

多单元光纤激光阵列的倾斜控制实验研究*

耿超† 谭毅 牟进博 李新阳

(中国科学院光电技术研究所自适应光学研究室, 中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

(2012 年 5 月 31 日收到; 2012 年 7 月 20 日收到修改稿)

本文结合光纤激光阵列技术的发展趋势, 介绍一种基于大模场面积光纤的自适应光纤光源准直器的研制进展, 搭建七单元光纤激光阵列, 进行平行发射体系下阵列间的倾斜控制实验, 并初步探索了基于目标在回路的共形发射体系下阵列间的倾斜控制. 最后, 在三级全光纤放大链路的主振荡-功率放大系统中, 完成了两路 10 W 量级光纤激光阵列的倾斜控制及锁相. 为在实际大气环境下应用光纤激光阵列技术提供了参考.

关键词: 光纤激光阵列, 倾斜控制, 共形发射, 目标在回路

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

DOI: 10.7498/aps.62.024206

1 引言

光纤激光阵列具有光束质量好、可扩展、易维护、结构灵活等优点, 可以十分简便地与现代光纤光学技术相结合, 在相干合成、自由空间激光通信、光控相控阵雷达等领域有着广阔的应用前景, 获得了越来越多的关注^[1-10]. 2011 年, 国防科技大学报道了 1.08 kW 输出功率的九路光纤激光阵列的相干合成实验, 利用铌酸锂相位调制器实现了阵列光束间的相位锁定^[7]. 同年, 美国林肯实验室报道了八路光纤激光阵列的相干合成, 获得了 4 kW 的激光输出功率^[8]. 近年来, 美国 HRL 实验室、雷声公司等研究机构还探索了光纤激光阵列在自由空间激光通信领域的应用潜力^[9,10]. 通过调研国内外的研究成果并结合本单位的研究工作可以发现, 目前围绕光纤激光阵列展开的绝大多数验证实验都是在环境宁静的室内进行的, 通过人工调节的方式消除了阵列间的静态倾斜像差, 主要的扰动源为光纤放大器的相位噪声, 只需要补偿阵列间的平移像差即可, 且激光目标多为合作目标, 因此闭环控制方式容易实现. 而要在实际大气环境下应用光纤激光阵列技术, 就必须考虑大气湍流效应的影响,

目前的室内验证实验离实用尚有一段距离.

光纤激光阵列应用于实际大气环境时, 除了需要补偿光纤放大器本身的相位噪声外, 还需补偿大气湍流引起的波前畸变, 这就要至少同时控制阵列间的平移和倾斜像差, 以缓解大气湍流效应的影响, 获得较好的远场光斑分布^[11,12]. 并且, 在实际应用场合下, 目标多为非合作的, 此时的闭环控制方式较为复杂. 目前的研究表明, 目标在回路 (target-in-the-loop, TIL) 技术是一种可行的途径^[13-16]. 2011 年, 美国陆军研究实验室报道了基于 TIL 技术的七单元光纤激光阵列的相干合成^[15], 阵列光束平行发射, 激光传输距离为 7 km, 其中使用了自适应光纤光源准直器 (adaptive fiber-optic collimator, AFOC) 来校正阵列光束间的倾斜像差, 激光功率为毫瓦量级. 本单位于 2011 年实现了基于 TIL 的三路光纤传输激光阵列的相干合成, 利用一种可同时调节光程和光束倾斜的自适应光纤光源准直器实现了对阵列间平移和倾斜像差的同时补偿, 并实现了合成光束在目标上的扫描等动作^[16]. 值得一提的是, 目前只有美国陆军研究实验室和本单位研制了使光纤准直光束受控地产生快速、小角度变化的器件——自适应光纤光源准直器^[15,16].

当前关于光纤激光阵列的研究正向着高功率、

* 国家自然科学基金 (批准号: 61138007) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: blast.4006@126.com

多单元、大气湍流补偿、共形发射体系等方向发展. 特别是共形发射^[4], 通过对阵列光束的平移和倾斜相位的控制, 构成一个共形波前, 有望在一定范围内将激光发射至任意距离的目标上, 如图 1 所示. 本文将结合光纤激光阵列的发展趋势, 介绍一种基于大模场面积光纤的自适应光纤光源准直器的研制进展, 搭建七单元光纤激光阵列, 进行平行发射体系下阵列间的倾斜控制实验, 并初步探索基于目标在回路的共形发射体系下阵列间的倾斜控制. 最后, 在三级全光纤放大链路的主振荡-功率放大系统中, 完成两路 10 W 量级光纤激光阵列的倾斜控制及锁相. 为在实际大气环境下应用光纤激光阵列技术提供了参考.

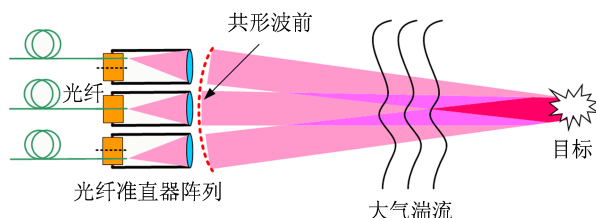


图 1 光纤激光阵列的共形发射体系示意图

2 自适应光纤光源准直器的原理及性能

自适应光纤光源准直器由基座、两对双压电驱动器、柔性十字梁及准直镜头组成, 其工作原理如图 2 所示. 光纤端面固定于十字梁的中心, 由在 X, Y 方向布置的两对双压电驱动器驱动, 在准直透镜的焦平面内平移. 出射光束经透镜准直后产生方向上的变化. 准直透镜的焦距为 f , 光纤端面在焦平面内沿 X 轴 (或/和 Y 轴) 偏移 Δx , 则出射激光相对于光轴偏转角度 $\varphi = \arctan(\Delta x/f)$, 由于偏转角度很小, 近似为 $\varphi \approx \Delta x/f$.

设计了基于纤芯直径 $30\ \mu\text{m}$ 、包层直径 $250\ \mu\text{m}$ 大模场面积光纤的自适应光纤光源准直器, 光纤端面做了 8° 角的抛光处理, 光纤数值孔径约 0.06, 传输激光波长为 $1064\ \text{nm}$. 准直镜头的等效焦距为 $250\ \text{mm}$, 准直光束的光斑口径约 $30\ \text{mm}$. 对该器件的电压-准直光束偏移量特性进行了测试, 如图 3(a) 所示. 在 $\pm 350\ \text{V}$ 电压下, 实现了 $\pm 0.4\ \text{mrad}$ 的准直光束偏转量, 偏转角变化量约为 $1.2\ \mu\text{rad/V}$. 同时测试了该器件的频率响应特性曲线, 如图 3(b) 所示, 器件的第一阶谐振频率约为 $750\ \text{Hz}$.

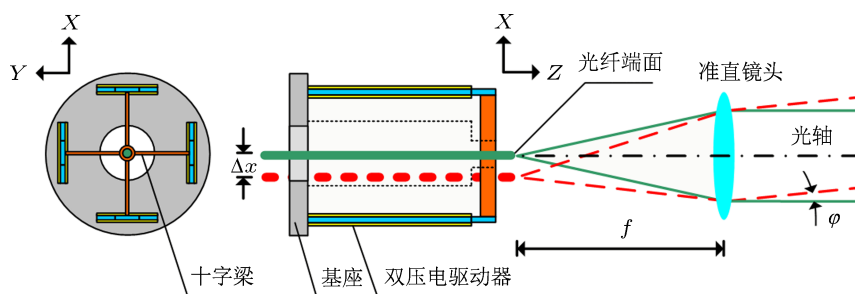


图 2 自适应光纤光源准直器的原理图

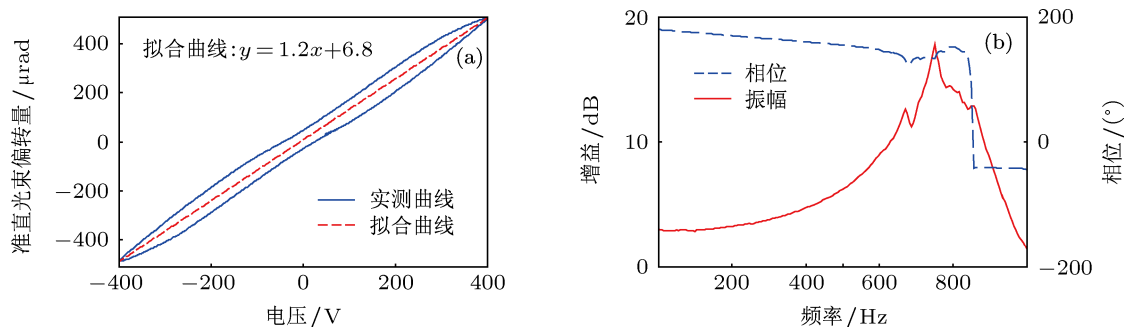


图 3 自适应光纤光源准直器的性能测试曲线 (a) 电压-偏转角特性曲线; (b) 频率响应特性曲线

搭建了基于该自适应光纤光源准直器的七单元光纤激光阵列, 如图 4 所示, 相邻光束中心距为 44 mm, 阵列的填充因子约 0.68.

3 平行发射体系的倾斜控制

针对上述七单元光纤激光阵列, 搭建了基于平行发射体系的倾斜闭环控制实验平台, 如图 5 所示. 种子光源为 10 mW 的 1064 nm 光纤激光器 (型号 Koheras AdjustiK Y10, 线宽 20 kHz), 经 200 mW 的光纤放大器, 再经 1×8 光纤分束器后连接至七单元 AFOC 阵列. 准直光束经远场变换透镜合束, 利用 CMOS 相机获取光斑的远场图像. 以光斑图像的环境能量 (power-in-bucket, PIB) 为性能指标, 利用随机并行梯度下降 (stochastic parallel gradient descent, SPGD) 算法控制 AFOC 阵列, 实现了阵列间的倾斜闭环控制.

SPGD) 算法控制 AFOC 阵列, 实现了阵列间的倾斜闭环控制.

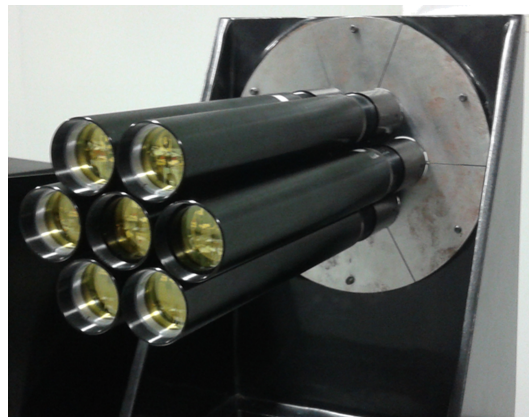


图 4 基于自适应光纤光源准直器的七单元光纤激光阵列

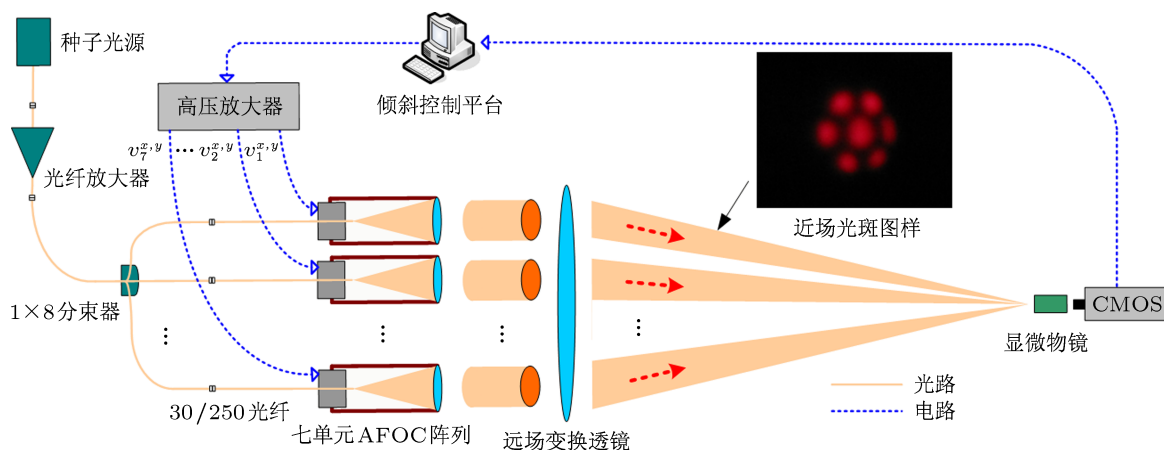


图 5 基于七单元光纤激光阵列的平行发射体系倾斜控制实验方案

图 6 为开闭环时, 算法性能指标的归一化迭代曲线, SPGD 算法的迭代速率约为 200 Hz. 闭环后, 性能指标平均值 (即性能指标测量数据求和后取平均的结果) 从开环时的 0.55 提升至 0.99.

图 7 为开闭环时, CMOS 相机采集的远场光斑长曝光图. 图 7(a) 为开环, 此时光斑弥散, 亮度较低, 可以观察到阵列光束间存在着一定的倾斜像差; 图 7(b) 为闭环, 光斑集中, 亮度提升, 灰度峰值由开环时的 93 提升至 212, 阵列间的倾斜像差被校正, 此时远场光斑具有一定的相干条纹, 而锁相控制不是本文的关注点, 由于未锁相, 条纹对比度不高. 图 7(c), (d) 为沿着中心两个方向的开闭环远场光斑剖切面对比. 表 1 为由校正电压算得的阵列倾斜像差校正量, 该实验中的最大倾斜像差校正

量大于 0.2 mrad.

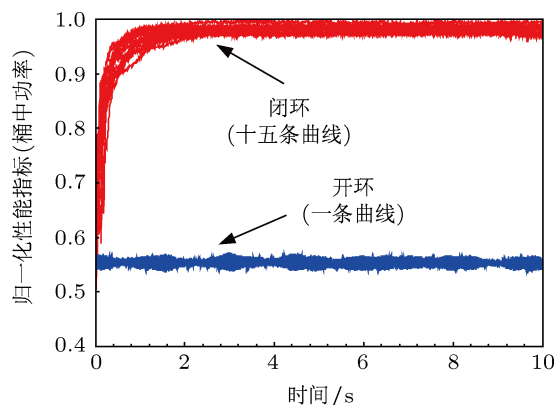


图 6 开闭环时, 算法性能指标的归一化迭代曲线

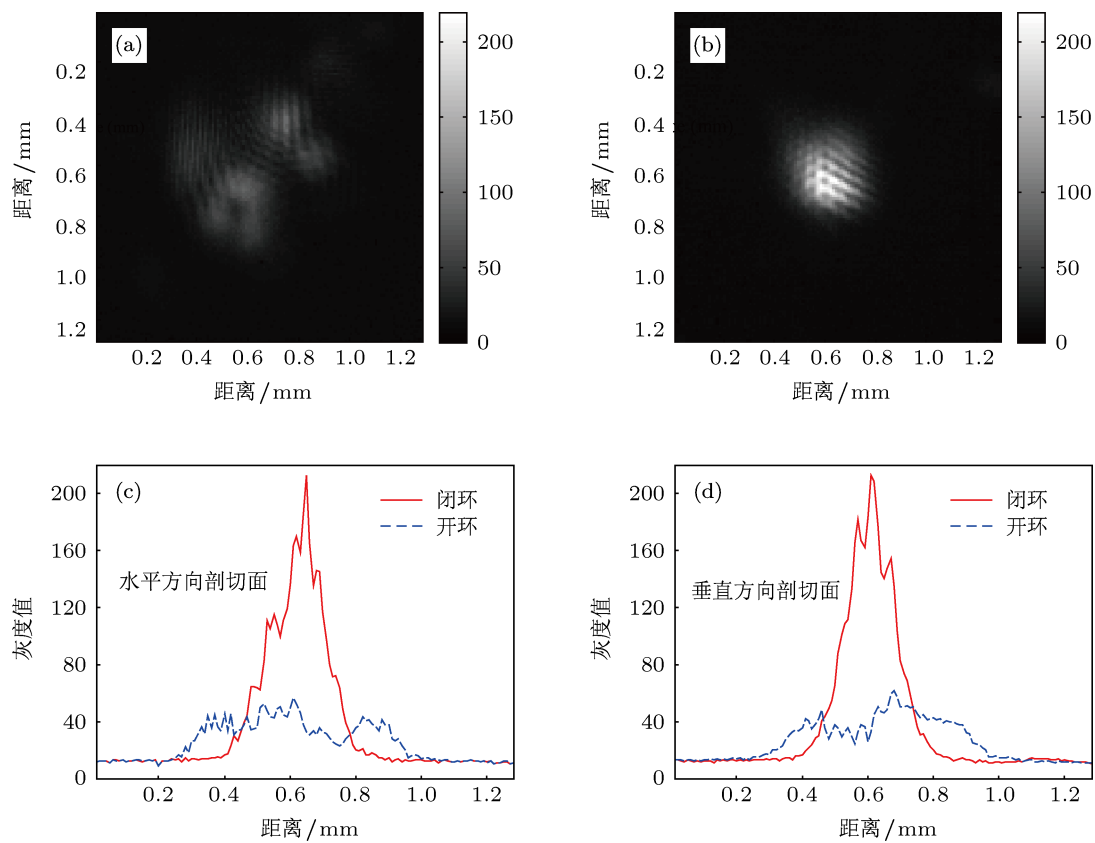


图7 开闭环时, CMOS 相机采集的远场光斑长曝光图 (a) 开环; (b) 闭环; (c), (d) 沿着中心两个方向的开闭环远场光斑剖切面对比

表 1 由校正电压算得的倾斜像差校正量

	光束 1	光束 2	光束 3	光束 4	光束 5	光束 6	光束 7
倾斜校正量 (X 方向/ μrad)	161.28	-227.76	28.44	138.36	134.28	-37.2	-97.2
倾斜校正量 (Y 方向/ μrad)	120.12	130.44	-5.64	81.84	-121.32	104.64	2.76

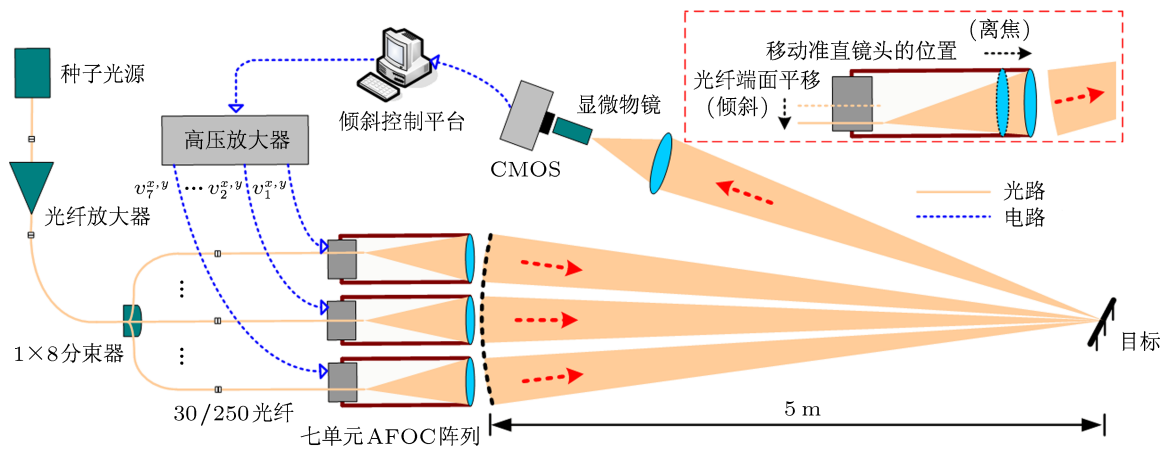


图8 基于 TIL 的七单元光纤激光阵列共形发射倾斜控制实验方案

4 基于目标在回路的共形发射体系倾斜控制体系

进行了基于 TIL 的共形发射体系下的阵列间倾斜闭环控制实验. 所谓共形发射, 是指通过控制单元光束的波前平移、倾斜和离焦等(也可以只控制波前平移和倾斜), 使光束阵列形成一个共形波面, 在一定范围内将激光发射至任意距离的目标上. 图 8 为基于 TIL 的七单元光纤激光阵列共形发射倾斜控制实验方案. 通过调节 AFOC 中准直镜头与光纤端面的距离实现出射光束离焦, 利用人工调节实现各单元光束倾斜量的粗调, 利用 AFOC 阵列实现光束倾斜的精确控制. 七单元离焦光束同时发射至 5 m 处的目标上, 目标的漫反射光被发射端的成像系统接收, 成像于 CMOS 相机. 倾斜控制平台以散斑图像的环能量作为性能指标, 利用 SPGD 算

法实现了闭环控制.

图 9 为开闭环时, 归一化性能指标迭代曲线的对比. 开环时, 算法性能指标平均值为 0.54; 闭环后, 性能指标平均值提升至 0.93.

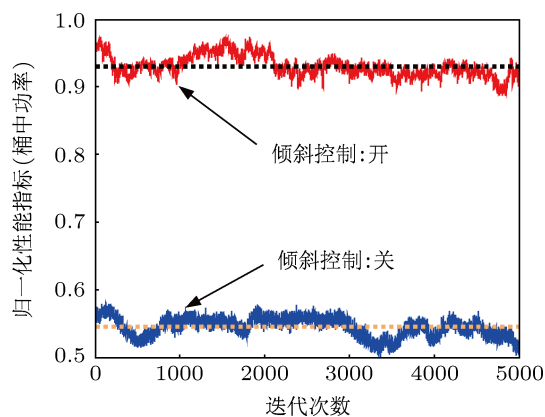


图 9 开闭环时, 算法性能指标的归一化迭代曲线

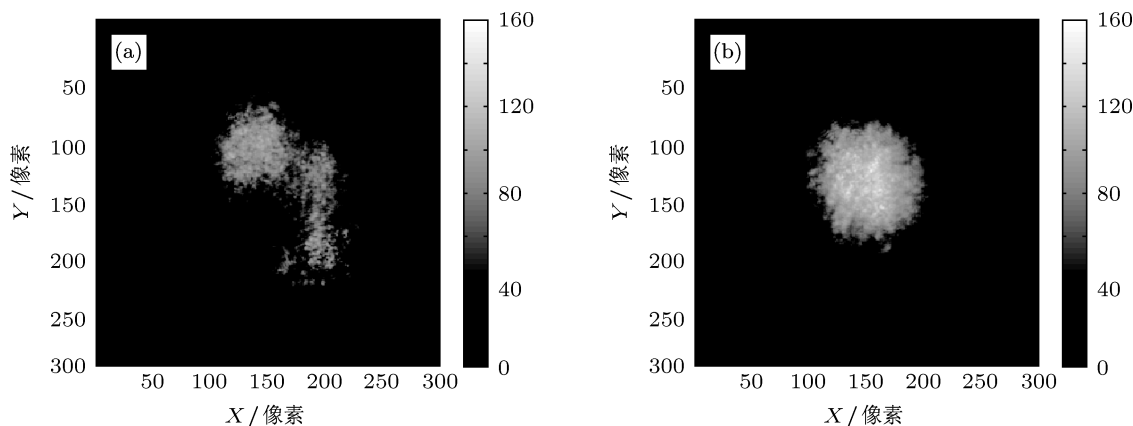


图 10 发射端 CMOS 相机采集的散斑图像长曝光图 (a) 开环; (b) 闭环

图 10 为开闭环时, 发射端 CMOS 相机采集的远场光斑长曝光图. 其中, CMOS 相机的像素大小为 $10.8 \mu\text{m} \times 10.8 \mu\text{m}$. 图 10(a) 为开环, 图 10(b) 为闭环. 表 2 为由校正电压算得的阵列倾斜像差校正量, 该实验中的最大倾斜像差校正量大于 0.3 mrad .

5 两路 10 W 量级光纤激光的倾斜控制

在三级全光纤放大链路的主振荡 - 功率放大系统中, 将自适应光纤光源准直器连接至光纤光路, 进行了两路 10 W 量级光纤激光的倾斜控制实验. 图 11 为倾斜控制时的算法性能指标迭代曲线, SPGD 算法的迭代速率约为 200 Hz; 闭环后, 性能指标平均值从开环时的 0.3 提升至 0.9. 图 12 为光

斑轮廓仪采集的远场光斑长曝光图, 图 12(a) 为开环, 图 12(b) 为倾斜控制后的情形. 由校正电压算得光束 1 的倾斜像差校正量分别为 $-107.41 \mu\text{rad}$

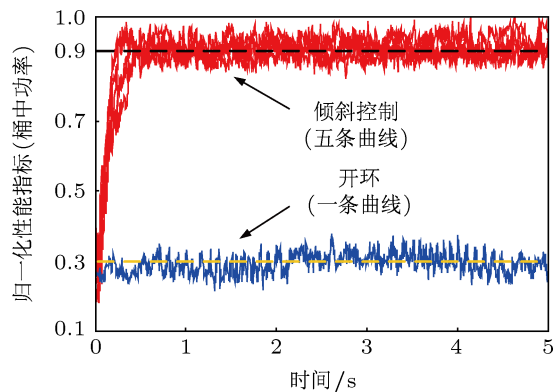


图 11 算法性能指标的归一化迭代曲线

和 $-37.96\ \mu\text{rad}$, 光束 2 的倾斜像差校正量分别为 $36.65\ \mu\text{rad}$ 和 $104.79\ \mu\text{rad}$. 实验中还利用铌酸锂相位调制器实现了两路光束的相位锁定, 如图 12(c)

所示. 对该 AFOC 器件的功率特性进行了测试, 插入损耗小于 $0.2\ \text{dB}$; 在百瓦量级的出射功率下, 器件工作正常.

表 2 由校正电压算得的倾斜像差校正量

	光束 1	光束 2	光束 3	光束 4	光束 5	光束 6	光束 7
倾斜校正量 (X 方向/ μrad)	-178.52	-229.1	318.41	290.35	390.68	124.39	-72.86
倾斜校正量 (Y 方向/ μrad)	-335.82	43.48	-205.99	-14.94	326.75	-43.32	-239.9

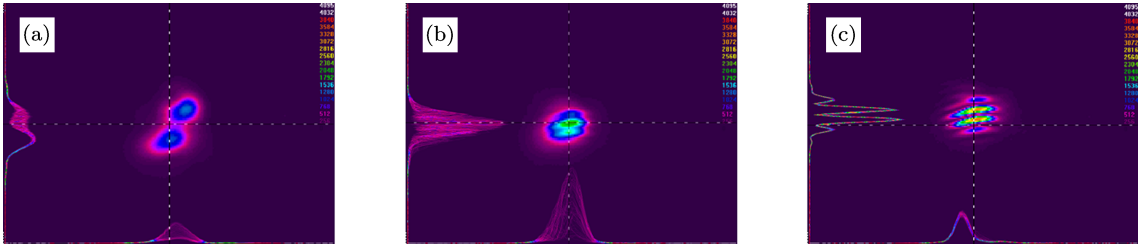


图 12 远场光斑长曝光图 (a) 开环; (b) 倾斜控制; (c) 倾斜控制后锁相

6 结 论

介绍了基于大模场面积光纤的自适应光纤光源准直器的研究进展, 搭建了七单元光纤激光阵列实验平台, 在平行发射体系以及基于 TIL 的共形发射体系下验证了 AFOC 阵列控制光束倾斜的能力, 并在高功率场合完成了两路光纤激光阵列的倾

斜控制及锁相. 实验取得了较好的效果, 实现了对 $\pm 0.4\ \text{mrad}$ 内倾斜像差的校正. 为高功率、多单元、共形发射的光纤激光阵列在实际大气环境下的应用提供了参考.

感谢国防科学技术大学光电学院的王小林博士以及研究生王雄在高功率光纤激光实验方面提供的帮助.

[1] Fan T 2005 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electronics* **11** 567

[2] Shay T Benham V, Baker J, Sanchez A, Pilkington D, Lu C 2007 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electronics* **13** 480

[3] Zhou P, Liu Z J, Wang X L, Ma H T, Xu X J 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 231106

[4] Vorontsov M, Weyrauch T, Beresnev L, Carhart G, Liu L, Aschenbach K 2009 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electronics* **15** 269

[5] Wang X L, Zhou P, Ma Y X, Ma H T, Xu X J, Liu Z J, Zhao Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 973 (in Chinese) [王小林, 周朴, 马阎星, 马浩统, 许晓军, 刘泽金, 赵伊君 2010 物理学报 **59** 973]

[6] Geng C, Li X Y, Zhang X J, Rao C H 2011 *Opt. Comm.* **284** 5531

[7] Ma Y X, Wang X L, Leng J Y, Xiao H, Dong X L, Zhu J J, Du W B, Zhou P, Xu X J, Si L, Liu Z J, Zhao Y J 2011 *Opt. Lett.* **36** 951

[8] Yu C, Augst S, Redmond S, Goldizen K, Murphy D, Sanchez A, Fan T 2011 *Opt. Lett.* **36** 2686

[9] Bruesselbach H, Wang S, Minden M, Jones D, Mangir M 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 347

[10] Miniscalco W, Lane S, Fisher K, Waite S, Howlett M, Colby K, Smith I 2010 *Proc. SPIE* **7814** 78140S

[11] Lachinova S, Vorontsov M 2008 *J. Opt. Soc. Am. A* **25** 1960

[12] 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]

[13] Vorontsov M, Kolosov V 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 126

[14] Bourdon P, Jolivet V, Bennai B, Lombard L, Canat G, Pourtal E, Jaouen Y, Vasseur O 2008 *Proc. SPIE* **6873** 687316

[15] Weyrauch T, Vorontsov M, Carhart G, Beresnev L, Rostov A, Polnau E, Liu J 2011 *Opt. Lett.* **36** 4455

[16] 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]

Experimental research of tip/tilt control of a multi-channel fiber-laser array*

Geng Chao[†] Tan Yi Mu Jin-Bo Li Xin-Yang

(The Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, the Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(Received 31 May 2012; revised manuscript received 20 July 2012)

Abstract

The fiber-laser array technique has an extensive prospect of applications in the areas of coherent beam combination, free-space laser communications and so on. In this paper, considering the development trend of the fiber-laser array technique, the research progress of an adaptive fiber-optic collimator based on large-mode-area fiber is introduced, a 7-channel fiber-laser array is established, the tip/tilt control experiment of laser array under parallel-transmission configuration is conducted, and the tip/tilt control of laser array under conformal-transmission configuration using target-in-the-loop is explored. Finally, the tip/tilt control and phase locking of two 10-W level fiber lasers are achieved in the master-oscillator-power-amplifier (MOPA) system with three-stage all-fiber amplifiers. This paper presents a reference for using the fiber-laser array technique in real atmospheric environment.

Keywords: fiber-laser array, tip/tilt control, conformal transmission, target-in-the-loop

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

DOI: 10.7498/aps.62.024206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61138007).

[†] Corresponding author. E-mail: blast_4006@126.com