

基于主动相位控制的脉冲激光相干合成技术*

王小林, 周朴, 马阎星, 马浩统, 李霄, 许晓军, 赵伊君
(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:提出并验证了基于随机并行梯度下降 (SPGD) 算法的主动相位控制脉冲激光相干合成方案。利用低通滤波器滤除脉冲激光光强变化导致的性能评价函数起伏, 提取出相位噪声导致的性能评价函数变化, 然后将这个低通滤波后的性能评价函数用于 SPGD 算法的极值寻优过程, 从而实现脉冲激光的锁相。对该方案进行了理论分析和数值模拟, 并进行了两路脉冲激光相干合成实验。实验结果表明, 当系统从闭环到开环时, 系统性能评价函数均值提高到开环的 1.6 倍, 干涉条纹长曝光对比度从 0 提高到 0.43。在该方案中, 通过增加合成脉冲激光路数, 并在各路脉冲激光中引入多级功率放大器, 能够得到更高的合成功率输出。

关键词: 光纤激光; 脉冲激光; 相干合成; 相位控制; 随机并行梯度下降算法

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)01-0033-05

Investigation of coherent beam combining pulsed fiber lasers with active phase control

WANG Xiaolin, ZHOU Pu, MA Yanxing, MA Haotong, LI Xiao, XU Xiaojun, ZHAO Yijun

(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A scalable architecture for coherent combining of pulsed lasers with active phase control using stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is proposed and demonstrated. A low-pass filter is introduced to eliminate the fluctuation of the metric function caused by pulsed lasers and extract the exact phase noise signal, and an active control is thereby built with SPGD algorithm and stable coherent beam combining can be obtained at the receiving plane. Theoretical analysis and numerical simulation were made and an experiment of coherent beam combining two-channel pulsed fiber lasers was also conducted. Experiment results shows that the power encircled in the main-lobe is 1.6 times increased and the fringe visibility of the long exposure pattern is increased from 0 to 0.43 when the system evolves from open-loop to closed-loop. This architecture can be easily scaled up to high power by increasing the number of channel for coherent combining and adding power amplifiers in each channel.

Key words: fiber laser; pulsed laser; coherent beam combining; phase control; stochastic parallel gradient descent algorithm

脉冲光纤激光在遥感遥测、激光雷达、材料处理、非线性频率变换等领域^[1-3]有着广泛的应用。但是由于受到热效应、非线性效应等因素的限制, 单根光纤的输出功率有限。在脉冲激光器中, 这些因素对输出功率的限制更为突出^[4]。此外, 随着输出功率的增加, 输出激光的光束质量也随之变差。相干合成 (CBC) 作为提高输出功率的有效手段, 能够在提高输出功率的同时保证良好的光束质量^[5], 受到人们的广泛关注^[6-10]。为了获得高功率、高光束质量的脉冲激光源, 国内外研究人员提出了多种基于被动锁相的脉冲激光相干合成技术: 外腔耦合相干合成技术^{[1][11]}, 多芯光纤

自组织相干合成技术^[12], 全光纤耦合自组织相干合成技术^[13]等。然而, 在连续激光相干合成中, 目前最高功率相干合成是基于主动相位控制主振荡功率放大 (MOPA) 方案^[14], 由于主动相位控制能够补偿外界扰动导致的被动锁相的不稳定性, 被认为是迈向更高功率的有效的相干合成方案。目前, 尽管国外研究人员利用外差法实现了连续种子光与放大后脉冲光的锁相^[15], 但是基于主动相位控制的两路脉冲激光的锁相还没有真正意义上实现。本文利用随机并行梯度下降 (SPGD) 算法, 首次提出了基于主动相位控制的脉冲激光相干合成方案。该方案通过低通滤波器滤除脉冲激

* 收稿日期: 2011-11-05

基金项目: 国防科技大学优秀研究生创新资助项目 (B080702)

作者简介: 王小林 (1985—), 男, 重庆垫江人, 博士研究生, E-mail: wxllin@nudt.edu.cn;
赵伊君 (通信作者), 男, 教授, 院士, 博士生导师, E-mail: zhaoyij70@sina.com;
许晓军 (通信作者), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, E-mail: xuxj@21cn.com

光相干合成中的光强起伏导致的性能评价函数变化,提取出相位噪声导致的性能评价函数变化,然后利用与连续激光相干合成完全相同的控制方法,实现对脉冲激光相位的锁定。文中进行了理论分析和实验研究,实验结果表明,该方法能够有效地实现脉冲激光的相位锁定。

1 主动相位控制脉冲激光相干合成原理

1.1 基于 SPGD 算法的主动相位控制连续激光相干合成基本原理

图 1 为基于 SPGD 算法的 MOPA 结构连续激光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,每一路先后经过相位调制器(PM)、隔离器(ISO)和多级光纤激光放大器(AMP)。放大后的光束经过准直器(CO)准直输出,输出光束经过分光镜(Sampler)后被分成两路。一路(透射光)用红外相机观察干涉图样,通过仔细调节各路激光的空间位置,使得各路激光在近场规则排布的同时,保证在观察处两路光斑空间交叠以实现光束合成。另一路(反射光)通过小孔后进入光电探测器(PD)。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。光电探测器探测到的合成光束的主瓣能量作为系统评价函数 J 。探测器探测到的光强信号分别送入示波器和 SPGD 控制器的 AD 转换器,SPGD 控制器利用 AD 采样的数据,根据 SPGD 算法极值寻优原理,对相位调制器施加相应的控制信号,实现锁相控制。

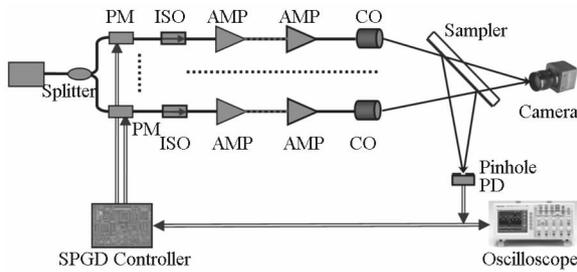


图 1 基于 SPGD 算法的 MOPA 结构光激光相干合成原理

Fig. 1 Experimental setup of coherent beam combining of fiber lasers in MOPA configuration using SPGD algorithm

连续激光相干合成中,SPGD 算法的具体实现过程如下^[9-10,16-18]:

(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 $\langle \delta u_i \rangle = 0$ 、 $\langle \delta u_i \delta u_j \rangle = \sigma^2 \delta_{ij}$, 其中 n 为合成光束数目, σ 为扰动电压值;

(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, γ 为步进增益), 更新控制参数 \mathbf{u} 。

重复步骤(1)到(4),直至人工停止算法执行。

1.2 基于 SPGD 算法主动相位控制脉冲激光相干合成理论分析

在连续激光相干合成中,由于性能评价函数 J 中携带了各路激光准确的相位噪声信息,通过 SPGD 算法的极值寻优过程,当性能评价函数为极大值时,各路激光相位实现锁相。如果直接将该方法用于脉冲激光相干合成的锁相控制,由于如图 1 所示的探测器中,探测到的光信号中不仅携带了各路激光的相位噪声信息,还包含了光强本身的起伏信息,因此,性能评价函数 J 中不仅包含了相位噪声信息,还包含了光强起伏信息。如果不经任何处理,直接将这个性能评价函数用于算法控制,显然不能实现锁相控制。考虑到实际相干合成中,光纤放大器的相位噪声频率一般在 1kHz 以下^[19],而脉冲激光的重复频率则高于 10kHz。如果利用适当截止频率的低通滤波器滤除脉冲激光光强变化导致的性能评价函数起伏,提取出相位噪声导致的性能评价函数变化,那么得到的性能评价函数与相位噪声的关系与连续激光相干合成中性能评价函数与相位噪声的关系相同。将这个低通滤波后的性能评价函数用于 SPGD 算法的极值寻优过程,就能实现脉冲激光的锁相。根据这一原理,图 2 给出了 MOPA 结构脉冲激光相干合成的原理图。与图 1 类似,图 2

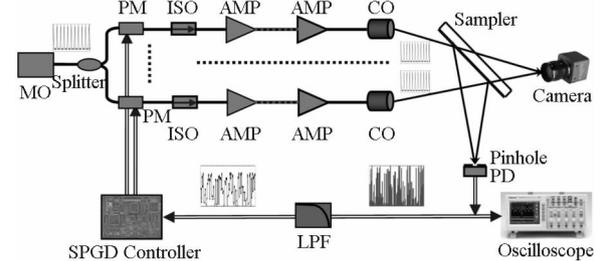


图 2 基于 SPGD 算法的 MOPA 结构脉冲激光相干合成原理

Fig. 2 Experimental setup of coherent beam combining of pulsed fiber lasers in MOPA configuration using SPGD algorithm

的不同之处在于种子源为脉冲器,探测器探测到的性能评价函数首先经过低通滤波器(LPF)滤出光强起伏信息,然后进入算法控制器。

为了验证该方案的可行性,我们首先利用两路频率为 1MHz 的正弦波形脉冲激光进行了数值仿真。仿真中,利用幅度为 5rad、采样率为 10kHz 的白噪声模拟相位噪声。为了实现有效的滤波,设计低通滤波器的截止频率为 100kHz。仿真了在相同的相位噪声情况下,连续光和脉冲光相干合成的时域特性,得到了结果如图 3 所示。图 3

(a)为脉冲激光波形,图 3(b)为相位噪声时域特性,图 3(c)为滤波前后性能评价函数时域特性,图 3(d)为连续激光相干合成得到的性能评价函数(上图)与滤波后的脉冲激光相干合成的性能评价函数(下图)的对比。从图 3(d)可知,在相同的噪声情况下,滤波后性能评价函数与连续激光相干合成的性能评价函数特性相同,计算结果表明,二者的相关性大于 99%。如果将这个滤波后的性能评价函数用于算法的寻优控制,能够实现有效的相位控制锁相。

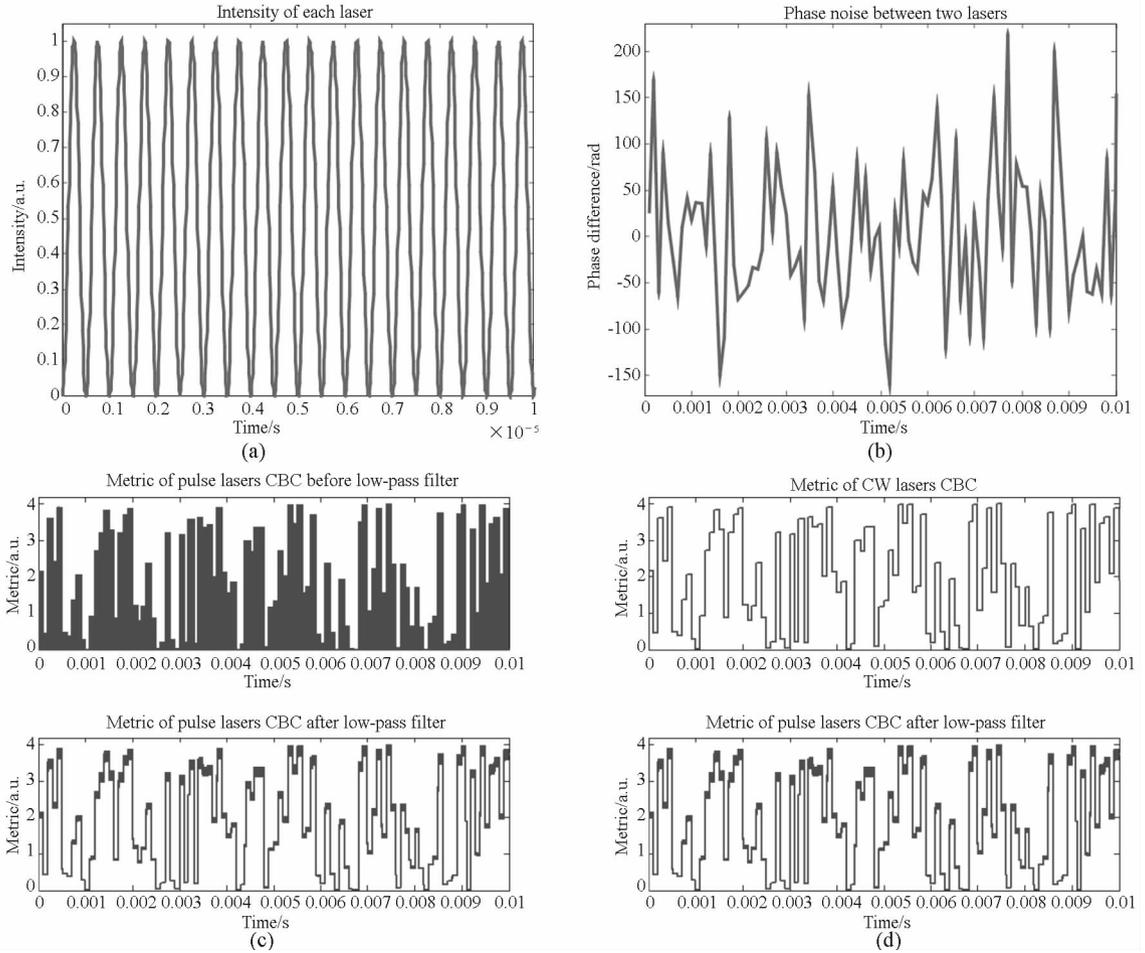


图 3 脉冲激光相干合成数值仿真

Fig. 3 Simulation results of coherent beam combining of pulsed laser

事实上,在脉冲激光相干合成中,除了实现有效的锁相外,为了得到较好的合成效果,还必须保证各路脉冲激光的时间同步性。脉冲同步要求各路激光的光程相等,这可以通过光纤切割焊接、空间光路调节进行初步调节,利用光纤延迟线进行精确调节。

2 两路脉冲激光相干合成实验

2.1 实验装置

基于 SPGD 算法的主动相位控制的两路脉冲激光相干合成实验结构如图 4 所示。单频种子光

(MO,输出功率 40mW,中心波长 1064.3nm,线宽小于 25kHz)经过隔离器(ISO,损耗约 0.5dB)后进入强度调制器(IM,损耗约 3.0dB)。函数发生器(FG)对强度调制器施加正弦调制信号,使得经过强度调制器后的激光为脉冲状态。分束器将脉冲激光分为两束,各束激光先经过相位调制器(PM,损耗约 3.0dB)后准直输出。经过上述各个器件后,各个准直器输出激光连续功率约为 4.5mW。与图 2 类似,输出光分为两束,分别用于观察相干合成效果和获取性能评价函数。探测器信号首先经过低通滤波器,然后进入算法控制器

中。通过算法控制器的极值寻优过程,实现两路脉冲激光的锁相。

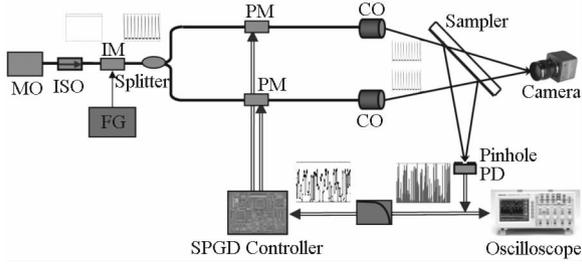


图 4 两路脉冲激光相干合成实验原理图
Fig. 4 Experimental setup of coherent beam combining of two channel pulsed fiber lasers

实验中,当施加在强度调制器上的正弦信号频率为 20kHz,幅度为 2.4V 时(如图 5(a)所示),得到了如图 5(b)所示的重复频率为 20kHz 脉冲激光输出,脉冲激光的脉宽约为 20 μs。脉冲光的平均功率为 18mW,考虑到脉冲的占空比为 50%,其峰值功率约为 36mW(为平均功率的两倍)。根据 Goodno 等^[19]的实验测量结果,高功率单频光学放大器中的相位噪声频率一般小于 1kHz。在我们的实验中,由于没有使用放大器,相位噪声频率小于 100Hz。因此,实验中设计截止频率为 1kHz 的低通滤波器,用于滤出高频(20kHz)的脉冲信号,而保留低频(小于 100Hz)相位噪声信号。

为了有效保证两路脉冲激光的同步特性,在实验中,我们通过光纤切割、熔接和空间光路调节等方式,将两路激光光程差控制在 0.05m 以下。考虑到脉冲激光的脉宽为 20 μs,那么两路激光的同步误差小于 8.3×10^{-6} ,两路脉冲激光基本重合,同步误差可以忽略。

2.2 实验结果

实验中,利用课题组开发的基于 DSP 的算法控制器执行 SPGD 算法,实现了两路脉冲激光的相干合成锁相控制。相干合成的效果分别利用性能评价函数(探测器探测到的干涉图样主瓣能

量)和长曝光干涉图样来表征。实验结果如图 6(a)所示,图中给出开环和闭环情况下滤波前的性能评价函数。图 6(a)中的前 22.5s 对应算法未执行时(开环)的性能评价函数的时域特性。开环时,由于相位噪声的存在,两路激光相位差随着时间变化,使得探测器所探测到的光强偏离理想值,性能评价函数(滤波前)均值较小(约为 38.8mV)。开环时对应的干涉图样长曝光图样条纹对比度为 0,对应非相干合成情况。当设置 SPGD 算法中参数 $\sigma = 0.1, \gamma = 0.3$,执行算法后,得到了较好的锁相结果,对应的性能评价函数如图 6(a)的后 22.5s 的曲线所示。相位锁定后主瓣能量较高,性能评价函数均值提高为 62.7mV。闭环时,其干涉图样长曝光图样条纹对比度为 0.43。如果以实际合成光束主瓣能量(实验中简化为小孔内性能评价函数值)与理想合成光束的主瓣能量之比来计算合成效率,实验中合成效率为 80%。实验中,还测量了合成中光强的时域波形,将图 4 中的探测器输出功率直接利用示波器测试,得到了合成的时域波形如图 6(b)所示。根据前面的分析可知,实验中同步误差较小(小于 8.3×10^{-6})。因此,合成光束的时域波形基本上与单个激光波形一致。

实验结果表明,当系统从闭环到开环时,系统性能评价函数均值提高到开环的 1.6 倍(从 38.8mV 提高到 62.7mV),干涉条纹长曝光对比度从 0 提高到 0.43。如果以性能评价函数提高 1.5 倍作为标准,可以认为实验能够实现有效的相干合成。由于受到种子功率和实验器件损伤阈值的限制,实验中相干合成的功率较低(平均功率 9mW,峰值功率 18mW),但是实验验证了该方案的可行性。通过增加合成脉冲激光路数,并在各路脉冲激光中引入多级功率放大器,能够得到更高的合成功率输出。

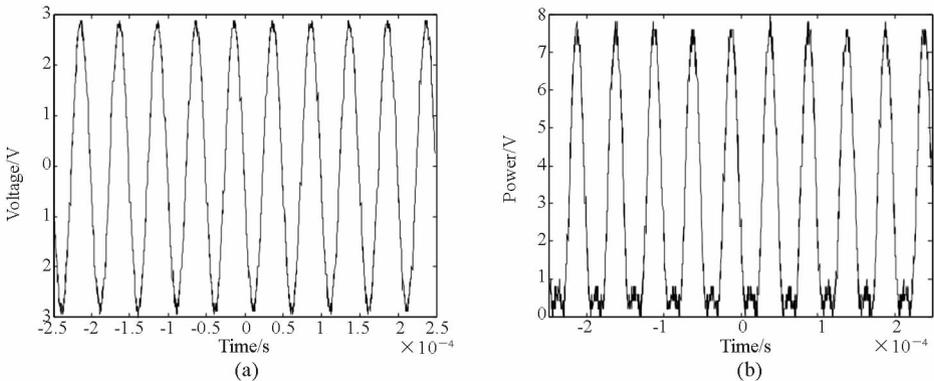
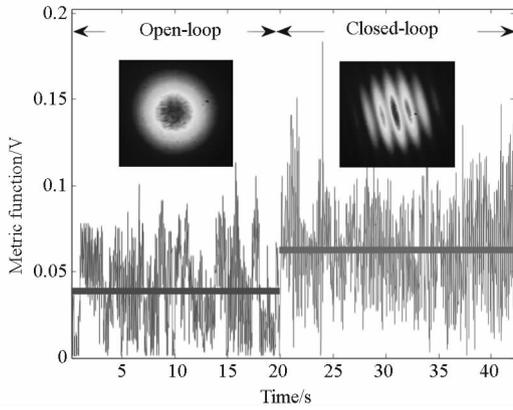
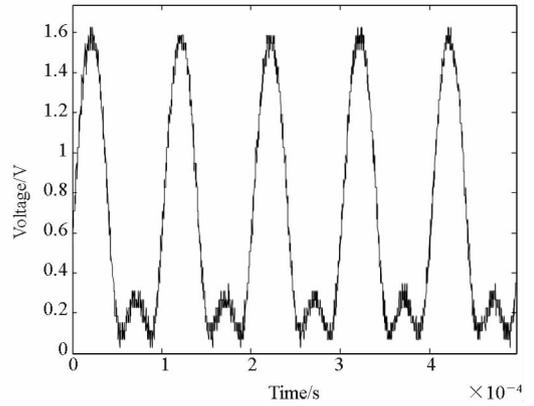


图 5 强度调制器施加信号(a)及得到的脉冲激光输出(b)
Fig. 5 Intensity modulation signal (a) and corresponding output pulsed laser (b)



(a) 性能评价函数与长曝光光斑

(a) Metric function and corresponding long exposure beam profile



(b) 合成脉冲时域特性

(b) Time domain characteristic of pulses

图 6 两路脉冲激光相干合成实验结果

Fig. 6 Experimental results for coherent beam combining of two pulsed laser

3 结 论

提出了基于 SPGD 算法的主动相位控制脉冲激光相干合成方案,利用低通滤波器滤除脉冲激光光强变化导致的性能评价函数起伏,提取出相位噪声导致的性能评价函数变化,然后将这个低通滤波后的性能评价函数用于 SPGD 算法的极值寻优过程,实现脉冲激光的锁相。进行了两路脉冲激光相干合成实验,较为有效地实现了脉冲激光相干合成。尽管实验中相干合成的功率较低,但是通过增加合成脉冲激光路数,并在各路脉冲激光中引入多级功率放大器,能够得到更高的合成功率输出。需要说明的是,在脉冲激光相干合成中,除了锁相控制外,各路脉冲激光的同步也是必须解决的关键问题。此外,为了有效提取相位噪声信息,还必须对低通滤波器进行精心设计。

参考文献 (References)

- [1] Kong F, Liu L, Sanders C, et al. Phase locking of nanosecond pulses in a passively Q-switched two-element fiber laser array[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(15): 151110 - 151111.
- [2] Andres M V, Cruz J L, Diez A, et al. Actively q-switched all-fiber lasers[J]. *Laser Physics Letters*, 2008, 5(2): 93 - 99.
- [3] Fermann M E, Hartl I. Fiber laser based hyperspectral sources[J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(1): 11 - 21.
- [4] Galvanauskas A. High power fiber lasers [J]. *Optics & Photonics News*, 2004, 15(7): 42 - 47.
- [5] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. *Optics Express*, 2004, 12: 6088 - 6092.
- [6] Goodno G D, Asman C P, Anderegg J, et al. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 460 - 472.
- [7] Jolivet V, Bourdon P, Bennai B, et al. Beam shaping of single-mode and multimode fiber amplifier arrays for propagation through atmospheric turbulence[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 257 - 268.
- [8] Zhou P, Wang X L, Ma Y X, et al. Stable coherent beam combination by active phasing a mutual injection-locked fiber laser array[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 950 - 952.
- [9] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, et al. Coherent beam combination of three two-tone fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2939 - 2941.
- [10] 周朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
ZHOU Pu. Study on coherent beam combination technology of fiber lasers [D], Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [11] Corcoarn C J, Durville F. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(20): 20118-1 - 20118-3.
- [12] Michaille L, Taylor D M, Bennett C R, et al. Characteristics of a q-switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(1): 4200 - 4202.
- [13] Wang X L, Zhou P, Ma H T, et al. Synchronization and coherent combining of two pulsed fiber ring lasers based on direct phase modulation[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(5): 54211 - 54212.
- [14] Stuart J M, Charles P A, Hagop I, et al. 100 - kW coherently combined Nd: YAG MOPA laser array [C]// *Frontiers in Optics*, Optical Society of America, 2009, paper FThD2.
- [15] Cheung E C, Weber M, Rice R R. Phase locking of a pulsed fiber amplifier [C]// *ASSAP*, Japan, 2008, paper WA2.
- [16] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, et al. Coherent beam combination of two-dimensional high power fiber amplifier array using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94: 231106 - 231108.
- [17] Vorontsov M A, Sivokon V P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction[J]. *Journal of Optics Society of America A*, 1998, 15(10): 2745 - 2758.
- [18] Vorontsov M A, Weyrauch T, Beresnev L A, et al. Adaptive array of phase-locked fiber collimators analysis and experimental demonstration [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 269 - 280.
- [19] Goodno G D, Book L D, Rothenberg J E. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. *Optics Letter*, 2009, 34(8): 1204 - 1206.