光纤激光相干合成中倾斜和锁相同时控制的实验研究

王 雄[1],王小林[1],周 朴[1],粟荣涛[1],耿 超[2],李新阳[2],许晓军[1],舒柏宏[1]

(1. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073;
2. 中国科学院光电技术研究所,四川 成都 610209)

摘 要:光纤激光的相干合成是获得高能量密度、高光束质量激光输出的有效方法之一。在相干合成中,各个单元光束的倾斜波前畸变和活塞相位误差对合成的效果具有重要影响。搭建了两路光纤激光相干合成系统,利用光纤自适应准直器和相位调制器对相干合成中倾斜波前畸变和活塞相位误差进行校正。实验系统以高速相机采集的光斑数据作为评价依据,通过计算机程序进行控制,控制算法为随机并行梯度下降算法。在倾斜和锁相控制前,合成光斑的条纹对比度为 0.03,桶中功率为 8.03;在倾斜和锁相控制后,合成光斑的条纹对比度达到了 0.59,桶中功率达到了 32.89,说明实验中倾斜和锁相控制显著提高了相干合成的效果。

关键词:光纤激光; 相干合成; 倾斜波前; 活塞相位; 高速相机
中图分类号:TN248 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)06-1443-05

Experimental research of tilt-tip wavefront and phase-locking control in fiber lasers coherent beam combining

Wang Xiong[1], Wang Xiaolin[1], Zhou Pu[1], Su Rongtao[1], Geng Chao[2], Li Xinyang[2], Xu Xiaojun[1], Shu Bohong[1]

(1. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. The Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: Coherent beam combining of fiber lasers is an very effective way to arrange high energy intensity and high beam quality laser. The tilt-tip wavefront aberrations and phase differences of each beamlet's have significant impacts on coherent beam combining. A coherent beam combining system of two fiber lasers was set up. In the experiment, adaptive fiber optics collimator and phase modulator were introduced to realize tilt-tip and phase control. The metric function came from the laser spot data acquired by high-speed camera, the control method was SPGD algorithm and the whole control was carried out by a computer. The contrast of combined spot is 0.03 and power in bucket is 8.03 before tilt-tip and phase-locking control, after tilt-tip and phase-locking control the contrast is 0.59 and power in bucket is 32.89, which means the control makes obvious improvement in coherent beam combining.

Key words: fiber laser; coherent beam combining; tilt-tip wavefront; piston phase; high-speed camera

收稿日期:2012-10-14; **修订日期**:2012-11-18

作者简介:王雄(1987-),男,硕士生,主要从事高能激光方面的研究。Email:wangxiong23@gmail.com
导师简介:舒柏宏(1960-),男,教授,主要从事高能激光技术方面的研究。Email:shu_bh@tom.com

0 引　言

光纤激光器凭借其转换效率高、光束质量好、热管理方便、结构紧凑等优点,在国防和工业领域有着广阔的应用情景, 成为高能激光器的重要发展方向之一[1-3]。 由于热损伤、非线性效应和热透镜效应等因素的影响, 单根光纤激光器的输出功率受到了限制[4],激光阵列的相干合成是提高激光光束能量和质量的有效途径[5-6],受到相关技术领域研究人员的广泛关注。

倾斜波前和活塞相位是相干合成中合成光束质量的重要影响因素[7]。如果各单元光束在远场无法有效重合,合成光束的光束质量就会受到严重影响。倾斜波前的控制目前主要利用液晶相控阵[6]、高速倾斜镜[8]和光纤自适应准直器[9-11]实现。光纤自适应准直器具有精度高、结构紧凑、反应快速等优点,在光束倾斜波前控制中具有广阔的应用前景。

目前活塞相位的控制技术已经趋于成熟[12-15],基本都是基于小孔光电探测器实现的。小孔光电探测器具有灵敏度高、响应速度快等优点,但是它的一个主要缺点就是需要事先对小孔位置进行精调, 确保合成光束通过小孔进入探测器。相比之下,利用高速相机采集光斑数据作为控制依据就有一定的优势。尽管高速相机响应速度相对光电探测器较慢, 但高速相机光敏面大,可以利用程序选择开窗大小,这样只要光斑照射在相机光敏面上就可以选择性地开窗并采集数据,大大提高了系统的实用性。

实验中,利用中国科学院光电技术研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所和笔者单位联合研制的自适应光纤准直器, 搭建了两路光纤激光相干合成系统,利用高速相机采集光斑数据,通过计算机程序以随机并行梯度下降算法(SPGD)控制光纤自适应准直器和相位调制器, 对相干合成中倾斜波前和活塞相位的校正进行了实验研究, 验证高速相机同时实现倾斜波前和活塞相位控制的可行性。

1 实验原理

1.1 实验系统结构

实验原理如图 1 所示。实验搭建的两路光纤激光的相干合成系统中, 种子光自 MO 发射经过放大器 A0 放大后被分束器 BS0 分为两束, 经过相位调制器 PM 和模式适配器 MFA 后,通过光纤自适应准直器 AFOC 发射。各路光功率分别为 12 W,光束经透镜 L 聚焦后被分束镜 BS1 分为两束,透射光进入 CCD 相机进行观察, 反射光进入 CMOS 高速相机(1024×1024,满帧帧频为 150 Hz,可任意开窗)。CMOS 高速相机采集远场合成光斑的图像数据作为光束控制评价依据,采集到的数据实时传入计算机,在计算机程序的控制下对其进行分析处理。

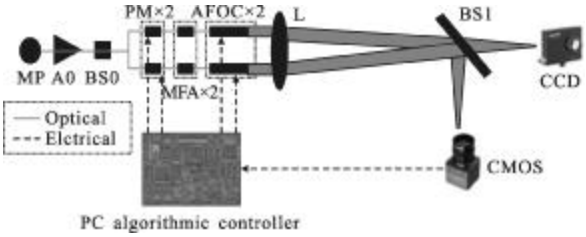


图 1 实验系统原理图

Fig.1 Schematic of experiment setup

光纤自适应准直器(AFOC)是在光纤激光发射端周围安装横向微型压电陶瓷片的集成器件[11]。该器件通过控制施加在压电陶瓷上的电压对光纤的横向位移进行调整, 改变光纤发射端在发射透镜焦平面的位置, 从而实现对发射光束波前高速精确的倾斜控制。实验中使用联合研制的光纤自适应准直器进行倾斜波前的控制,其结构如图 2 所示。

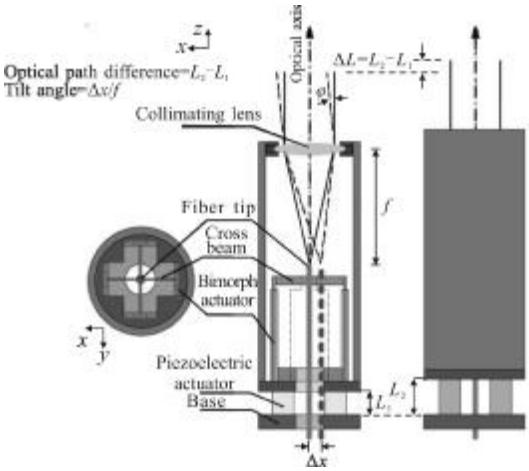


图 2 光纤自适应准直器

Fig.2 Adaptive fiber optics collimator (AFOC)

实验系统利用 SPGD 优化算法对激光的倾斜波前和活塞相位进行实时反馈控制, 最终达到校正倾斜波前畸变和活塞相位误差的目的。系统中活塞相

位控制是通过两路激光中加入的相位调制器实现的,倾斜波前的控制则通过自适应光纤准直器实现,二者的控制由计算机上同一个程序实现。

1.2 控制方法和评价函数

实验使用 SPGD 算法经行倾斜波前和活塞相位控制。该算法的主要步骤是:

(1) 生成随机扰动向量并转化为电压控制信号 $\delta u=\{\delta u_1,\delta u_2,\cdots,\delta u_M\}$,各个扰动信号满足均值为零,且方差相等;

(2) 将随机扰动电压 δu 施加到各个相位控制单元,获得性能评价函数 $J_+=J(u+\delta u)$;

(3) 将随机扰动电压 δu 反向施加到各个相位控制单元,获得性能评价函数 $J_-=J(u-\delta u)$;

(4) 计算两次扰动中评价函数的变化量 $\delta J=(J_+-J_-)/2$;

(5) 根据 $u^{(k+1)}=u^{(k)}+\gamma\delta u^{(k)}\delta J^{(k)}$更新迭代参数,其中 k 为迭代次数,γ 为迭代步长;

(6) 转至步骤(1)进入下一次迭代,直至人工停止优化算法过程。

系统使用桶中功率(PIB)[16]作为性能评价函数,即通过某一光阑的光功率占总功率的比值,其表达式为:

$$J_{PIB}=\frac{\iint \tau(x,y)I(x,y)dxdy}{\iint I(x,y)dxdy} \tag{1}$$

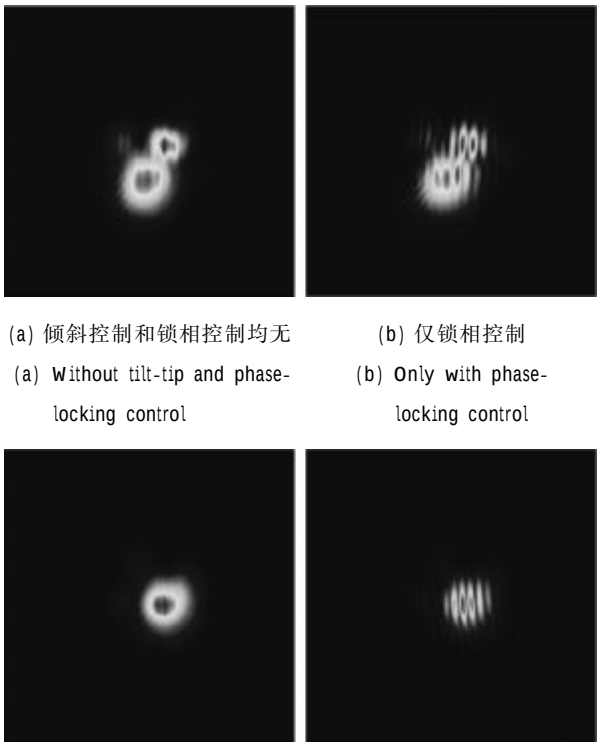
1.3 实验方案及参数

实验中,先将光斑粗调至相机光敏面上,然后相机在计算机程序的控制下,在 1 024×1 024 分辨率下采集图像。根据获得的图像数据计算光斑质心位置,以质心为中心开 128×128 的窗口,开始倾斜波前控制。倾斜波前校正完毕后,光斑已经高度重叠在质心周围,再开 12×12 的窗口进行锁相控制。电压控制信号经 DA 转换卡输出至光纤准直器的高压放大器和相位调制器,实现实时倾斜和锁相控制。

实验中锁相控制时相机只采集光斑质心周围的 12×12 个像素点作为反馈数据,是为了尽可能地提高相机的帧率。为了在进一步提高帧率的同时降低背景光噪声,相机曝光时间应尽量小,实验中为 0.015 ms。经过其他相关参数设置的优化,实际系统中的锁相控制迭代速率达到了 3.7 kHz 左右。在倾斜控制中,由于光斑移动范围较大,为了提高倾斜波前控制的效果采用 128×128 的窗口获取数据,其迭代速率为 58 Hz 左右,对于慢变的倾斜波前来说,这样的迭代速度已经可以满足要求。

2 实验结果

实验中事先人为引入一个倾斜波前误差,然后对倾斜波前和活塞相位进行控制,获得控制结果。倾斜控制的迭代速率为 58 Hz,锁相控制的迭代速率为 3.7 kHz。实验中使用 CCD 相机采集倾斜波前和活塞相位控制前后不同情况下 10 s 远场光斑的长曝光图像,如图 3 所示。



(a) 倾斜控制和锁相控制均无
(a) Without tilt-tip and phase-locking control

(b) 仅锁相控制
(b) Only with phase-locking control

(c) 仅倾斜控制
(c) Only with tilt-tip control

(d) 倾斜和锁相控制均有
(d) Both with tilt-tip and phase-locking control

图 3 实验结果长曝光图

Fig.3 Long exposure picture of experimental results

图 3(a)为未进行倾斜控制和锁相控制时获得系统开环长曝光图。从图中可以看出,由于倾斜误差的存在,两个光斑基本没有重合,能量集中度很低;由于没有进行活塞相位控制,干涉图样模糊,呈现出非相干合成的效果,条纹对比度仅为 0.03,平均 PIB 值为 8.03。

图 3(b)为仅进行锁相控制但不进行倾斜控制的远场光斑长曝光图，从图中可以发现两个光斑位置没有变化，基本没有重合。但是由于加入了锁相控制,两个光斑的干涉条纹稳定而又清晰,获得了稳定的干涉,条纹对比度达到了 0.49。PIB 均值为 10.22,相对没有锁相控制提高了 27%。

图 3(c)是仅进行倾斜控制但不进行锁相控制的远场光斑长曝光图,可以看出倾斜控制效果明显,两个光斑完全重合在一起，能量集中度得到了明显提高。不过由于没有进行锁相控制,基本看不见稳定的干涉条纹,条纹对比度很低,仅为 0.10。PIB 均值为 22.64,比不进行倾斜和锁相控制提高了 182%,比仅进行锁相控制提高了 122%。由此可知:仅进行倾斜控制虽然对条纹对比度提高不明显，但是大幅提高了 PIB 的值,光斑能量集中度获得了明显改善。

图 3(d)为经行倾斜控制和锁相控制后系统远场光斑的长曝光图,可以发现:控制后干涉条纹对比度较控制前有了明显的提高，条纹对比度为 0.59,PIB 均值为 32.89,达到整个实验中最大值。倾斜波前畸变和活塞相位误差得到了比较理想的校正补偿,达到了实验预期的目的。

实验过程中高速相机采集的桶中功率变化曲线如图 4 所示。上部曲线为先进行倾斜控制、17.24 s 后进行锁相控制的 PIB 变化曲线，下部曲线为不进行倾斜控制、17.24 s 后进行锁相控制的 PIB 变化曲线。

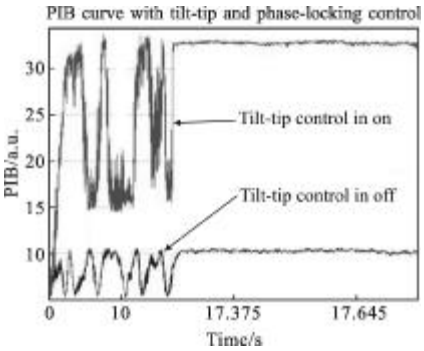


图 4 倾斜控制和锁相控制桶中功率变化曲线

Fig.4 PIB curves with both tilt-tip and phase-locking control

实验中计算机程序先进行倾斜波前控制，上面的曲线显示在约 100 步迭代(2 s)之内倾斜波前畸变已经校正完毕,在第 1 000 步迭代(17.24 s)之前仅进行倾斜控制,但 PIB 变化仍然很大,表示干涉条纹没有稳定。第 1 000 步迭代以后进行锁相控制,PIB 保持在最大值,说明干涉条纹已经稳定,倾斜和锁相控制均获得明显效果。

下面的曲线中没有引入倾斜控制,故 0~1 000 步之间系统开环,17.24 s 之后进行锁相控制,PIB 保持在局部最大值,说明干涉条纹稳定,活塞相位误差得到了有效补偿。但是对比两条曲线可以发现,上部曲线最终稳定的 PIB 值是下部曲线的 3.22 倍,说明倾斜控制对远场光斑的能量集中度有着显著的改善。

3 结束语

实验利用高速相机对相干合成系统中倾斜波前畸变和活塞相位误差进行了实时补偿，获得了明显的控制效果。同时,高速相机在相干合成系统中倾斜和锁相控制的可行性以及光纤自适应准直器在倾斜波前畸变控制方面的有效性得到了实验验证。系统利用高速相机替代了小孔光电探测器，大大提高了相干合成系统的实用性，为下一步利用高速相机进行 7 路光纤激光相干合成中倾斜波前和活塞相位的控制提供了实验基础。

由于相机的采集速率以及相机与计算机数据传输耗时的限制，利用一个高速相机同时进行倾斜和锁相控制的带宽受到了一定限制，需要对系统进行改进和提高。后续工作主要可以分为三个部分:(1) 提高实验中倾斜控制和锁相控制交替的自主性和高效性,当迭代速率足够高时,该系统有望实现动态倾斜波前畸变和活塞相位误差的实时校正。(2) 可以考虑使用集成电路板作为主控制模块，减少数据传输耗时,提高系统迭代速率。(3) 也可以对两个相机结合的方案进行探索，同时使用两个相机分别控制倾斜波前和活塞相位。

参考文献:

[1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.

[2] Y Fan T. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2005, 11(3): 567-577.

[3] Galvanauskas A. High power fiber lasers [J]. Optics & Photonics News, 2004, 15(7): 42-47.

[4] Dawson Jay W, Messerly Michael J, Beach Raymond J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 13240-13266.

[5] Dorschner T A. Adaptive photonic phase locked elements[C]// MTO Symposium, 2007.

[6] Mikhail Vorontsov. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE) system architecture and wavefront control concept [C]//SPIE, 2005, 5895: 1-9.

[7] Vorontsov Mikhail A, Thomas Weyrauch, Beresnev Leonid 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.

[8] Wilcox Christopher C, Andrews Jonathan R, Restaino Sergio R, et al. Analysis of a combined tip-tilt and deformable mirror[J]. Optics Letters, 2006, 31(6): 679-681.

[9] Beresnev Leonid A, Vorontsov Mikhail A. Design of adaptive fiber optics collimator for free-space communication laser transceiver[C]//SPIE, 2005: 5895, 58950R-58957R.

[10] Beresnev Leonid A, Thomas Weyrauch, Vorontsov Mikhail A, et al. Development of adaptive fiber collimators for conformal fiber-based beam projection systems [C]//SPIE, 2008, 7090: 1-10.

[11] Geng Chao, Li Xinyang, Zhang Xiaojun, et al. Coherent beam combination of an optical array using adaptive fiber optics collimators [J]. Optics Communications, 2011, 284: 5531-5536.

[12] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. Optics Letters, 2011, 36(14): 2686-2688.

[13] Zhou Pu. Study on Coherent Beam Combination Technology of Fiber Lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
周朴. 光纤激光相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.

[14] Wang Xiaolin. Study on Optimization Algorithm Based Adaptive Optics in Laser Phased Array[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
王小林. 激光相控阵中的优化式自适应光学研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.

[15] He Bing. Study on improvement of properties of fiber lasers and beam combination techniques [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Science, 2007. (in Chinese)
何兵. 光纤激光特性改善及相干组束技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2007.

[16] Muller Richard A, Andrew Buffington. Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening [J]. Journal of the Optical Society of America, 1974, 64(9): 1200-1210.