

# 光纤激光阵列占空比对相干合成效果影响分析

黄智蒙<sup>1,4</sup>, 唐 选<sup>2,4</sup>, 李晓峰<sup>3</sup>, 张大勇<sup>1,4</sup>, 王小军<sup>2,4</sup>, 李剑峰<sup>1,4</sup>, 刘仓理<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所 四川 绵阳 621900; 2. 北京应用物理与计算数学研究所 北京 海淀区 100094;  
3. 电子科技大学航空航天学院 成都 610054; 4. 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室 四川 绵阳 621900)

**【摘要】**根据弗琅和费衍射理论,建立了19路、37路和91路光纤激光相干合成模型,仿真模拟了不同占空比情况下,大阵列合成光束在远场的强度分布和光束质量,分析了占空比排布与合成路数对远场光束质量的影响。仿真结果表明,随着光纤阵列占空比的下降,远场艾里斑内的光强逐渐减小,合成效果变差;反之,远场艾里斑内的光强逐渐增大,合成光束远场能量集中度增强,光束质量变好。因此,提高相干合成的效果,必须提高光束阵列的占空比。

**关键词** 光束质量; 相干合成; 光纤激光; 占空比; 远场能量集中度

**中图分类号** TN248 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2015.06.026

## Analysis of Influence of Filling Ratio on Coherent Beam Combination of Fiber Laser Arrays

HUANG Zhi-meng<sup>1,4</sup>, TANG Xuan<sup>2,4</sup>, LI Xiao-feng<sup>3</sup>, ZHANG Da-yong<sup>1,4</sup>,  
WANG Xiao-jun<sup>2,4</sup>, LI Jian-feng<sup>1,4</sup>, and LIU Cang-li<sup>1</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics Mianyang Sichuan 621900;  
2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics Haidian Beijing 100094;  
3. School of Astronautics & Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;  
4. Key Lab. of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP Mianyang Sichuan 621900)

**Abstract** A model of coherent beam combination (CBC) of fiber laser with 19-channel, 37-channel and 91-channel is established according to Fraunhofer diffraction theory. The far-field intensity distribution and beam quality of a large-scale CBC with different duty ratios are simulated. The influences of filling ratio and the number of sub-beams on beam quality of CBC in the far-field are analyzed. Simulation results show that the far field intensity in the Airy spot decreases with the filling ratio of the fiber array decreased, which leads to the degradation of combination effect. On the contrary, the far field intensity in the Airy spot increases with the filling ratio of the fiber array increased and the beam quality of CBC will be better. In order to obtain a high efficiency of CBC, the filling ratio must be improved simultaneously.

**Key words** beam quality; coherent beam combination; fiber laser; filling ratio; power in the bucket (PIB)

由于热效应和非线性效应的限制,单台光纤激光器无法达到很高的输出能量或功率,并同时保持高的光束质量。而多台光纤激光器阵列的相干合成技术,能够实现高功率、高光束质量激光输出,因此成为国际上研究的热点<sup>[1-3]</sup>。

在光纤激光相干合成中,并联主振荡功率放大(MOPA)方案由于其相位控制的精确性和主动性,适用于大阵列的激光相干合成。该方案的关键是对光路相位进行探测与控制。目前,适用于光纤阵列相干合成的主动相位控制方法主要有外差法<sup>[4-6]</sup>、

SPGD算法<sup>[7-9]</sup>、频域多抖动法(MFD)<sup>[10]</sup>、时域单抖动法(SFD)<sup>[11]</sup>和多相位扰动法(MPD)<sup>[12-13]</sup>等。

光纤阵列激光排布的紧凑程度是影响远场能量集中度的一个重要因素。由于机械装配等因素的影响,各路光束排布不可能无限紧密。实验中如不重视占空比的影响,则可能导致中央主瓣内能量很少,能量集中度低,光束质量较差。本文分别建立了37路和91路光纤激光相干合成模型,仿真模拟了不同占空比情况下,大阵列合成光束在远场的强度分布和光束质量,分析了占空比排布与合成路数对远场

收稿日期: 2014-12-04; 修回日期: 2015-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(11504355)

作者简介: 黄智蒙(1982-),男,博士,主要从事光纤激光器及光束合成技术方面的研究。

光束质量的影响。仿真结果表明, 要提高相干合成的效果, 须提高阵列的占空比。数值模拟分析为大阵列光纤激光相干合成设计提供了参考依据。

## 1 理论模型

### 1.1 光束相干合成建模

对于本文所涉及的问题, 可以理解为在发射面对光束进行调制后, 光束在自由空间进行傍轴传播, 因此其传播过程可以由Fresnel衍射积分描述:

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint dx' dy' \mathbf{E}(x', y', 0, t) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} \quad (1)$$

式中,  $\lambda$ 为波长;  $k=2\pi/\lambda$ 为波数。对于所考虑的对象, 可以有以下假设: 1) 忽略子光束的纵向极化; 2) 子光束都是无色散的, 即 $\omega/k$ 等于常数; 3) 子光束的谱宽足够窄, 因此其不同频率分量具有相同的空间分布。那么对于多光束发射面的场可以表示为:

$$\mathbf{E}(x', y', 0, t) = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{e}}_{ij} \psi_{ij}(x', y', t; x'_i, y'_i) = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{e}}_{ij} u_{ij}(x', y'; x'_i, y'_i) \int d\omega \cdot e^{i\omega t} g_{ij}(\omega) \quad (2)$$

式中, 单位矢量 $\mathbf{e}_i$ 表示第 $i$ 束光的偏振方向;  $(x'_i, y'_i)$ 为第 $i$ 束光的质心位置;  $g_{ij}$ 为第 $i$ 束光第 $j$ 个偏振分量的光谱线形函数。因为自由空间传播不改变光束的偏振, 总可以将每束光的偏振分解到两个正交方向上分布描述其传播过程。因此式(1)可以写为:

$$u(x, y, z, \omega) = \frac{e^{ik(\omega)z}}{i\lambda z} \iint dx' dy' \exp\left\{\frac{ik(\omega)}{2z}[(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} \times \sum_{i=1}^N g_i(\omega) u_i(x, y; x'_i, y'_i) \quad (3)$$

输入参数包括: 子光束外半径 $r_0$ , 子光束发射孔径半径 $r$ , 激光波长(1.06  $\mu\text{m}$ ), 子光束个数、总发射孔径 $D$ 及子光束中心坐标。

### 1.2 合成效果评价标准

相干合成系统一般采用多孔径阵列输出, 而传统的光束质量因子主要针对单口径激光制定, 并不完全适用于合成系统, 因此有必要对合成光斑的光束质量和合成效果的评价标准进行讨论。常用光束质量评价函数主要有:  $M^2$ 因子、Strehl比、BQ因子、 $\beta$ 因子等。相干合成技术通过各光束的锁相控制在远场形成亮斑, 因此, 可以选择最能反映远场能量集中度的评价因子对合成效果进行衡量。

#### 1.2.1 $M^2$ 因子

$M^2$ 因子定义为实际光束光斑半径与远场发散角的乘积与理想基模高斯光束的相应乘积之比, 由于相干合成光束的远场不是高斯型分布, 采用 $M^2$ 因子作为评价标准不准确, 在特定条件下将得出合成光束质量将随着合成激光数目的增多而急剧下降的结论。而单元激光放大器不论采用超高斯光束、平顶高斯光束、平顶多高斯光束还有Li模型, 都将得到 $M^2$ 因子随着阶数 $N$ 递增的关系, 显然也不符合光强均匀分布的要求。因此, 对于合成系统, 其光束质量不宜用 $M^2$ 因子进行评价。

#### 1.2.2 Strehl比

Strehl比的定义为实际光束峰值功率与理想光束峰值功率的比值。即:

$$\text{SR} = \frac{\text{实际焦斑处峰值功率}}{\text{理想焦斑处峰值功率}} \quad (4)$$

Strehl比可以直观地反映激光在远场的峰值强度信息。Strehl比虽能够反映锁相效果, 但其大小仅取决于子孔径数目和相位控制残差, 无法反映合束发射系统中占空比等因素导致的远场能量集中度下降, 也不适于判断整个相干合成光束的作用效果。

#### 1.2.3 BQ因子

BQ因子是诺格公司在MLD系统中所用的光束质量评价因子, 其定义为:

$$\text{BQ} = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{DL}}}{\alpha}} = \sqrt{\frac{\int_{-D_x/2\lambda z}^{D_x/2\lambda z} \int_{-D_y/2\lambda z}^{D_y/2\lambda z} |E_{\text{DL}}|^2 df_x df_y}{\int_{-D_x/2\lambda z}^{D_x/2\lambda z} \int_{-D_y/2\lambda z}^{D_y/2\lambda z} |E|^2 df_x df_y}} \quad (5)$$

式中,  $\alpha_{\text{DL}}$ 是理想条件下远场发散角为 $\lambda/D$ 的衍射环内的桶中功率;  $\alpha$ 是实测相同大小区域内桶中功率。采用BQ因子能够综合反映系统的远场光斑集中度, 只需测量光斑强度分布就可用图像处理方法进行计算, 在实际应用中非常便利。因此, 本文将同样以BQ因子为主要的束质量评价标准。

#### 1.2.4 $\beta$ 因子

光束质量因子 $\beta$ 的定义为实际光束的远场发散角 $\theta_{\text{actual}}$ 与理想光束远场发散角 $\theta_{\text{ideal}}$ 的比值, 即:

$$\beta = \frac{\theta_{\text{actual}}}{\theta_{\text{ideal}}} \quad (6)$$

采用BQ因子、BPF因子和 $\beta$ 因子均能够反映相干合成系统远场光斑的能量集中度。

## 2 计算条件设置

### 2.1 19路六角形排布

19路子光束按照图1中的六角方式排列。图1中,

设子光束外半径 $r$ 与子光束发射孔径外半径 $r_0$ 相等,子光束外沿相切,设 $r=r_0=2\text{ cm}$ ,高斯光束束腰半径为 $1.8\text{ cm}$ 。另外,当子光束外半径 $r=2\text{ cm}$ ,子光束发射孔径半径 $r_0=1.4\text{ cm}$ ,高斯光束束腰半径为 $1.2\text{ cm}$ 时,19路光束六角排列的占空比下降为 $0.37$ 。

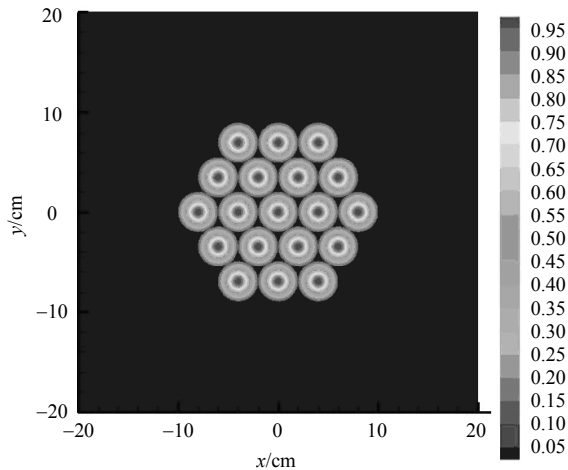


图1  $r/r_0=1.0$ (占空比 $0.76$ ),19子束无相差六角形排布的近场幅值

### 2.2 37路六角形排布

37路子光束按照图2中的六角方式排列,设子光束外半径 $r$ 与发射孔径外半径 $r_0$ 相等,子光束外沿相切,具有最大的占空比,设 $r=r_0=2\text{ cm}$ ,高斯光束束腰半径为 $1.8\text{ cm}$ 。另外,当子光束外半径 $r=2\text{ cm}$ ,子光束发射孔径半径 $r_0=1.4\text{ cm}$ ,高斯光束束腰半径为 $1.2\text{ cm}$ 时,37路光束六角排列的占空比下降为 $0.37$ 。

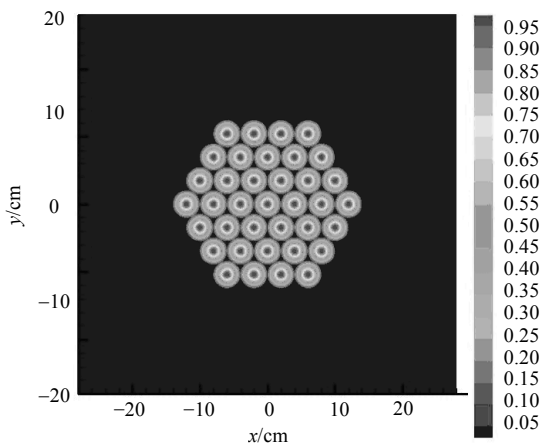


图2  $r/r_0=1.0$ (占空比 $0.76$ ),37子束无相差六角形排布的近场幅值

### 2.3 91路六角形排布

91路子光束按照图3中的六角方式排列。图3中,设子光束外半径 $r$ 与子光束发射孔径外半径 $r_0$ 相等,子光束外沿相切,具有最大的占空比,设 $r=r_0=2\text{ cm}$ ,高斯光束束腰半径为 $1.8\text{ cm}$ 。当子光束外半径 $r=2\text{ cm}$ ,

子光束发射孔径半径 $r_0=1.4\text{ cm}$ ,高斯光束束腰半径为 $1.2\text{ cm}$ 时,占空比下降为 $0.37$ 。

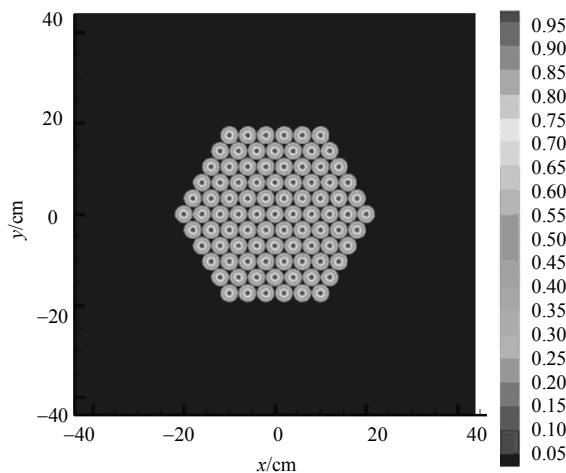


图3  $r/r_0=1.0$ (占空比 $0.75$ ),91子束无相差六角形排布的近场幅值

## 3 仿真结果与影响分析

阵列激光排布的紧凑程度是影响远场能量集中度的一个重要因素。由于机械装配等因素的影响,各路光束排布不可能无限紧密。实验中如不重视占空比的影响,则可能导致相干合成实验结果均为相位锁定的远场干涉条纹,中央主瓣内能量很少,能量集中度低,光束质量较差。相干合成系统的作用距离一般约为 $1\sim 10\text{ km}$ ,发射孔径为 $1\sim 60\text{ cm}$ ,其作用距离基本满足夫琅禾费近似条件。本文不考虑大气湍流,仅对系统光束质量进行分析,设光束合成系统传输距离即远场为 $10\text{ km}$ ,可以分别得到19束、37束和91束光束相干合成在远场处的光强分布。

### 3.1 19路六角形排布

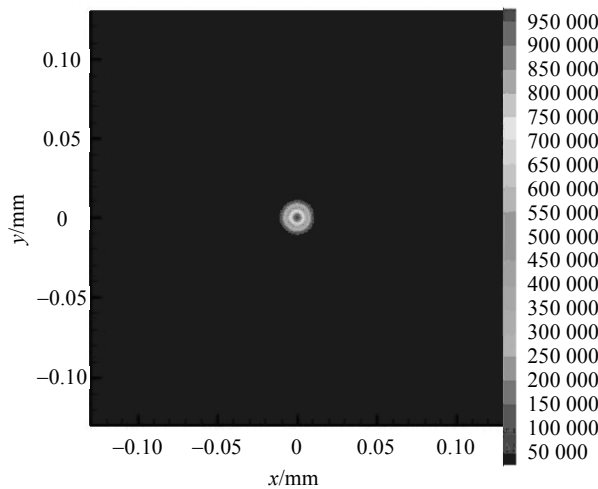


图4  $r/r_0=1.0$ (占空比 $0.76$ ),19子束无相差六角形排布的远场幅值

图4和图5给出了19束光纤激光相干合成的远场光斑图样。图4中,子束占空比为0.76,  $r/r_0=1.0$ 表示各子光束紧挨在一起按照六角形排布,但随着合成路数的增加,占空比略有下降。远场合成光束质量 $BQ=1.03$ ,艾里斑内能量约占总能量79.30%。

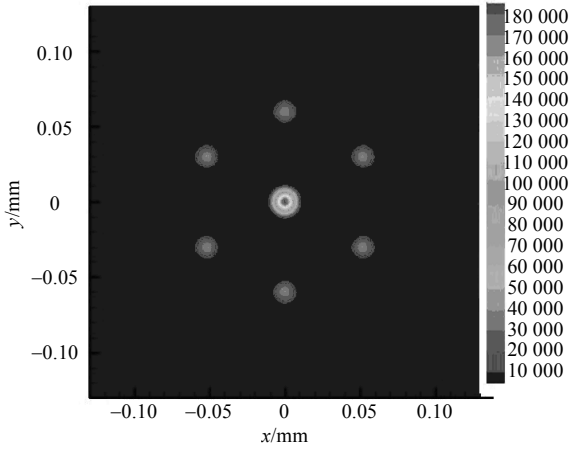


图5  $r/r_0 \approx 1.42$ (占空比0.37), 19子束无相差六角形排布的远场幅值

### 3.2 37路六角形排布

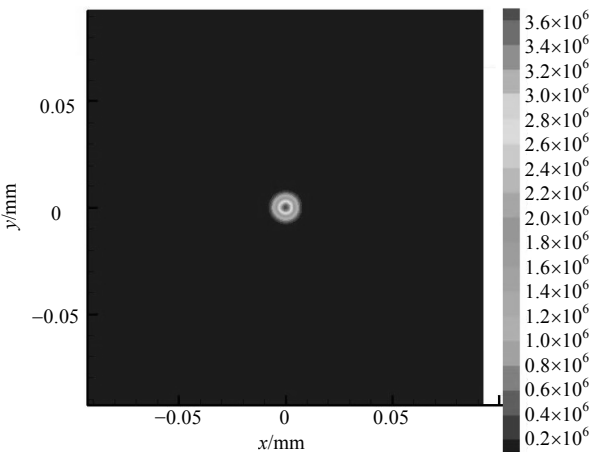


图6  $r/r_0=1.0$ (占空比0.76), 37子束无相差六角形排布的远场幅值

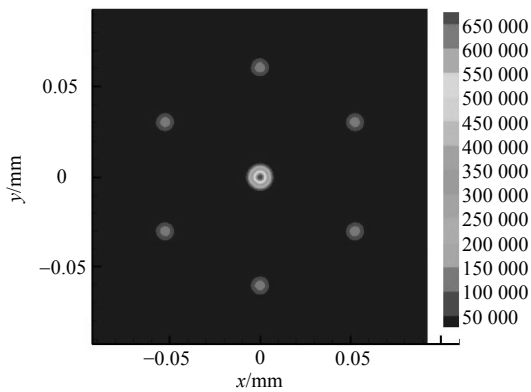


图7  $r/r_0 \approx 1.42$ (占空比0.37), 37子束无相差六角形排布的远场幅值

图6和图7给出了37束光纤激光相干合成的远场光斑图样。图6中,子束占空比为0.76,  $r/r_0=1.0$ 表示各子光束紧挨在一起按照六角形排布,但随着合成路数的增加,占空比略有下降。

远场合成光束质量 $BQ=1.02$ ,艾里斑内能量约占总能量80.70%。图7中,子束占空比为0.37,进一步下降,远场合成光束质量 $BQ=1.45$ ,艾里斑内能量约占总能量39.80%,能量集中度进一步下降。

### 3.3 91路六角形排布

图8和图9给出了91束光纤激光相干合成的远场光斑图样。在图8中,子束占空比为0.75,  $r/r_0=1.0$ 表示各子光束紧挨在一起按照六角形排布。但随着合成路数的增加,相比于37束时的密集拼接,占空比也略有下降。远场合成光束质量 $BQ=1.01$ ,艾里斑内能量约占总能量82.60%。在图9中,子束占空比为0.37,占空比进一步下降,远场合成光束质量 $BQ=1.35$ ,艾里斑内能量约占总能量46.20%,能量集中度进一步下降。和37束合成类似,占空比越大,阵列排布越紧凑,光束质量越好。

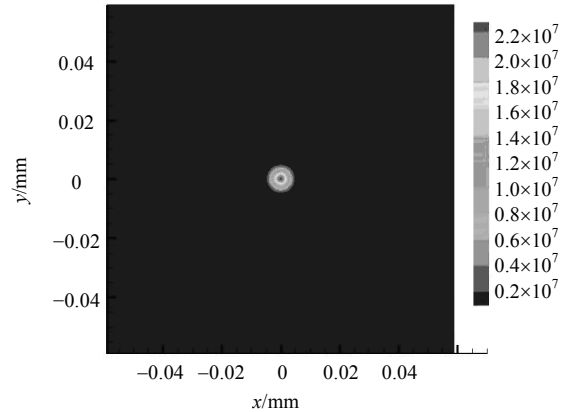


图8  $r/r_0=1.0$ (占空比0.76), 91子束无相差六角形排布的远场幅值

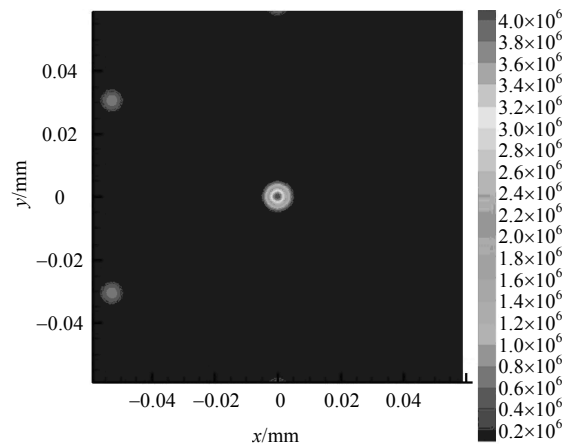


图9  $r/r_0 \approx 1.42$ (占空比0.37), 91子束无相差六角形排布远场幅值

## 4 结 论

本文根据大阵列光纤激光相干合成模型, 仿真分析了不同的光纤阵列填充比随着合成路数增加对相干合成远场能量集中度和光束质量的重要影响。仿真结果表明占空比越大, 阵列排布越紧凑, 光束质量越好, 能量集中度越高。因此要想提高大阵列光纤激光相干合成的效果, 必须设法提高光纤阵列的孔径填充比。

### 参 考 文 献

- [1] MOUROU G, BROCKLESBY B, TAJIMA T, et al. The future is fibre accelerators[J]. *Nature Photonics*, 2013(7): 258-261.
- [2] VORONTSOV M A, WEYEAUCH T, BERESNEV L A, et al. Adaptive array of phase-locked fiber collimators: Analysis and experimental demonstration[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(2): 269-280.
- [3] HE Bing, LOU Qi-hong, WANG Wei, et al. Experimental demonstration of phase locking of a two-dimensional fiber laser array using a self-imaging resonator[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 251115-1-251115-3.
- [4] AUGST S J, FAN T Y, SANCHEZ A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(5): 474-476.
- [5] 黄智蒙, 骆永全, 张大勇, 等. 基于液晶光调制器的激光相干合成主动相位控制[J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1713-1716.  
HUANG Zhi-meng, LUO Yong-quan, ZHANG Da-yong, et al. Active phase control in laser coherent combination based on liquid crystal optical modulator[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(7): 1713-1716.
- [6] HUANG Zhi-meng, ZHANG Da-yong, LUO Yong-quan, et al. A new configuration for phase control in laser coherent combination utilizing liquid crystal optical modulator[J]. *Appl Phys B*, 2010, 101(3): 559-563.
- [7] GENG Chao, LUO Wen, TAN Yi, et al. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control[J]. *Opt Express*, 2013, 21(21): 25045-25055.
- [8] HUANG Zhi-meng, LIU Cang-li, LI Jian-feng, et al. A high-speed high-efficiency phase controller for coherent beam combining based on SPGD algorithm[J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(4): 301-305.
- [9] 黄智蒙, 唐选, 刘仓理, 等. 变增益随机并行梯度下降算法及其在相干合成中的应用[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0402004-1-0402004-11.  
HUANG Zhi-meng, TANG Xuan, LIU Cang-li, et al. Stochastic parallel gradient descent algorithm with a variable gain coefficient and its application in coherent beam combining[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0402004-1-0402004-11.
- [10] JOLIVET V, BOURDON P, BENNAI B, et al. Beam shaping of single-mode and multimode fiber amplifiers array for propagation through atmosphere turbulence[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(2): 257-268.
- [11] MA Yan-xing, WANG Xiao-lin, LENG Jin-yong, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(6): 951-953.
- [12] HUANG Zhi-meng, TANG Xuan, WANG Xiao-jun, et al. Phase locking of slab laser amplifiers via square wave dithering algorithm[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(10): 2163-2169.
- [13] 黄智蒙. 光纤激光主动相位与偏振自适应控制技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2014.  
HUANG Zhi-meng. Research on active phase locking and adaptive polarization control technology of fiber lasers[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2014.

编辑 漆蓉