

# 基于自适应桶中功率评价函数的光纤放大器 相干合成实验研究\*

耿超<sup>1)2)</sup> 罗文<sup>1)2)</sup> 谭毅<sup>1)2)</sup> 刘红梅<sup>1)2)</sup> 牟进博<sup>1)2)</sup> 李新阳<sup>1)2)†</sup>

1) (中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

2) (中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2013年6月20日收到; 2013年8月12日收到修改稿)

光纤激光光束合成技术被公认为是实现高亮度、高光束质量激光束的优秀方法, 而激光阵列间的倾斜像差是影响合成效果的重要因素. 针对当前光束合成中存在的倾斜校正量受限问题, 提出了基于自适应桶中功率 (PIB) 评价函数的倾斜控制策略. 搭建了两路 2 W 光纤放大器的相干合成实验平台, 利用自制的压电环光纤相位调制器和自适应光纤准直器分别实现锁相和倾斜像差校正, 验证了基于自适应 PIB 的倾斜控制策略的可行性, 并实现了相干合成.

**关键词:** 光纤激光阵列, 倾斜控制, 自适应桶中功率, 相干合成

**PACS:** 42.25.Kb, 42.55.Wd, 42.90.+m

**DOI:** 10.7498/aps.62.224202

## 1 引言

光纤激光光束合成技术<sup>[1-20]</sup>(包括相干合成、光谱合成和非相干合成)已被公认为是实现高亮度、高光束质量激光束的有效途径, 在激光大气传输、激光自由空间通信、激光雷达等领域有着广阔的应用前景. 2011年, 美国林肯实验室报道了八路光纤放大器的相干合成, 实现了 4 kW 的光功率输出<sup>[6]</sup>. 同年, 德国耶拿大学报道了总输出功率为 8.2 kW 的四路光纤放大器光谱合成<sup>[7]</sup>. 在国内, 国防科学技术大学于 2011 年实现了总功率为 1.14 kW 的九路光纤放大器相干合成<sup>[8]</sup>. 2013 年, 中国科学院光电技术研究所与中国科学院西安光学精密机械研究所共同报道了总功率为 1.5 kW 的四路光纤放大器非相干合成<sup>[9]</sup>, 实验中利用自适应光纤准直器<sup>[9-13]</sup>实现了对阵列光束出射方向的高精度控制. 近年来的科研成果表明, 激光阵列间的倾斜像差是影响光束合成效果的重要因素<sup>[9-17]</sup>,

在光束合成系统中引入倾斜控制是实现高精度、高稳定性光束合成的必然趋势.

导致激光阵列光轴指向误差的因素包括机械装调误差、大气湍流效应、热载荷的影响以及平台抖动等. 目前, 光束合成中的倾斜控制策略主要分为两类. 一类是基于 Hartmann-Shack 波前传感器<sup>[17]</sup>, 由传感器精确测得每路光束的倾斜像差并通过校正器进行补偿. 该方法的校正速率快, 但是系统复杂, 子光束必须与相应的微透镜对应, 能实现的倾斜校正量有限, 且无法与目标在回路 (TIL) 技术<sup>[18-20]</sup>结合. 另一类是基于以随机并行梯度下降 (SPGD) 算法<sup>[8-13]</sup>为代表的盲优化算法, 通常以远场光斑的桶中功率 (PIB) 作为评价函数, 使 PIB 最大化, 从而间接地校正了激光阵列间的倾斜像差. 该方法简单易行, 能够与 TIL 技术结合, 实现对大气湍流效应等因素的补偿, 但是校正速率较慢 (与倾斜像差的特性以及合成路数有关), 且当远场合成光斑相对于目标点的发散角超出 PIB 的“圆桶”区域时, 无法实现稳定的闭环<sup>[20]</sup>. 因此, 当

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61205069, 61138007) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xyli@ioe.ac.cn

前的光束合成技术中都存在着倾斜校正量受限的问题<sup>[9-13,17,19]</sup>.

本文提出了基于自适应 PIB 评价函数的倾斜控制策略. 根据远场合成光斑发散角的变化, 自适应地调节 PIB 的“圆桶”区域, 使其能始终“覆盖”合成光斑, 并以自适应 PIB 作为盲优化算法的评价函数, 有效地解决了当前光束合成技术中倾斜控制策略的局限性. 搭建了两路 2 W 光纤放大器的相干合成实验平台, 利用自制的压电环光纤相位调制器和自适应光纤准直器分别实现锁相和倾斜像差校正, 验证基于自适应 PIB 的倾斜控制策略的可行性, 并实现相干合成. 为在多单元、高功率的光纤激光光束合成系统中实现大范围、高精度、高稳定性的倾斜控制提供了参考.

## 2 研究方案

在实验室环境搭建了两路 2 W 光纤放大器的相干合成实验平台, 如图 1 所示. 1064 nm 种子光源的光功率为 11 mW, 线宽约为 20 kHz. 光功率经光纤预放大器提升为 200 mW, 通过  $1 \times 8$  光纤分束

器分为八路. 选取其中的两路分别连接至压电环光纤相位调制器、光纤主放大器和自适应光纤准直器后, 激光束准直输出. 压电环光纤相位调制器和自适应光纤准直器分别用于实现相位锁定和倾斜像差校正. 两路准直激光束由焦距 1.5 m 的合束透镜合束, 分别经过折叠式反射镜、分光棱镜 1 和分光棱镜 2 后, 到达光电探测器、CMOS 相机 1 和 CMOS 相机 2. 光电探测器前带有直径  $30 \mu\text{m}$  的针孔 (对应于理想情况下远场合成光斑中心主瓣宽度的  $1/2$ ); CMOS 相机 2 前放置了一个十倍的显微物镜. 光电探测器的电信号传输至锁相控制平台, 控制压电环相位调制器实现锁相. CMOS 相机 1 采集的图像信息经倾斜控制平台处理后, 控制自适应光纤准直器实现倾斜像差校正. 利用 CMOS 相机 2 观察并记录远场合成光斑. 实验中, 选择 SPGD 算法来优化锁相和倾斜控制过程中的评价函数. 锁相控制以透过针孔到达光电探测器的光强为评价函数, 相当于 PIB, 此处“圆桶”区域固定不变; 倾斜控制以自适应 PIB 作为评价函数, 此处“圆桶”区域将自适应地随远场合成光斑发散角的变化而改变.

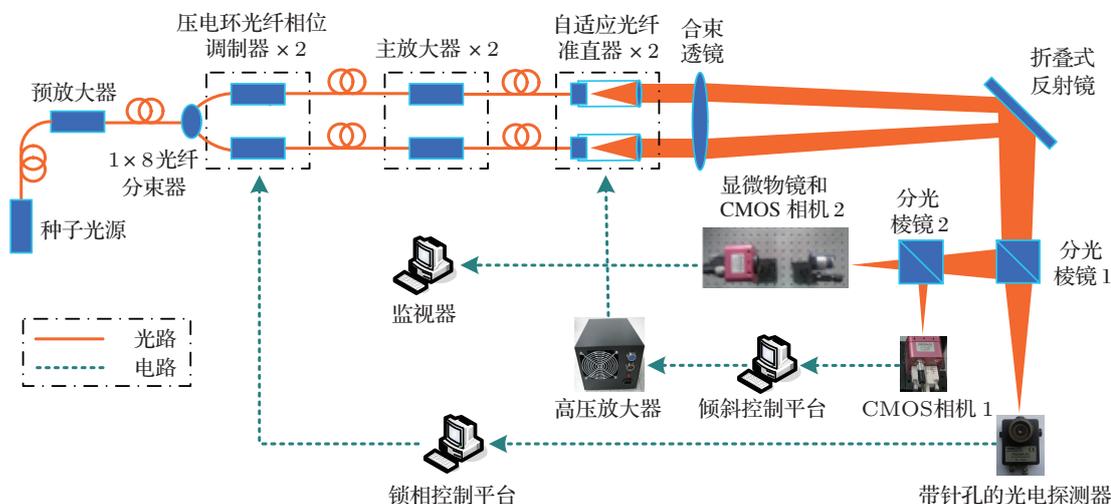


图 1 实验装置示意图

本文提到的像差校正器件——压电环光纤相位调制器<sup>[21]</sup>和自适应光纤准直器为自行研制, 其结构如图 2 所示. 利用文献 [22] 中提出的相位调制器性能参数测量方法测得压电环相位调制器的半波电压为 3.1 V, 响应带宽约为 90 kHz. 自适应光纤准直器的出射准直光束口径约为 28 mm, 而相邻光束中心距为 42 mm, 可算得阵列光束的填充因子约

为 0.67. 对自适应光纤准直器的驱动电压 - 准直光束偏转角特性进行了测试, 结果如图 3(a) 所示. 在  $\pm 400 \text{ V}$  电压下, 实现了  $\pm 0.5 \text{ mrad}$  的光束偏转量. 自适应光纤准直器的频率响应特性曲线如图 3(b) 所示. 由于采取了减振措施<sup>[23]</sup>, 器件的第一阶谐振频率达到了 1.85 kHz, 相比于之前的工作<sup>[11-13]</sup>提升了 1 倍.

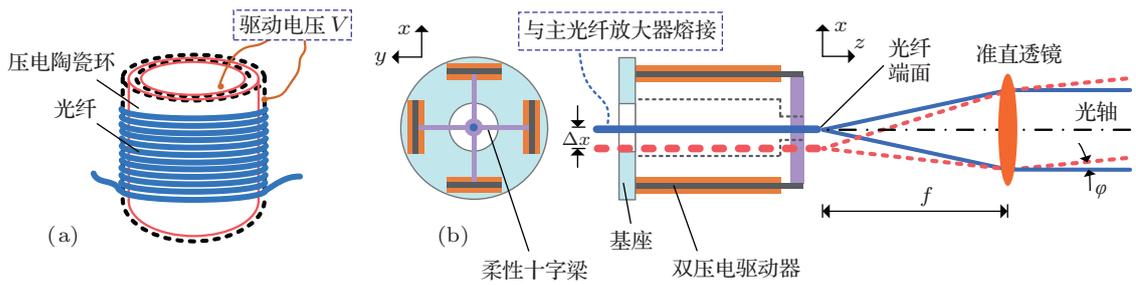


图2 压电环光纤相位调制器和自适应光纤准直器结构示意图 (a) 压电环光纤相位调制器; (b) 自适应光纤准直器

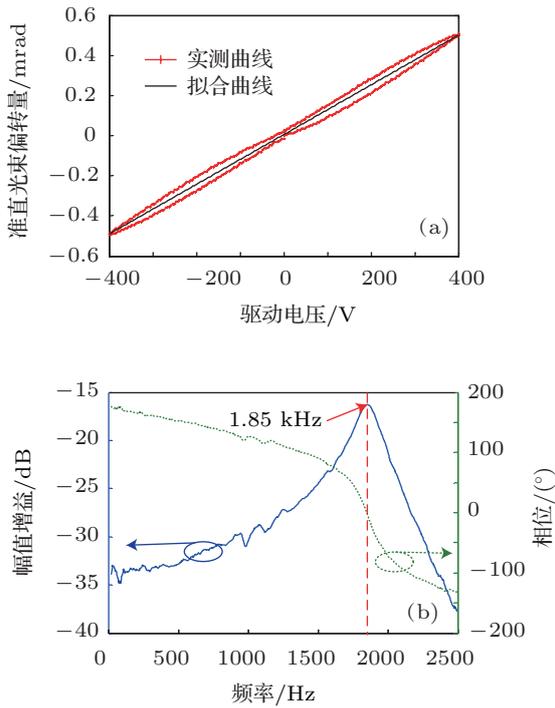


图3 自适应光纤准直器的性能测试曲线 (a) 驱动电压 - 准直光束偏转角特性曲线; (b) 频率响应特性曲线

### 3 基于自适应 PIB 评价函数的倾斜控制

为了验证基于自适应 PIB 评价函数的倾斜控制策略的可行性, 先进行了两路准直光束的倾斜控制实验研究, 这里选择 SPGD 算法来优化评价函数. 传统的基于固定 PIB 的 SPGD 倾斜控制策略可表述如下.

**步骤 1** 随机生成一组均值为零、呈伯努利分布的微小电压扰动  $\Delta U$ .

**步骤 2** 将电压控制信号  $U + \Delta U$  作用于校正器阵列, 相机采集一帧远场光斑图像, 计算 PIB 值并赋给  $J_+$ ; 再将电压控制信号  $U - \Delta U$  作用于校正器阵列, 采集图像计算 PIB 值并赋给  $J_-$ .

**步骤 3** 将控制电压信号更新为  $U = U +$

$\gamma \Delta U (J_+ - J_-) / 2$ , 其中  $\gamma$  为 SPGD 算法的增益系数.

**步骤 4** 回到步骤 1 并进入下一次算法迭代.

本文提出的基于自适应 PIB 的 SPGD 倾斜控制策略可由图 4 表述, 其特征在于“圆桶”区域将自适应地随远场合成光斑发散角的变化而改变, 其中步骤五为基于固定 PIB 的 SPGD 倾斜控制 (如上所述).

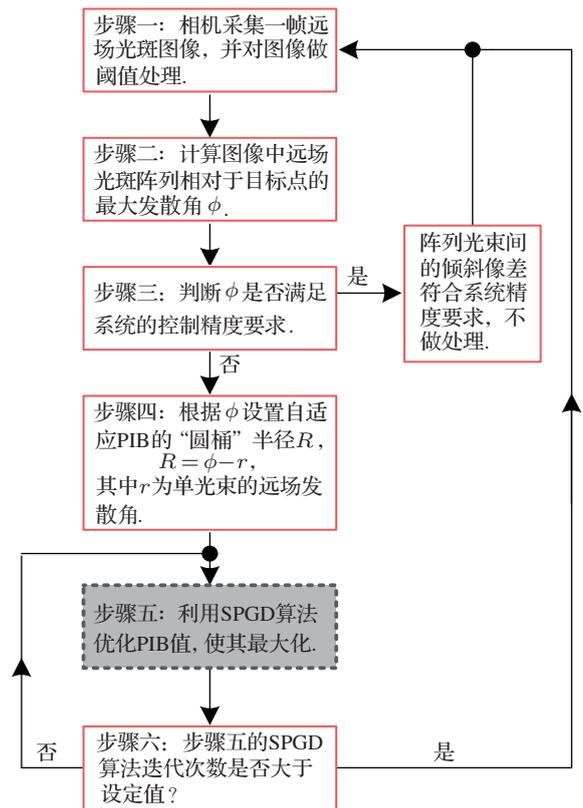


图4 基于自适应 PIB 评价函数的 SPGD 倾斜控制策略流程图

利用基于自适应 PIB 的倾斜控制策略校正了两路准直光束间的倾斜像差, 自适应 PIB 的“圆桶”半径以及合成光斑相对于目标点的最大发散角的迭代过程如图 5 所示. 图 5 中 CMOS 相机 1 的图像阈值设置为 50 (灰度值范围从 0 到 255), 目标

点为图像中心, 图 4 中的步骤五需完成 12 次算法迭代, 算法迭代速率约为 500 Hz. 由图 5 可知, 开环时远场合成光斑相对于目标点的最大发散角约为 238  $\mu\text{rad}$ ; 经过 25 轮自适应 PIB 迭代后减小至 122  $\mu\text{rad}$ ; 经 35 轮自适应 PIB 迭代后减小为 79  $\mu\text{rad}$ , 随后保持稳定, 实现了倾斜像差的校正. 图 6(a)—(c) 分别对应由 CMOS 相机 1 采集的开环时、校正中和闭环后远场合成光斑的单帧图像. 其中, 实线圆环对应于固定 PIB 的范围, 一般选取为单光束远场艾里斑的大小 [20], 本实验中约为 93  $\mu\text{rad}$ ; 点划线圆环为自适应 PIB 的范围; 点划线圆环为合成光斑的范围. 如图 6(a) 所示, 开环时两合成光斑都分布于固定 PIB 的范围之外; 在图 6(c) 中, 自适应 PIB 与固定 PIB 的范围重合, 说明基于自适应 PIB 的倾斜控制策略与基于固定 PIB 的倾斜控制策略是相互关联并统一的. 图 7 显示了闭环过程中自适应 PIB 和固定 PIB 区域内评价函数随时间的变化情况 (利用此组实验数据中的最大值将评价函数归一化), 其中计算评价函数时没有对图像进行阈值处理.

为了对比研究, 利用基于固定 PIB 的倾斜控制策略进行倾斜校正实验, 其中固定 PIB 的“圆桶”大小约为 93  $\mu\text{rad}$ , 开环时远场合成光斑相对于目标点的最大发散角约为 238  $\mu\text{rad}$ . 图 8 显示了两种倾斜控制策略下评价函数的迭代曲线 (评价函数已被此组实验数据中的最大值归一化). 由图 8 可知, 当合成光斑的最大发散角远远超出固定 PIB 的区域时, 基于固定 PIB 的倾斜控制策略是无法实现闭环的, 该结论与文献 [20] 一致.

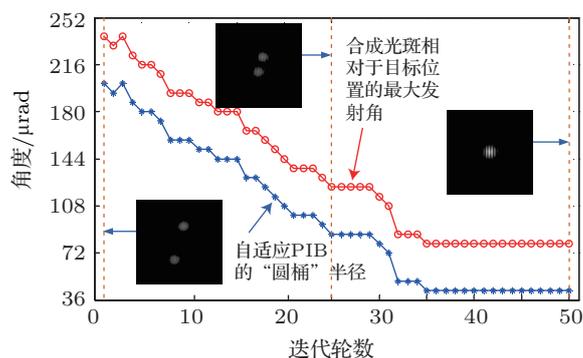


图 5 自适应 PIB 的“圆桶”半径以及合成光斑相对于目标点的最大发散角的迭代曲线, 内插图为相应的远场光斑

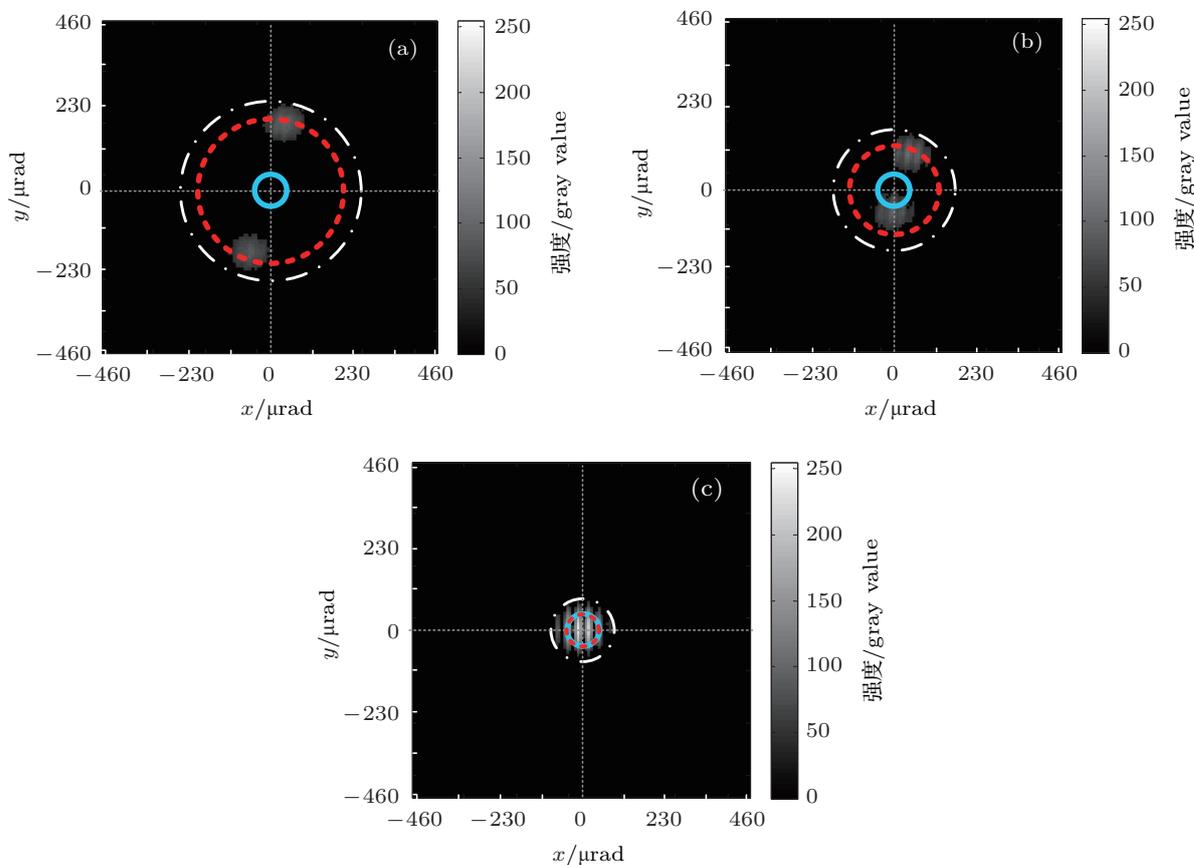


图 6 CMOS 相机 1 采集的单帧图像 (a) 开环时; (b) 校正中; (c) 闭环后; 实线圆环为固定 PIB 的范围; 点划线圆环为自适应 PIB 的范围; 点划线圆环为合成光斑的范围

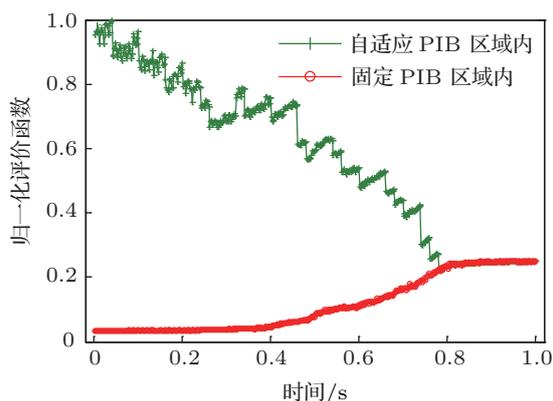


图7 基于自适应 PIB 的倾斜控制过程中两种归一化评价函数的迭代曲线

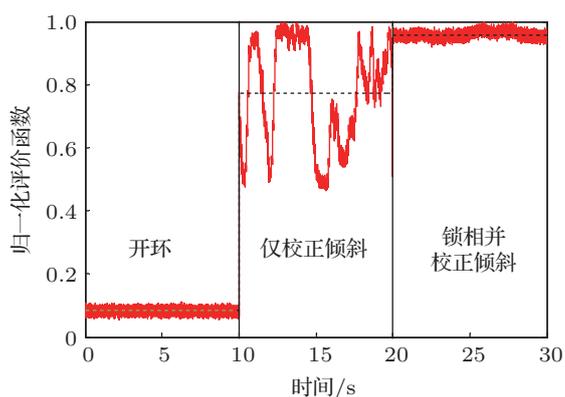


图9 由光电探测器采集的归一化 PIB 评价函数迭代曲线

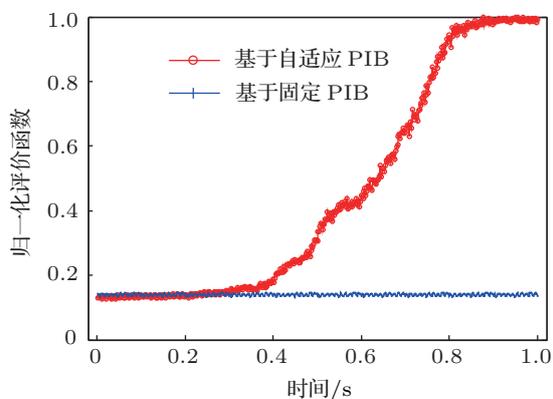


图8 两种倾斜控制策略下固定 PIB 区域内归一化评价函数的迭代曲线

#### 4 相干合成

实验研究了两路 2 W 光纤放大器的相干合成, 实现了对阵列光束间的平移与倾斜像差的同时校正. 图 9 为实验中由光电探测器采集的归一化 PIB 评价函数迭代曲线. 开环时, 评价函数的均值为 0.08, 均方误差 (MSE) 为 0.003. 仅校正倾斜后, 评价函数的均值提升至 0.77, 但评价函数剧烈振荡, MSE 为 0.166, 是开环时的 55 倍. 同时锁相并校正倾斜后, 评价函数均值达到了 0.96, MSE 降低到了 0.018. 图 10 为由 CMOS 相机 2 采集的远场光斑长曝光图. 图 10(a) 为开环时的情形, 两合成光斑离目标位置较远. 图 10(b) 为仅校正倾斜像差的情形, 此时两合成光斑的指向误差被校正, 但由于未锁相, 条纹对比度几乎为零. 由闭环时自适应光纤准直器的驱动电压可推算出两合成光斑相对于目标位置的指向误差绝对值分别为 403 和 196  $\mu\text{rad}$ . 图 10(c) 为锁相并校正倾斜的情形, 此时合成光斑的条纹清晰可见, 实现了相干合成. 需要指出的是, 图 10(a),

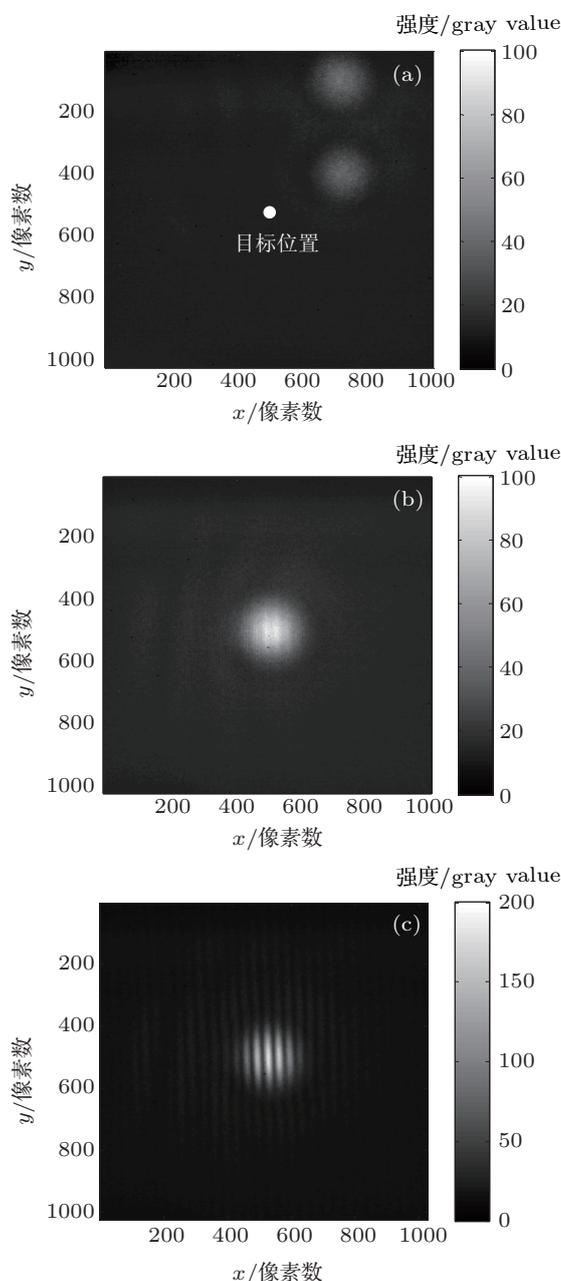


图10 远场光斑的长曝光图 (a) 开环; (b) 仅校正倾斜; (c) 锁相并校正倾斜

(b) 和 (c) 中灰度条的光强最大值分别为 100, 100 和 200. 对图 9 中仅校正倾斜时以及锁相并校正倾斜时的评价函数做频谱分析, 所得结果如图 11 所示. 由图 11 可知, 20 Hz 内的大幅度相位噪声得到了有效补偿, 在 1 kHz 范围内的噪声都有所缓解.

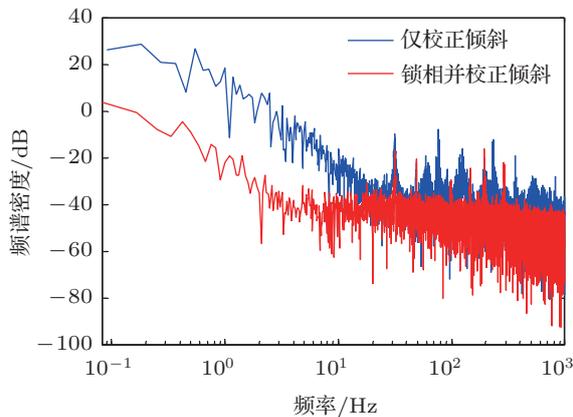


图 11 锁相前后评价函数的频谱分析

## 5 结论

针对当前光束合成技术中存在的倾斜校正量受限问题, 提出了基于自适应 PIB 评价函数的倾斜控制策略. 利用两路 2 W 光纤放大器相干合成实验平台验证了基于自适应 PIB 的倾斜控制策略的可行性, 实验中远场合成光斑相对于目标点的最大发散角从开环时的 238  $\mu\text{rad}$  减小至闭环时的 79  $\mu\text{rad}$ . 实验结果表明, 对于传统的 PIB 倾斜控制策略, 当合成光斑超出 PIB 范围时是无法闭环的, 而自适应 PIB 倾斜控制策略的倾斜校正量仅受限于校正器的动态性能以及远场成像相机的探测范围. 利用自制的压电环光纤相位调制器和自适应光纤准直器实现了对阵列光束间的平移和倾斜像差的同时校正, 验证了基于自适应 PIB 的倾斜控制策略在相干合成中的可行性. 今后, 将在更多单元、更高功率的光纤激光光束合成系统展开相关技术的实验研究.

- [1] Fan T Y 2005 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **11** 567
- [2] Wang J M, Duan K L, Wang Y S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5627 (in Chinese) [王建国, 段开棕, 王屹山 2008 物理学报 **57** 5627]
- [3] Yang R F, Yang P, Shen F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8297 (in Chinese) [杨若夫, 杨平, 沈锋 2009 物理学报 **58** 8297]
- [4] Lian T H, Wang S Y, Guo Z, Li B B, Cai D F, Wen J G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 124208 (in Chinese) [连天虹, 王石语, 过振, 李兵斌, 蔡德芳, 文建国 2011 物理学报 **60** 124208]
- [5] Wang X L, Ma Y X, Zhou P, He B, Xue Y H, Liu C, Li Z, Xiao H, Xu X J, Zhou J, Liu Z J, Zhao Y J 2011 *Chin. Phys. B* **20** 114203
- [6] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, Goldizen K C, Murphy D V, Sanchez A, Fan T Y 2011 *Opt. Lett.* **36** 2686
- [7] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, Schreiber T, Eberhardt R, Limpert J, Tunnermann A, Ludewigt K, Gowin M, Have E, Jung M 2011 *Opt. Lett.* **36** 3118
- [8] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Leng J Y, Xu X J, Liu Z J 2011 *Opt. Lett.* **36** 3121
- [9] Geng C, Zhao B Y, Zhang E T, Luo W, Tan Y, Zhu Y G, Yang H N, Mu J B, Li X Y, Duan K L, Zhao W 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 1286
- [10] Vorontsov M, Weyrauch T, Beresnev L, Carhart G, Liu L, Aschenbach K 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** 269
- [11] Geng C, Li X Y, Zhang X J, Rao C H 2011 *Opt. Commun.* **284** 5531
- [12] Geng C, Tan Y, Mu J B, Li X Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024206 (in Chinese) [耿超, 谭毅, 牟进博, 李新阳 2013 物理学报 **62** 024206]
- [13] Wang X, Wang X L, Zhou P, Su R T, Geng C, Li X Y, Xu X J, Shu B H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 024206
- [14] Lachinova S, Vorontsov M 2008 *J. Opt. Soc. Am. A* **25** 1960
- [15] Geng C, Li X Y, Zhang X J, Rao C H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 114202 (in Chinese) [耿超, 李新阳, 张小军, 饶长辉 2011 物理学报 **60** 114202]
- [16] Goodno G D, Weiss S B 2012 *Opt. Express* **20** 14945
- [17] Wang X H, Fu Q, Shen F, Rao C H 2012 *Opt. Express* **20** 4663
- [18] Bourdon P, Jolivet V, Bennai B, Lombard L, Goulard D, Canat G, Vasseur O 2009 *Proc. SPIE* **7195** 719527
- [19] Weyrauch T, Vorontsov M, Carhart G, Beresnev L, Rostov A, Polnau E, Liu J 2011 *Opt. Lett.* **36** 4455
- [20] Geng C, Li X Y, Zhang X J, Rao C H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034204 (in Chinese) [耿超, 李新阳, 张小军, 饶长辉 2012 物理学报 **61** 034204]
- [21] Luo W, Geng C, Li X Y 2012 *High Power Laser Part. Beams* **24** 1641 (in Chinese) [罗文, 耿超, 李新阳 2012 强激光与粒子束 **24** 1641]
- [22] Tan Y, Geng C, Luo W, Liu H M, Wu Y Y, Li X Y 2012 *Chinese Patent* 201210485286.8 (in Chinese) [谭毅, 耿超, 罗文, 刘红梅, 武云云, 李新阳 2012 中国专利 201210485286.8]
- [23] Geng C, Luo W, Li X Y, Tan Y, Wu Y Y, Liu H M, Mu J B 2013 *Chinese Patent* 201310161222.7 (in Chinese) [耿超, 罗文, 李新阳, 谭毅, 武云云, 刘红梅, 牟进博 2013 中国专利 201310161222.7]

# Experimental study on coherent beam combination of fiber amplifiers using adaptive power-in-the-bucket cost function\*

Geng Chao<sup>1)2)</sup> Luo Wen<sup>1)2)</sup> Tan Yi<sup>1)2)</sup> Liu Hong-Mei<sup>1)2)</sup> Mu Jin-Bo<sup>1)2)</sup>  
Li Xin-Yang<sup>1)2)</sup>†

1) (Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

2) (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(Received 20 June 2013; revised manuscript received 12 August 2013)

## Abstract

Beam combination (BC) of fiber amplifiers based on master-oscillator-power-amplifier configuration is an outstanding way to generate high power and high beam quality laser output, where the tip/tilt aberrations among beamlets are considered as a serious influence factor to BC effects. In this paper, a new tip/tilt control method based on adaptive power-in-the-bucket (PIB) cost function is proposed to solve the problem of restricted tip/tilt correcting value in current BC systems. Experimental setup of coherent BC of two-channel 2 W fiber amplifier array is established. Home-made piezoelectric-ring fiber-optic phase-modulator and adaptive fiber-optics collimator are employed to correct piston- and tip/tilt-type aberrations, respectively. The feasibility of proposed tip/tilt control method using adaptive-PIB is demonstrated and nice effect of coherent BC is achieved.

**Keywords:** fiber laser array, tip/tilt control, adaptive power-in-the-bucket, coherent beam combining

**PACS:** 42.25.Kb, 42.55.Wd, 42.90.+m

**DOI:** 10.7498/aps.62.224202

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61205069, 61138007).

† Corresponding author. E-mail: xyli@ioe.ac.cn