [C]. *SPIE*, 2007, **6451**:64511N
- He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Coherent output power of 60 W from two large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1279~1280
- 何 兵, 楼祺洪, 周 军 等. 两根大芯双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1279~1280
- 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):1153~1158
- 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):1153~1158
- Ruofu Yang, Xiaojun Zhang, Feng Shen *et al.*. A new algorithm of combining for spatial coherent beams [C]. *Adaptive Optics for Industry and Medicine. Proceeding of the Sixth International Workshop*, 2008. 445~451
- Ping Yang, Ruofu Yang, Feng Shen *et al.*. Coherent combination of two ytterbium fiber amplifier based on an active segmented mirror [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**:1349~1353
- R. Xiao, J. Hou, M. Liu *et al.*. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber array [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3):2015~2022
- J. Hou, R. Xiao, Z. F. Jiang *et al.*. Coherent beam combination of two polarization maintaining ytterbium fibre amplifiers [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**:2273~2275
- T. M. Shay, V. Benham. First experimental demonstration of fiber array phase locking by RF phase modulation [C]. *Proc. 17th Solid State Diode Laser Technol. Rev. Albuquerque, NM*, 2004
- J. C. Spall. Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation [J]. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1992, **37**(3):332~341
- R. A. Muller, A. Buffington. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1974, **64**(9):1200~1210
- 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
- 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
- Yi Zheng, Feng Shen. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for coherent combining [C]. *SPIE*, 2008, **7156**:71563C