

文章编号: 0253-2239(2010)10-2874-05

SPGD 算法在光纤激光相干阵列光束控制中的应用

王小林 周 朴 马阎星 马浩统 许晓军 赵伊君

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 主动相位控制的光纤激光阵列相干合成在提高输出功率的同时能够保证良好的光束质量,其关键技术在于光纤激光相干阵列的锁相控制。基于随机并行梯度下降(SPGD)算法的锁相控制方案不仅具有控制策略简单、系统结构紧凑的优点,而且通过算法性能评价函数和迭代参数的选取,能够对光纤激光相干阵列进行多种锁相控制,从而得到各种形式的阵列合成光束输出,实现与自适应光子锁相元件阵列(APPLE)系统阵列的有效契合。理论研究并实验实现了基于 SPGD 算法的相位控制方案的同相相干合成锁相控制、合成光束主极大偏转控制和空心光束产生等功能,验证了基于 SPGD 算法的全电光束控制在各种形态光束控制中的可行性。

关键词 光纤光学;锁相控制;随机并行梯度下降(SPGD)算法;相干合成;光束偏转;空心光束

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2874

Phase Control of Coherent Fiber Laser Array Using Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm and its Application

Wang Xiaolin Zhou Pu Ma Yanxing Ma Haotong Xu Xiaojun Zhao Yijun

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

Abstract Active phasing coherent beam combination of fiber laser array is an efficient way to scale high power laser while holding good beam quality simultaneously. The key technique of active phasing coherent beam combining system is active phase-locking control of the coherent fiber laser array. Active phase-locking using stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm holds the advantage of easy strategy and compact bulk. Furthermore, by choosing appropriate metric function and iteration parameter, special phase control state of the system can be realized and corresponding multiform coherent combined laser beams can be achieved, which are agree with the requirement of adaptive photonics phase-locked element (APPLE) array system. With SPGD algorithm-based active phase-locking system, in-phase phase locking of coherent beam combination, beam steering of the main lobe of combined laser beams, generation of dark-hollow beam are analyzed theoretically and demonstrated experimentally, and the feasibility of multiform beam control of coherent fiber laser array using SPGD algorithm is validated.

Key words fiber optics; phase-locking control; stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm; coherent beam combining; beam steering; dark-hollow beam

1 引 言

受限于单路光纤激光器的功率,相干合成作为提高输出功率的有效手段,能够同时保证光束质量,近年来受到人们的广泛关注^[1~7]。目前,相干合成的主要技术方案有基于主动相位控制的主振荡功率

放大(MOPA)技术^[8~12],基于被动锁相的外腔耦合相干合成技术^[4,13]、多芯光纤自组织技术^[14,15]和全光纤耦合自组织技术^[16,17]等。其中基于 MOPA 结构的主动相位控制方案是目前获得大功率相干合成输出的最有效手段^[12]。在该方案中,其关键技术在于

收稿日期: 2010-01-27; 收到修改稿日期: 2010-03-10

基金项目: 国防科学技术大学优秀研究生创新项目(B080702)资助课题。

作者简介: 王小林(1985—),男,博士研究生,主要从事光纤激光相干合成方面的研究。E-mail: wxllin@nudt.edu.cn

导师简介: 赵伊君(1930—),男,中国工程院院士,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

于光纤激光相干阵列锁相控制,常用的相位控制方法有外差法^[18]、多抖动法^[19,20]和随机并行梯度下降 (SPGD)法^[8,21,22]等。基于的 SPGD 算法的相干合成方案根据优化控制原理实现锁相控制,不需要进行精确的相位探测和解调,对相位控制器件无严格要求,控制策略简单、系统结构紧凑,有望成为实用的相干合成方案^[23]。考虑到在自适应光子锁相元件阵列 (APPLE) 系统中的对光束的全电控制需求^[23],在中继镜传输等应用场合中对光束形态的特定需求^[24],而基于 SPGD 算法优化控制原理实现相位控制,通过性能评价函数和迭代参数的选取,能够实现对光纤激光相干阵列的不同锁相控制,从而实现合成光束形态的控制。因此,基于 SPGD 算法的光束控制系统可以实现算法与 APPLE 系统阵列的契合,实现灵活多变的光束控制。在文献[6]中,对基于 SPGD 算法的光束控制进行过初步的探讨^[8],本文重点研究 SPGD 算法在光纤激光阵列的同相相干合成、合成光束主极大偏转控制和空心光束产生等方面实验研究。

2 SPGD 算法及其在相干合成中的应用

SPGD 算法是一种快速有效的梯度估计方法^[25],其梯度的估计是通过对性能评价函数 $J(\mathbf{u})$ 的所有控制参量并行施加随机扰动,根据扰动大小和性能评价函数的变化量来实现梯度估计。SPGD 算法的迭代公式为^[26]

$$u_j^{(n+1)} = u_j^{(n)} + \gamma \delta J^{(n)} \delta u_j^{(n)}, \quad j = 1, \dots, N, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{u} = \{u_j^{(n)}\}$ 为控制变量, γ 为迭代步长。 $\delta J^{(n)}$ 为扰动前后性能评价函数变化量:

$$\delta J^{(n)} = J'^{(n)} - J^{(n)} = J(u_1 + \delta u_1, \dots, u_j + \delta u_j, \dots, u_N + \delta u_N) - J(u_1, \dots, u_j, \dots, u_N), \quad (2)$$

式中 $J^{(n)}$, $J'^{(n)}$ 为扰动前后系统性能评价函数值, $\{\delta u_j^{(n)}\}$ 为统计独立的随机扰动。

SPGD 算法作为求解最优控制问题的有效方法,通过选取不同性能评价函数,能够实现系统的不同受控状态。在光纤激光相干阵列中,控制矢量 $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_j, \dots, u_N]$ 为各路激光束的相位,性能评价函数的选取根据实际需求而定。图 1 为基于 SPGD 算法的 MOPA 结构相干合成的系统原理图。主振荡激光器 (MO) 输出光束通过分束器 (Splitter) 后被分为多路,每一路先后经过 LiNbO_3 相位调制器 (PM)、隔离器 (ISO) 和光纤激光放大器 (FAM)。放大后的各路光束经过准直器 (CO) 后构成阵列光束,

阵列光束经过分光镜 (BS) 后被分成两路,一路通过透镜成像后用红外相机观察远场干涉图样;另一路经透镜聚焦并通过小孔后进入光电探测器,光电探测器探测到的光强作为系统评价函数 (又称为判据) J 。光电探测器放置于透镜的后焦平面上,小孔光阑紧贴于探测器前端放置。探测器探测到的光强信号分别送入示波器和 SPGD 控制器的模数 (AD) 转换器,SPGD 控制器利用 AD 采样的数据,根据 SPGD 算法原理,对相位调制器施加相应的控制信号,实现锁相控制。

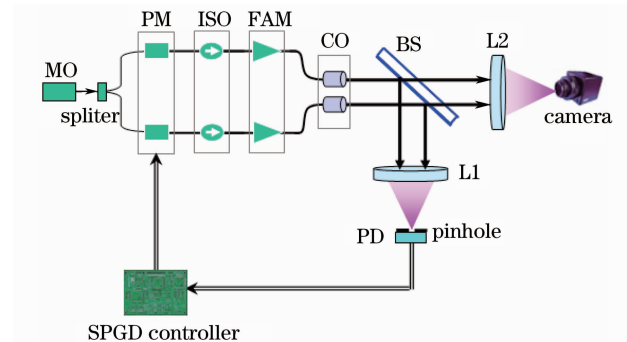


图 1 基于 SPGD 算法的 MOPA 结构光纤激光相干阵列相位控制系统

Fig. 1 Experimental setup of phase control system of coherent fiber laser array in MOPA configuration based on SPGD algorithm

在利用 SPGD 算法进行光纤激光阵列相位控制时,算法的具体实现过程如下:

1) 生成随机扰动向量并转换为电压信号 $\delta \mathbf{u} = [\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_n]$, 随机扰动 $\{\delta u_j\}$ 满足均值为零、方差相等,即满足 $\langle \delta u_i \rangle = 0$, $\langle \delta u_i \delta u_j \rangle = \sigma^2 \delta_{ij}$;

2) 将随机扰动电压 $\delta \mathbf{u}$ 施加到各个相位调制器上,取得评价函数的值 $J^+ = J(\mathbf{u} + \delta \mathbf{u})$,然后施加反相的扰动电压 $-\delta \mathbf{u}$,取得负向扰动的评价函数 $J^- = J(\mathbf{u} - \delta \mathbf{u})$;

3) 计算评价函数的变化量 $\delta J = \frac{J^+ - J^-}{2}$;

4) 根据式 $\mathbf{u}^{(k+1)} = \mathbf{u}^{(k)} + \gamma \delta \mathbf{u}^{(k)} \delta J^{(k)}$ (其中 k 为迭代次数),更新控制参数。

重复步骤 1)~4),直至人工停止算法执行。

在相干光纤激光合成阵列中,利用课题组开发的 SPGD 算法控制器,通过性能评价函数和迭代参数的选取对合成光束形态的进行控制,分别实现了同相相干合成锁相控制、合成光束主极大偏转控制、空心光束产生等功能。

3 SPGD 算法在光纤激光相干阵列相位控制中的应用

3.1 基于 SPGD 算法的同相相干合成

在相干合成中,选择远场艾里斑中心圆域内环围能量作为性能评价函数,选取迭代参数 $\gamma > 0$ (执行 SPGD 算法求解性能评价函数极大化的过程),能够实现稳定的同相相干合成,将合成主瓣能量显著提高。课题组自 2006 年以来开展了基于 SPGD 算法的相干合成的理论和实验研究,先后实现了 1~6 路数瓦量级、十瓦量级光纤放大器相干合成和 16 路全光纤激光相干合成^[8,10,11,22,27]。图 2 为 6 路十瓦量级光纤放大器激光合成实验结果。实验中,6 路激光近场排列成正六边形,各路激光功率均大于 10 W,合成总功率大于 70 W。系统闭环时,性能评价函数较开环时提高了 4.1 倍,远场长曝光干涉图

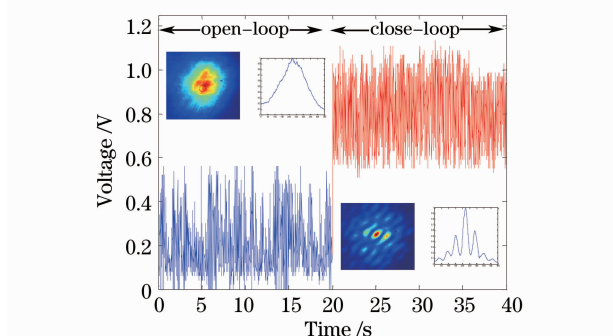


图 2 6 路 10 W 光纤激光相干合成实验结果

Fig. 2 Experimental results of coherent combination of 6-channel 10 W fiber laser beam

样的条纹对比度则从开环时的 0 提高到闭环时的 0.73,对应的主瓣能量占总能量的比例从开环时的 3% 提高到闭环时的 12.5%。

3.2 利用 SPGD 算法实现合成光束偏转控制

在 APPLE 系统光束指向等应用中,需要对光束进行偏转控制,为此,提出了基于 SPGD 算法的全电光束偏转控制方案。理论上,在光纤激光合成相干中,将性能评价函数选择为远场待指向的某一点为中心的圆形区域内环围能量,并令 $\gamma > 0$,根据 SPGD 算法极大化原理,能够实现该指向区域内光功率的极大化,从而达到相干合成光束主极大偏转的目的。实验中,通过调节图 1 中小孔的水平位置模拟指向区域的选择,实现了四路激光相干合成光束主极大的水平方向偏转。实验结果如图 3 所示,图 3(a),(b),(c) 分别对应原始光束干涉图样和主极大左右偏转控制后的光束干涉图样。计算结果表明光束主极大实现了 $\pm 500 \mu\text{m}$ 的偏转,考虑到光束传播距离约为 5 m,实际上实现了 $\pm 0.1 \text{ mrad}$ 的光束主极大偏转控制。利用数字图像处理技术得到原始光束主瓣能占总能量的 18.1%,左右偏转后主瓣能量分别占总能量的 15.4% 和 14.7%。定义偏转效率为偏转前后主瓣能量之比,左右偏转的效率分别达 85.1% 和 81.2%。实验中利用 LiNbO_3 相位调制器的全电光束偏转替代了传统的机械偏转,偏转速率(可达 100 kHz)远大于传统机械偏转的速率,能够满足 APPLE 系统阵列全电控制的需求,与之实现有效地契合。

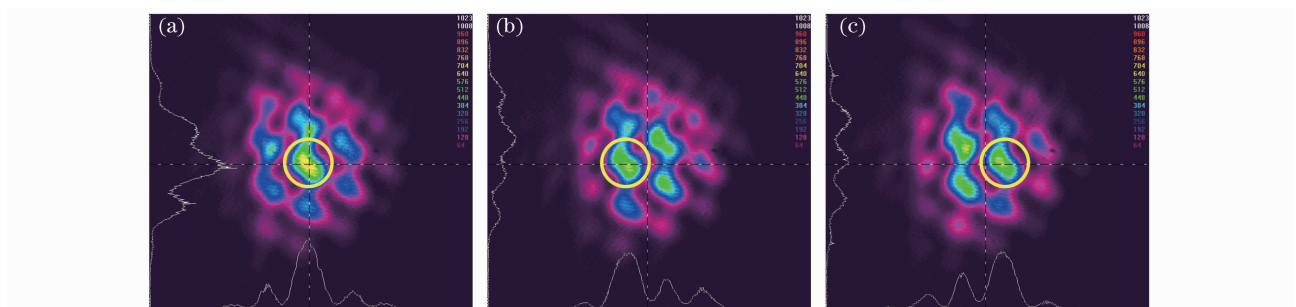


图 3 相干合成光束偏转控制实验结果。(a)原始干涉图样;(b)光束主极大左边偏转;(c)光束主极大右边偏转

Fig. 3 Results of beam steering of coherent combined beam. (a) original interference pattern; (b) left steering of the beam main lobe; (c) right steering of the beam main lobe

3.3 基于 SPGD 算法利用光纤激光相干阵列产生近似空心光束

空心光束在微粒捕获、自由空间光通信、原子光学和生命科学等领域中有着广泛的应用,目前产生空心光束的方法主要有模式转换法、横模选择法和空心光纤法等^[28]。而在光束能量传输中,空心光束

与卡茨格林系统、中继续系统能够较好的匹配,为此,提出了利用光纤激光相干阵列产生空心光束的方法。理论上,在图 1 的相干合成系统中,选择远场中心区域内环围能量作为性能评价函数,令(1)式中的 $\gamma < 0$,算法对应性能评价函数的极小化过程。在算法执行后,性能评价函数为极小值 0,对应远场中

心区域为暗斑,即实现中空光束的产生。实验中,利用四路相干合成产生了近似空心光束,如图 4 所示。图 4(a)为 $\gamma > 0$ 时得到同相相干合成干涉图样,图 4(b)为迭代式取 $-\gamma$ 时得到的同相相干合成中空光束。当迭代式(1)中 $\gamma > 0$ 变为 $\gamma < 0$ 时,远场中心区域内(以合成主瓣为半径 $320 \mu\text{m}$ 的圆形区域)

光强从 0.17 减小到 0.08,较为有效地实现了中空的光束。由于实验中合成光束路数较少,空心光束效果不太理想,如果合成光束数目足够多,理论上能够得到较好的空心光束^[8],该方法不失为空心光束产生的候选方案之一。

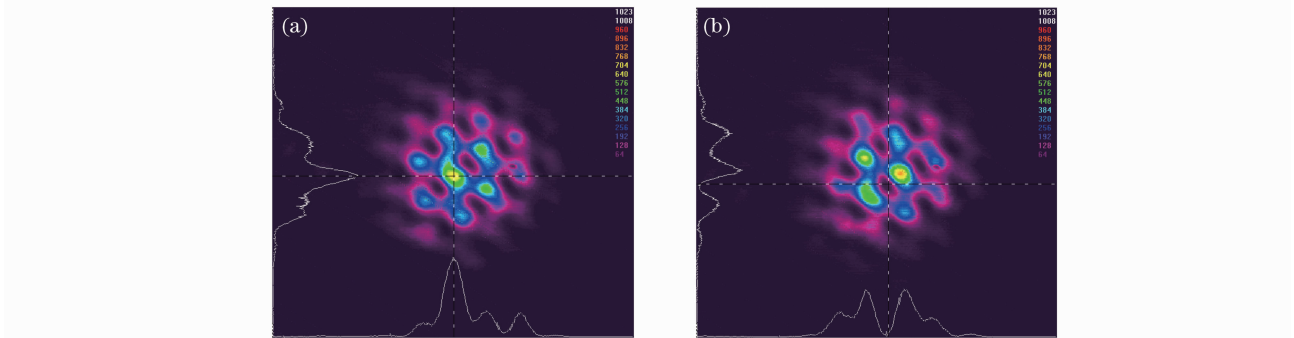


图 4 四路激光相干合成产生中空光束。(a)理想相干合成干涉图样;(b)近似空心光束

Fig. 4 Dark-hollow beam generated by 4 lasers coherent combining. (a) interference pattern; of ideal coherent combination (b) like dark-hollow beam

综上,在光纤激光相干阵列中,通过 SPGD 算法的性能评价函数和迭代参数的选取,分别实现了同相相干合成锁相控制、合成光束主极大偏转控制、空心光束产生等功能。现将以上几种应用中的 SPGD 算法性能评价函数和迭代参数的选取方式描述如表 1 所示,并简单总结如下:选择远场中心区域

内环围能量作为性能评价函数,令 $\gamma > 0$,能实现同相相干合成,合成光束中央为主极大;当选择远场待指向的某一点中心区域内环围能量为性能评价函数,令 $\gamma > 0$,能够实现到指向区域的光束主极大偏转;选择远场中心区域内环围能量作为性能评价函数,令 $\gamma < 0$,可实现中空光束的产生。

表 1 几种应用中的 SPGD 算法性能评价函数和迭代参数

Table 1 Metric function and iteration parameter of SPGD algorithm in some applications

Application	Metric function	Iteration parameter	Extremum property
In-phase coherent beam combining	Power in the bucket of central point (x_0, y_0)	$\gamma > 0$	maximum
Beam string	Power in the bucket of appointed point (x, y)	$\gamma > 0$	maximum
Generation of dark-hollow beam	Power in the bucket of central point (x_0, y_0)	$\gamma < 0$	minimum

4 结 论

在光纤激光相干阵列的相位控制方案中,基于的 SPGD 算法的方案不需要进行精确的相位探测和解调,不仅具有控制策略简单、系统结构紧凑的优点,而且通过不同性能评价函数和迭代参数的选取,能够实现同相相干合成锁相控制、合成光束主极大偏转控制和空心光束产生等功能。撇开外差法光路调节难度和复杂的多路相位检测控制技术、多抖动法多路信号调制和解调电路带来的系统复杂性不考虑,仅从系统的灵活性来说,基于优化算法(SPGD 算法)的相干合成相位控制不仅能够实现通常意义下的相干合成,还能实现一定角度的高速光束偏转控制、空心光束产生等功能。考虑到在 APPLE 系统中的对光束的全电控制和在中继镜传输等应用中

对光束形态的特定需求,基于 SPGD 算法的光束控制系统可以与 APPLE 系统阵列的契合,实现灵活的光束控制。

参 考 文 献

- 1 H. Bruesselbach D. C. Jones, M. S. Mangin *et al.*. Self-organized coherence in fiber laser array[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **30**(11): 1339~1341
- 2 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE J. Sel. Top. in Quant.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 3 B. He, Q. Lou, J. Zhou *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2721~2726
- 4 B. He, Q. Lou, J. 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
- 5 L. Li, A. Schülzgen, H. Li *et al.*. Phase-locked multicore all-

- fiber lasers: modeling and experimental investigation[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1721~1728
- 6 Yang Ruofu, Yang Ping, Shen Feng. Experimental investigation of laser coherent combining based on active segmented mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 424~427
杨若夫, 杨平, 沈锋. 基于能动分块反射镜的激光相干合成实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 424~427
- 7 Dong Hongcheng, Liu Yang, Yi Kui *et al.*. Theory analysis of polarized beam coherent combination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2346~2351
董洪成, 刘阳, 易葵等. 偏振光束相干合成的理论分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2346~2351
- 8 P. Zhou, Z. Liu, X. Wang *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 2009, **15**(2): 248~256
- 9 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *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
- 10 Zhou Pu, Liu Zejin, Wang Xiaolin *et al.*. Theoretical and experimental investigation on coherent beam combining of fiber lasers using SPGD algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2232~2237
周朴, 刘泽金, 王小林等. 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[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2232~2237
- 11 Liu Zeji, Zhou Pu, Hou Jing *et al.*. Research of coherent beam combining using actively phase-controlling [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 518~524
刘泽金, 周朴, 侯静等. 主动相位控制光纤激光相干合成的研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 518~524
- 12 N. Grumman. Northrop Grumman Scales New Heights In Electric Laser Power, Achieves 100 Kilowatts. http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=161575
- 13 L. Liu, Y. Zhou, K. Kong. Phase locking in a fiber laser array with varying path lengths [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(21): 4837~4839
- 14 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
- 15 P. K. Cheo, A. Liu, G. G. King. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber array[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 411~439
- 16 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Haotong *et al.*. Synchronization and coherent combining of two pulsed fiber ring lasers based on direct phase modulation[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(5): 054212
- 17 A. Shirakawa, T. Saitou, T. Sekiguchi. Coherent addition of fibers by use a fiber coupler[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(21): 1167~1172
- 18 R. Xiao, J. Hou, M. Liu *et al.*. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 2015~2022
- 19 T. M. Shay, V. Benham, J. T. Bake *et al.*. Self synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 2007, **13**(3): 480~486
- 20 Ma Yanxing, Liu Zejin, Zhou Pu *et al.*. Coherent beam combination of three fiber amplifiers with multi-dithering technique[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 44204~44206
- 21 L. Liu, M. A. Vorontsov, E. Polnau *et al.*. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners [C]. *SPIE*, 2008, **6708**: 67080K
- 22 P. Zhou, Y. Ma, X. Wang *et al.*. Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 2939~2941
- 23 M. Vorontsov. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE)[C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 589501
- 24 E. A. Daff, D. C. Washburn. The magic of relay mirrors[C]. *SPIE*, 2004, **5413**: 137~144
- 25 Yang Huizhen. Adaptive Optics Without a Sensor Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm and Its Applications[D]. Chengdu: Institute of Optoelectronics, Chinese Academy of Sciences, 2008
杨慧珍. 无波前探测自适应光学随机并行优化控制算法及其应用研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2008
- 26 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient descent optimization [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(12): 907~909
- 27 Zhou Pu, Lin Zejin, Wang Xiaolin *et al.*. Coherent beam combining of three watt-level fiber amplifiers using a DSP-based stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 44202~44204
- 28 C. Zhao, Y. Cai, F. Wang *et al.*. Generation of a high-quality partially coherent dark hollow beam with a multimode fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(12): 1389~1391