

大指向误差下的两路自适应光纤准直器 200 W 非相干合成实验

耿 超^{1,2} 李 枫^{1,2} 王小林³ 粟荣涛³ 李新阳^{1,2}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

³国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 大功率光纤激光光束合成系统中,由装调误差、热形变效应等引起的光束大指向误差会影响合成效果,并可能对光束合成系统造成严重危害。搭建了2路百瓦量级自适应光纤准直器的光束指向操控实验平台,分别利用基于可变桶中功率评价函数和基于合成光束发散角评价函数的随机并行梯度下降控制策略校正了合成光束间的大指向误差,实现了功率200 W的非相干合成,为大指向误差下的大功率光纤激光合成提供了参考。

关键词 光纤光学; 光纤激光; 光束合成; 指向误差; 自适应光纤准直器; 随机并行梯度下降算法

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1005001

200 W Incoherent Beam Combining of Two Adaptive Fiber-Optic Collimators in Large Pointing-Error Condition

Geng Chao^{1,2} Li Feng^{1,2} Wang Xiaolin³ Su Rongtao³ Li Xinyang^{1,2}

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

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

³College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In high-power fiber laser beam combining systems, the large beam-pointing errors, which are induced by limited precision of assembling, thermal deformation of mechanism and so on, will affect combining effects and bring serious damages to the systems. Beam-pointing experimental setup with two adaptive fiber-optic collimators is established, the large beam-pointing errors between combined beams are corrected using the stochastic parallel gradient descent control strategies based on variable power-in-the-bucket metrics and divergence metrics, respectively, and 200 W incoherent beam combining is achieved. This work is helpful for the high-power fiber laser beam combining in large pointing-error conditions.

Key words fiber optics; fiber laser; beam combining; pointing error; adaptive fiber-optic collimator; stochastic parallel gradient descent algorithm

OCIS codes 140.3298; 010.1080; 140.3290

1 引 言

近年来,利用光纤激光光束合成技术获取高功率密度、高光束质量的激光输出正逐渐成为现实。2014年,美国海军军舰庞瑟号装备了功率为30 kW的光纤激光非相干合成系统^[1]。同年,美国国防部先进研究计

收稿日期: 2015-03-25; 收到修改稿日期: 2015-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61205069, 61138007)

作者简介: 耿 超(1984—),男,博士,副研究员,主要从事光纤激光光束合成等方面的研究。E-mail: blast-4006@126.com

导师简介: 李新阳(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学等方面的研究。

E-mail: xyli@ioe.ac.cn(通信联系人)

划局报道了“圣剑”计划的最新进展,利用一款 21 单元的光纤激光相控阵,于 7 km 外实现了激光阵列的相干合成^[1]。在光束合成技术中,单元光束间的指向误差(或称为倾斜像差)会影响合成效果^[2-4],其来源主要包括 2 个方面:1) 大气湍流效应,随着湍流的强弱变化,光束指向误差的特征频率可达百赫兹量级;2) 重力、震动以及热效应等导致的机械形变,其特征频率一般为亚赫兹量级,但其引起的光束指向误差幅值较大,有可能会对光束合成系统造成严重危害。

结合光纤激光的特性及对光束指向误差的操控需求,美国的 Vorontsov 团队于 2005 年提出了自适应光纤准直器(AFOC)^[5],目前已在“圣剑”计划的光纤激光相控阵中得到了实际应用^[6]。中国科学院自适应光学重点实验室于 2011 年研制出同类器件,并基于此实现了光纤激光合成中的阵列光束倾斜像差校正^[7-10]。当前,基于桶中功率(PIB)评价函数的随机并行梯度下降(SPGD)算法被广泛用做光束合成时的指向误差控制策略^[6-8,11]。而文献[9]指出,当合成光束间的指向误差较大时,基于 PIB 评价函数的 SPGD 控制策略无法实现稳定闭环,提出了基于可变 PIB 评价函数的 SPGD 控制策略。文献[10]将合成光束远场发散角作为 SPGD 算法的评价函数,实现了大指向误差下的 7 路光纤激光合成。但是,文献[9-10]中单元光束的输出功率仅为 2 W。

本文将介绍百瓦量级自适应光纤准直器的研究进展,搭建了 2 路光纤激光的指向操控实验平台,给出了合成光束间大指向误差的界定,分别采用基于可变 PIB 评价函数和合成光束发散角评价函数的 SPGD 控制策略,进行 200 W 合成功率的非相干合成实验研究,为大指向误差下的大功率光纤激光合成提供参考。

2 实验方案

自适应光纤准直器是光纤自适应光学技术中实现激光由光纤波导至自由空间传输变换及指向操控的关键器件。自适应光纤准直器由传能光纤、基座、两对双压电驱动器、柔性十字梁及准直透镜构成,其工作原理如图 1 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, $\varphi \approx \Delta x/f$ 。

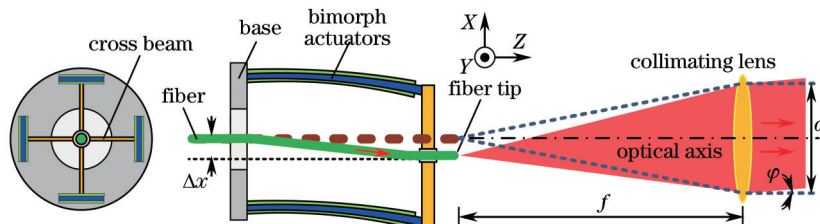


图 1 自适应光纤准直器的结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of adaptive fiber-optic collimator

所研制的自适应光纤准直器为百瓦量级,所选光纤为 25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 大模场双包层光纤,纤芯数值孔径 $NA=0.06$ 。根据经验公式^[12],光纤准直器的准直光束口径 $d \approx 1.5 \times NA \times f$,准直透镜的焦距 $f=150 \text{ mm}$,故 d 约为 13.5 mm。对器件的驱动电压-准直光束偏转量特性进行了测试,如图 2 所示。器件可承载的驱动电压在 $-500 \sim 500 \text{ V}$ 之间,在 $\pm 400 \text{ V}$ 驱动电压下,实现了 $\pm 0.3 \text{ mrad}$ 的准直光束偏转量,偏角变化量约为 $0.75 \mu\text{rad}/\text{V}$ 。

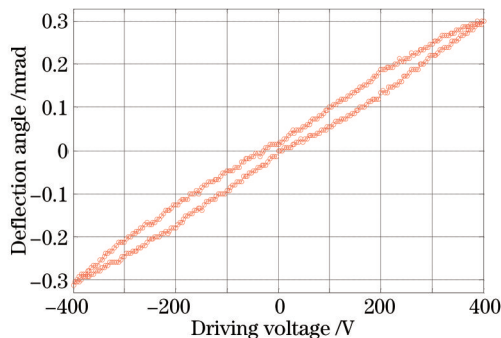


图 2 驱动电压-准直光束偏转量特性曲线

Fig.2 Deflection angle of the AFOC as the function of applied driving voltage

器件的一阶谐振频率约为 1.8 kHz。

图 3 为基于 2 路自适应光纤准直器的 200 W 激光非相干合成实验平台的示意图。种子激光器的输出功率为 20 mW,工作波长为 1064 nm。种子激光分别经光纤放大器(FA)三级功率放大后输出 100 W 的激光功率,再分别连接至 2 路自适应光纤准直器后实现激光束发射。2 路准直激光分别经高反镜(HR)透射、棱镜反射后实现空间密排,再经合束透镜(lens)变换至远场,合束透镜的焦距为 1.5 m。合成光束的远场光斑图像由高速数字 CMOS 相机(COMS 为互补金属氧化物半导体)采集,所用靶面大小为 256×256,像素尺寸为 10.8 μm×10.8 μm。图像信息传输至电脑,根据不同的控制模式计算出远场光斑的桶中功率 P_{PIB} 、远场发散角等信息,并产生相应的电压控制信号,由高压放大器(HVA)放大,驱动自适应光纤准直器,实现对光束指向误差的闭环控制。PIB 的计算公式表示为: $P_{PIB} = \iint_S I(x,y)dx dy$, 其中, I 代表了远场光斑图像的灰度值, S 决定了“圆桶”的范围。2 路准直激光束经高反镜反射后传输至功率计,实时测试光功率值。图 3 中的小插图为百瓦量级自适应光纤准直器的实物照片。需要特别指出的是,本实验方案是在缺少合适的大口径高反射率平面镜的情况下,为了研究高功率激光指向误差校正方法的可行性而提出的;在实际应用时,需要用大口径高反镜将棱镜反射后的密排激光阵列分光,高功率的反射光用于合成,低功率的透射光用于闭环控制。

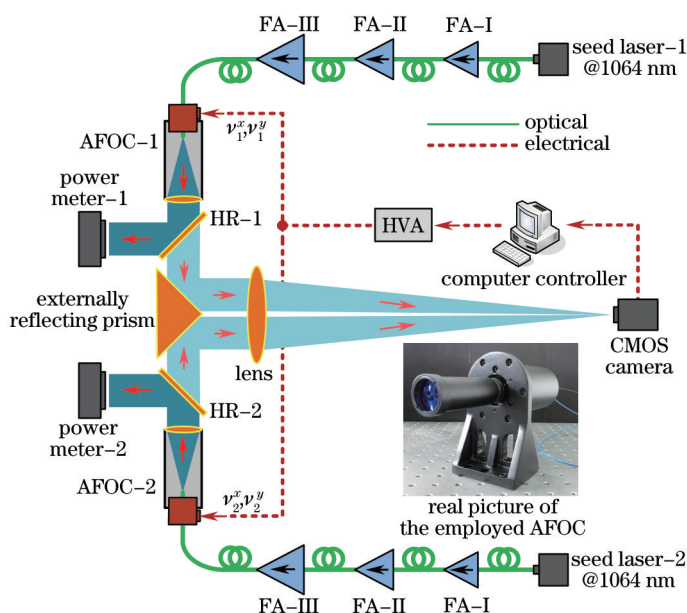


图 3 2 路自适应光纤准直器的非相干合成方案图

Fig.3 Incoherent beam combining setup with two adaptive fiber-optic collimators

在大功率光束合成时,由装调误差、热形变效应等导致的合成光束指向误差具有变化慢、幅值大的特点。本实验中,开环时的远场光斑分布如图 4 所示。单元光束的远场发散角约为 192 μrad,而两光束中心对应的发散角约为 537 μrad,是单元光束发散角的 2.8 倍。由文献[9]可知,当两光束中心对应的发散角为单元

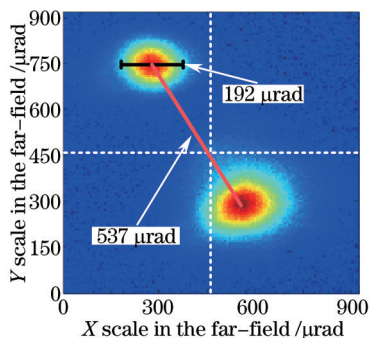


图 4 开环时,大指向误差下的合成光束远场曝光图

Fig.4 Far-field exposure pattern of the combined beams in open loop with big pointing error

光束发散角2倍以上时,基于PIB的SPGD控制策略无法实现稳定的倾斜闭环。本文作如下定义:如果2光束中心对应的发散角为单元光束发散角2倍以上,则可认为合成光束间存在着大指向误差。在这种情况下,需要采用改进的SPGD控制策略(如可变PIB评价函数或合成光束发散角评价函数)实现倾斜闭环。基于以上2种评价函数的SPGD控制策略的具体描述参见文献[9-10],在此不再陈述。

3 实验结果

基于图4所示开环时的合成光束远场分布,进行了大指向误差下2路光纤激光的200 W非相干合成实验。受限于CMOS相机帧速,SPGD算法的迭代速率约为250 Hz,但足以校正由亚赫兹量级热形变效应等造成的光束指向误差。

以基于可变PIB评价函数的SPGD算法为控制策略,进行了倾斜闭环实验研究。具体步骤表示如下:1)相机采集1帧远场光斑图像,并对图像做阈值处理;2)计算图像中合成远场光斑相对于目标点的最大发散角 Φ ;3)判断 Φ 是否满足系统的控制精度要求,如果满足,回到步骤1;4)根据 Φ 设置可变PIB的“圆桶”半径 R , $R=\Phi-r$,其中 r 为单光束的远场发散角;5)利用SPGD算法优化PIB值,使其最大化,当到达设定的迭代次数后回到步骤1。图5为可变PIB评价函数随时间的优化迭代曲线,实验过程共重复了9次。图5中红色粗线为9条迭代曲线的平均,约在2.5 s后实现了评价函数的闭环收敛。图5中的插图显示了开环时和闭环后的圆桶区域变化情况。图6为实验中记录的以单光束发散角为圆桶直径的PIB变化曲线,其中红色粗线为9条变化曲线的平均值曲线,闭环后的PIB评价函数约为开环时的6.2倍。实验过程中,9条PIB变化曲线的收敛情况差异较大。

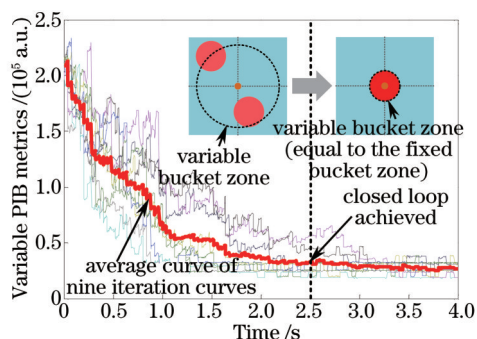


图5 可变PIB评价函数随时间的优化迭代曲线
Fig.5 Evolution curves of variable PIB metrics as the function of time

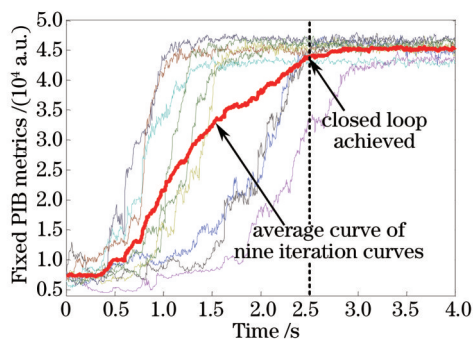


图6 以单光束发散角为圆桶直径的PIB变化曲线
Fig.6 PIB-metric curves as the function of time, where the divergence of single beam is employed as the bucket's diameter

以基于合成光束远场发散角评价函数的SPGD算法为控制策略,进行了倾斜闭环实验研究。图7为合成光束发散角评价函数随时间的优化迭代曲线,实验过程共重复了9次。图7中红色粗线为9条迭代曲线的平均值曲线,同样约在2.5 s后实现了评价函数的闭环收敛。图7中的插图显示了开环时和闭环后的合成光束

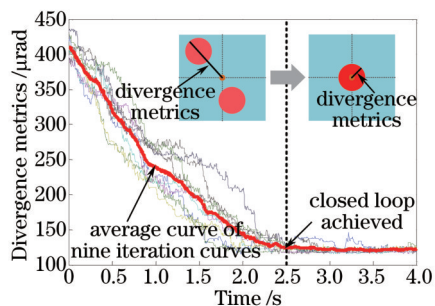


图7 合成光束发散角评价函数随时间的优化迭代曲线
Fig.7 Evolution curves of divergence metrics as the function of time

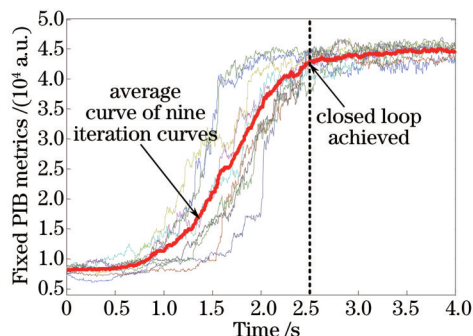


图8 以单光束发散角为圆桶直径的PIB变化曲线
Fig.8 PIB-metric curves as the function of time, where the divergence of single beam is employed as the bucket's diameter

远场发散角变化情况。图8为实验中记录的以单光束发散角为圆桶直径的PIB变化曲线,其中红色粗线为9条变化曲线的平均,闭环后的PIB评价函数约为开环时的5.4倍。实验过程中,9条PIB变化曲线的收敛情况较为一致。

开、闭环时,合成光束的远场曝光图样如图9所示。图9(a)为开环时的情形,此时2光束间存在着较大的指向误差;图9(b)和图9(c)分别为采用基于可变PIB评价函数和合成光束发散角评价函数的SPGD算法闭环后的情形。由图可知,在2种改进的SPGD控制策略下都实现了光纤激光的非相干合成,证明了控制策略的可行性。

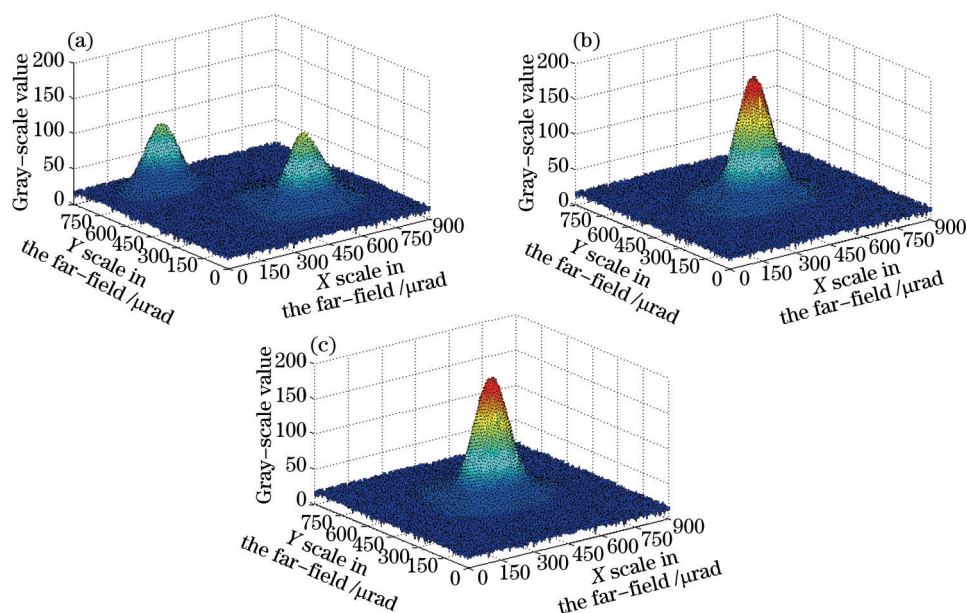


图9 合成光束的远场曝光图。(a)开环时;(b)闭环后,基于可变PIB评价函数;(c)闭环后,基于合成光束发散角评价函数

Fig.9 Exposure patterns of the combined beams in the far-field. (a) Open loop; (b) closed loop with variable PIB metrics; (c) closed loop with divergence metrics

4 结 论

针对光纤激光合成系统中光束大指向误差的闭环控制问题,以百瓦量级自适应光纤准直器为校正器件,分别利用基于可变PIB评价函数和合成光束发散角评价函数的SPGD控制策略实现了2路光纤激光的200 W非相干合成。实验结果表明,2种改进的SPGD控制策略都可在大指向误差下实现稳定的倾斜闭环,而基于光束发散角评价函数的SPGD控制策略的重复性更优;SPGD算法的迭代速率约为250 Hz,但足以校正由亚赫兹量级热形变效应等造成的光束大指向误差。本方法在实际应用中,要充分考虑光束指向误差的来源与特性,综合应用多种控制策略,实现光束合成系统的全程倾斜像差闭环控制。

参 考 文 献

- 1 V Coffey. New advances in defense applications: High-energy lasers[J]. Optics & Photonics News, 2014, 1047-6938/14/10/28/8.
- 2 G Goodno, S Weiss. Automated co-alignment of coherent fiber laser arrays via active phase-locking[J]. Opt Express, 2012, 20(14): 14945-14953.
- 3 Geng Chao, Li Xinyang, Zhang Xiaojun, *et al.*. Influence and simulated correction of tip/tilt phase error on fiber laser coherent beam combination[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(11): 114202.
耿超, 李新阳, 张小军, 等. 倾斜相差对光纤激光相干合成的影响与模拟校正[J]. 物理学报, 2011, 60(11): 114202.
- 4 Mu Jie, Jing Feng, Wang Xiao, *et al.*. Error control of piston and tilt based on SPGD in coherent beam combination[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0602002.
母杰, 景峰, 王道, 等. 相干合成中基于SPGD算法的平移误差和倾斜误差控制[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602002.
- 5 L Beresnev, M Vorontsov. Design of adaptive fiber optics collimator for free-space communication laser transceiver[C]. SPIE, 2005, 5895: 58950R.

- 6 T Weyrauch, M Vorontsov, V Ovchinnikov, *et al.*. Atmospheric turbulence compensation and coherent beam combining over 7 km propagation path using a fiber-array system with 21 sub-apertures[C]. *Imaging and Applied Optics*, 2014: PW2E. 3.
- 7 C Geng, X Li, X Zhang, *et al.*. Coherent beam combination of an optical array using adaptive fiber optics collimators[J]. *Opt Commun*, 2011, 284: 5531-5536.
- 8 C Geng, B Zhao, E Zhang, *et al.*. 1.5 kW incoherent beam combining of four fiber lasers using adaptive fiber-optics collimators[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(13): 1286-1289.
- 9 Geng Chao, Luo Wen, Tan Yi, *et al.*. Experimental study on coherent beam combination of fiber amplifiers using adaptive power-in-the-buckler cost function[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(22): 224202.
- 耿超, 罗文, 谭毅, 等. 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[J]. *物理学报*, 2013, 62(22): 224202.
- 10 C Geng, W Luo, Y Tan, *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.
- 11 X Wang, X Wang, P Zhou, *et al.*. 350-W coherent beam combining of fiber amplifiers with tilt-tip and phase-locking control[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(19): 1781-1784.
- 12 D Zhi, Y Ma, P Ma, *et al.*. Adaptive fiber optics collimator based on flexible hinges[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(24): 5434-5438.

栏目编辑: 王晓琰