

文章编号: 0258-7025(2009)03-518-07

主动相位控制光纤激光相干合成的研究

刘泽金 周 朴 侯 静 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 介绍了三种主动相位控制光纤激光相干合成方案,并分别利用这三种方案实现了 3 路瓦量级光纤放大器的相干合成。根据理论分析和实验研究的结果,对三种方案各自的优缺点进行了比较分析。对光纤激光相干合成在工程实际中面临的一些共性因素的影响进行了简单讨论。

关键词 激光器; 光纤激光器; 相干合成; 相位控制; 外差法; 多抖动法; 随机并行梯度下降算法

中图分类号 TN 24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0518

Research of Coherent Beam Combining Using Actively Phase-Controlling

Liu Zejin Zhou Pu Hou Jing Xu Xiaojun

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Three active phase control configurations involved in coherent beam combining of fiber lasers are introduced, and coherent beam combining of three W-level fiber amplifiers based on each phase control configuration are experimentally implemented. Comparative study and analysis on these configurations is presented based on theoretical analysis and experimental investigation. The fill factor issue involved in practical engineering is also briefly discussed.

Key words lasers; fiber laser; coherent beam combining; phase controlling; heterodyne detecting; multi-dithering; stochastic parallel gradient descent algorithm

1 引 言

由于掺杂光纤的非线性效应、热损伤等物理机制的限制,单根光纤激光器的输出功率有限。为获取高的激光输出功率同时保持良好的光束质量,一种技术途径是采用激光器相干合成的方法,即激光器采用多模块结构,通过控制各单元激光器输出激光的相位达到锁相输出,实现光束的相干合成^[1]。合成后的光束功率大、光束质量好,可以达到近衍射极限,能实现远距离传输。另一方面,将多路光束通过各自独立的小口径光束定向器发射,也有望克服传统光束定向器体积庞大、造价昂贵、不能快速随机指向等缺陷。光纤激光的相干合成技术在国防和民用的多个领域都将有广阔的应用前景,目前国内外多家研究机构都开展了相关研究,比较常用的方法有多芯光纤输出端直接耦合法^[2]、自组织相干合成^[3~7]以及基于主振荡功率放大器(MOPA)结构的

主动相位控制方案^[8~20]等。迄今为止,最高相干合成输出是由基于 MOPA 结构的主动相位控制方案获得^[8,9,16]。在 MOPA 结构中,通常采用的主动相位控制方法主要有三种,即外差法^[8~14]、多抖动法^[15~17]以及随机并行梯度下降法(SPGD)^[18~20]等。本文介绍三种主动相位控制方法的基本原理、研究进展,报道利用这三种方法进行三路光纤瓦量级光纤激光相干合成的实验结果,并对这些方案的优缺点及可扩展性进行分析。

2 主动相位控制方法

2.1 外差法

2.1.1 研究进展

利用外差法主动相位控制进行相干合成是目前研究最为热门的方法,国外多家研究机构,如诺格(Northrop Grumman)公司^[8~10]、麻省理工学院^[11]、

收稿日期:2008-12-01; 收到修改稿日期:2008-12-18

作者简介:刘泽金(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术等领域的研究。E-mail:zejinliu@vip.sina.com

英国国防部下属的国防科技发展公司(QinetiQ 公司)^[12]等,均开展了外差法光纤激光相干合成的理论与实验研究。其中诺格公司于 2006 年实现了 4 路光纤激光相干合成^[8],总功率为 470 W,是目前光纤激光相干合成领域的最高输出功率。2006 年,诺格公司还利用外差法实现了两路固体激光相干合成,总的输出功率达到了 19 kW^[9]。该方案被认为有望在近年内实现 100 kW 的相干合成激光输出。

外差法相干合成的基本原理如图 1 所示,主振荡激光器(MO)作为种子激光器,输出的光束经分束器分为 N 路,每一路均各含有一个相位调制器(PM)和一个光纤放大器(AMP),放大器的后端接隔离器(Iso)加以保护。同时还分出一路作为参考光,参考光光路上设置移频器(FS)。多路光纤放大器的光束通过准直器阵列(CO)输出。阵列光束经过分光镜后,一部分与参考光干涉,通过外差法探测干涉信号^[8~14],可以实时检测到多路光纤放大器的相位变化情况,并为每一路的相位校正器件提供控制电压,实现对光纤放大器相位变化的实时补偿,确保准直器阵列输出的光束相位保持一致。阵列光束经过分光镜的另一部分光束经过透镜聚焦,CCD 放置在透镜的后焦平面上,用来观察光束的远场图样及相干合成的效果。

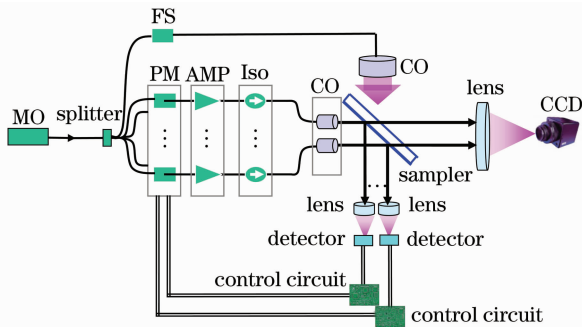


图 1 外差法相干合成方案基本原理

Fig. 1 Basic setup for coherent beam combining using heterodyne detecting

利用外差法实现了 3 路瓦量级光纤激光的相干合成^[13,14]。实验采用全保偏光路,主振荡激光器是商用的分布反馈式保偏光纤激光器,它的中心波长为 1083 nm,线宽小于 1 MHz,相位控制用 LiNbO₃ 相位调制器实现,所有调制器的半波电压均在 3.5 V 左右。主振荡的光束通过保偏光纤分束器后被分为 4 路,1 路参考臂,3 路信号臂。参考臂中的光被所加的保偏光纤声光移频器频移 40 MHz,3 路信号臂中各有一个保偏光纤相位调制器以及一个输出功率为 0~1 W 连续可调的保偏光纤放大器,准直输出

后的光束直径为 0.5 mm。定义光斑可见度 $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ 。系统开环时,远场光斑为动态、模糊干涉条纹,如图 2(a)所示,条纹可见度为 6%;系统闭环运行时,远场光斑为稳定、高对比度干涉条纹,如图 2(b)所示,条纹可见度达到 48%。实验中 3 路光束是线性一字排开,因此得到的干涉图样是类似的条纹图形。

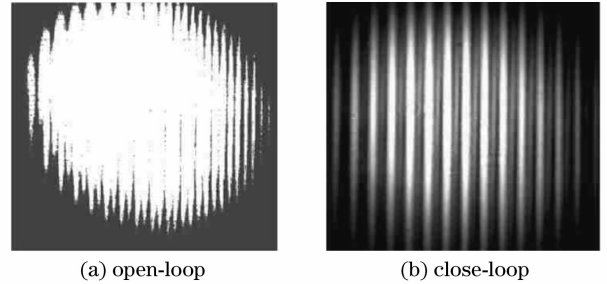


图 2 外差法相位控制合成光束远场光斑图样
Fig. 2 Far-field intensity pattern of combined beam using heterodyne detecting

2.1.2 评论

用外差法进行光纤激光相干合成,当合成光束的路数增多时,不论在光学单元,还是在电学单元增加的都只是相应独立的系统,因此如果继续增加相干合成的单元数到 4 路,5 路乃至更多路,从理论上都是可行的。但是外差法要求参考光和信号光的空间波前匹配,即要求空间准直和共轴,波面吻合垂直入射至探测器表面,为了获得最佳信噪比,参考光和信号光的光斑直径最好相等。当合成光束路数增多时,参考光束功率和光束直径的需求不断增加,并且需要提供相应数目的探测器、解调电路等,对信号光阵列准直输出系统和探测器的排列精度也有着严格的要求。因此整个系统调节难度和复杂度也都会大大增加^[21,22]。

2.2 多抖动法

2.2.1 研究进展

多抖动法是美国空军研究实验室 T. M. shay 等^[15~17]提出的一种新型相位控制方法,与外差法相比,该方法不需要参考光,并且只需要一个光电探测器,利用电学相关检测的方法即可分离出多路相位控制信号,因此也备受关注。目前美国空军研究实验室已经利用多抖动法实现 9 路光纤激光相干合成,总的输出功率超过了 100 W^[16]。多抖动法相干合成的基本原理如图 3 所示,主振荡激光器输出激光经分束器分为 N 路,每一路均各含有一个相位调制器和一个光纤放大器,各路分别进行不同频率的

射频(RF)调相后经放大器和准直器阵列输出。阵列光束经过分光镜后被分成两部分,一部分光束经透镜聚焦于光电探测器上,紧贴于探测器前端放置小孔光阑,用于控制信号探测,通过信号处理电路(signal processing block)分离出每一路的相位误差信号,作为控制信号反馈给相位调制器,实现各光束的相干合成。另一部分为输出光束,经过透镜聚焦于 CCD 探测面上,用来观察光束的远场图样及相干合成的效果。示波器用于观察相干合成光束的主瓣内部包含的能量随时间的变化关系。

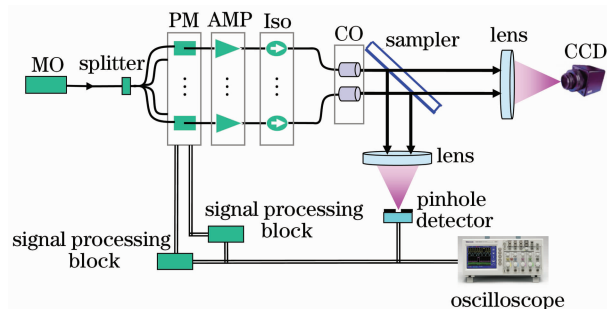


图3 多抖动法相干合成方案基本原理

Fig. 3 Basic setup for coherent beam combining using multi-dithering technique

利用多抖动法也实现了 3 路瓦量级光纤放大器的相干合成。与外差法的实验不同,多抖动法的实验中去掉了参考光路,并且将准直器阵列排成品字形,以期在远场获得二维光斑分布。同时开启三个放大器,各路光纤放大器输出功率均为 1 W。系统处于开环状态时,示波器显示合成光束目标圆孔内包含的能量随时间变化如图 4(a)所示,小孔内能量在最大值到最小值之间不断起伏变化,远场光强分布形态为动态、模糊的光斑,长时间曝光图像如图 4(b)所示。

对两路光束分别进行了 70 kHz 和 100 kHz 的正弦调制,利用 Stanford Research System SR830 数字信

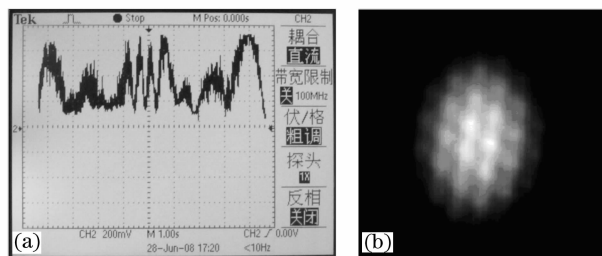


图4 系统开环时的实验结果。(a) 小孔内能量随时间的变化曲线;(b) 远场光斑的长时间曝光图样

Fig. 4 Experimental result in open-loop. (a) Dependence of energy encircled in the pinhole on time evolution;(b) long-exposure far-field pattern

号处理器(DSP)数字锁相放大器实现相位误差信号的分离,并分别施加至两路 LiNbO₃ 相位调制器上,实现系统闭环。示波器显示合成光束目标圆孔内包含的能量随时间变化如图 5(a)所示,小孔内能量在最大值到最小值之间不断起伏变化,远场光强分布形态为稳定、清晰的高对比度光斑,长时间曝光图像如图 5(b)所示,计算此时光斑对比度达到了 81%。

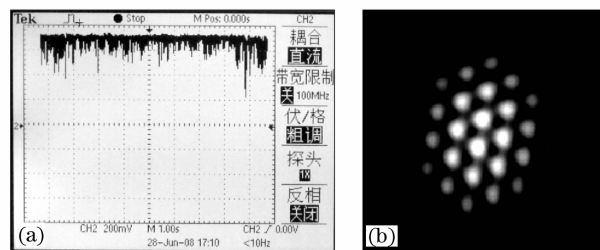


图5 系统闭环时的实验结果。(a) 小孔内随时间的变化曲线;(b) 远场光斑的长时间曝光图样

Fig. 5 Experimental result in close-loop. (a) Dependence of energy encircled in the pinhole on time evolution;(b) long-exposure far-field pattern

2.2.2 评论

与使用外差法的实现方案相比较,多抖动法只需一个光电探测器,降低了光束准直输出系统和探测器的排列要求,使实验光路更加简单;不需要另外的参考光束,避免了参考光束光强相对较弱带来的检测问题。但是,多抖动法存在两个不足之处:1) 由于各光束的相位扰动都是随机的,于是对于一个有 N 路光束参与合成的系统而言,其相位噪声的特征频率将随着合成光束路数的增加而增加;2) 为了有效控制相位噪声,当参与合成光束数目增加时,相位调制部分的载波频率也必须随之增加,保证相位控制系统的带宽高于相位噪声的特征频率,这将给电路制作带来很大困难,甚至无法实现。光电探测器能够探测的上限光功率将成为另一个限制因素。由于光电探测器存在上限光功率,所以随着参与合成的光束数目的增加,探测器得到的每一束光的光功率必须相应减小,此时通过射频调相体现在光强上的相位差信号是很微弱的,当这个信号比探测器或者信号处理电路的灵敏度小时,系统将无法正常工作^[23]。

2.3 SPGD 法

2.3.1 基本原理

SPGD 算法是在同时扰动随机近似(simultaneous perturbation stochastic approximation, SPSA)控制算法基础上开发的自适应光学校正技术,它实际上也

是一种“盲优化”方法。SPGD 算法使用优化算法直接对系统性能指标进行优化,与以往的多元高频振动及爬山法比起来,具有实现容易、控制参数的所有维并行计算等特点,近年来在自适应光学技术和自适应光学系统中得到了广泛的运用^[24~28]。光纤激光的相干合成在本质上是一种只需校正活塞相差的自适应光学。美国马里兰大学 Ling Liu^[18,19]和麻省理工学院的 Jan E. Kansky 等^[20]已经分别实现了基于 SPGD 算法的多路光束相干合成,但都限于种子光分束后直接合成,各路光束没有经过放大,相位起伏是由于各路光纤长度不同而引起的静态噪声,并没有引入放大器带来的动态相位噪声。迄今为止,国外尚未有公开文献报道基于 SPGD 算法多路光纤放大器相干合成的实验。

利用 SPGD 算法实现 N 路光纤放大器相干合成的系统结构如图 6 所示。光束经过准直器阵列输出,阵列光束经过分光镜后被分成两部分,一部分光束经透镜聚焦,光电探测器放置于透镜的后焦平面上,紧贴于探测器前端放置小孔光阑,信号处理电路执行 SPGD 算法并将计算得到的相位控制信号施加给相位调制器用于相位控制,完成系统闭环。系统的工作过程为:首先定义探测器探测到的能量为评价函数 J 。主动向各路相位调制器施加随机扰动电压 δu ,观察随机扰动电压带来的评价函数变化量 ΔJ ,通过运行 SPGD 算法得到下一时刻施加在相位调节器上的电压信号 u 并作用于相位调制器,如此迭代进行,直至 J 不再变化,算法收敛。定义评价函数 J 的变化量 $\Delta J^{(k)} = \Delta J_+^{(k)} - \Delta J_-^{(k)}$,其中 $\Delta J_-^{(k)} = J(u^{(k)} - \Delta u^{(k)}) - J(u^{(k)})$, $\Delta J_+^{(k)} = J(u^{(k)} + \Delta u^{(k)}) - J(u^{(k)})$,其中上标 (k) 表示第 k 次迭代。施加在相位调节器上的电压信号 u 的迭代计算公式为 $u^{(k+1)} = u^{(k)} + \gamma \Delta u^{(k)} \Delta J^{(k)}$, $\Delta u^{(k)} = \{\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_n\}^{(k)}$ 为第 k 次迭代时施加的扰动电压向量, γ 为增益系数。在实际应用中,如使目标函数向极大方向优化, γ 取正值;反之, γ 取负。算法的具体执行过程(第 k 次迭代时)为:1) 随机生成扰动向量 $\Delta u^{(k)} = \{\Delta u_1, \Delta u_2, \dots, \Delta u_n\}^{(k)}$,各 Δu_i 相互独立且同为伯努利分布,各分量幅值相等,取正负值的概率同为 50%;2) 计算目标函数的变化量 $\Delta J^{(k)}$;3) 更新控制参数,进行第 $k+1$ 次迭代,直至满足算法结束条件。通过向各路相位调制器施加随机扰动电压并计算评价函数 J 变化量,能够不断更新施加在各路相位调制器上的控制电压信息,直至评价函数 J 取全局极大值,对应 N 路激光相位一致的情形。

这样就达到了锁相运行,实现了 N 路激光的相干合成输出。

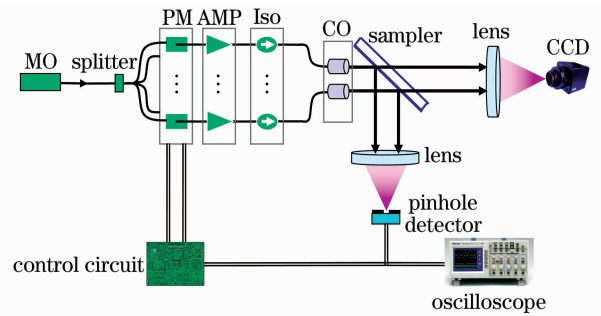


图 6 利用 SPGD 算法实现光纤放大器相干合成的系统结构

Fig. 6 System setup for coherent beam combining of fiber amplifiers using SPGD algorithm

进行了基于 SPGD 算法 3 路瓦量级光纤放大器相干合成的实验。探测器探测到的信号经 A/D 转换后输入 DSP, DSP 根据采集到的信号执行 SPGD 算法,并将计算得到的相位控制信号经 D/A 转换和放大电路后施加给 LiNbO₃ 相位调制器用于相位控制,完成整个系统的闭环。相干合成的效果可由示波器和 CCD 同时观测。首先分别开启单独光纤放大器至 1 W 输出功率,调节光电探测器的增益,使得单路激光输出时光电探测器输出的直流电压为 1 V。同时开启三个放大器,各路光纤放大器输出功率均为 1 W 时,示波器显示合成光束目标圆孔内包含的能量随时间变化如图 7(a)所示。整个系统处于开环状态,小孔探测到的电压值(即 J 值)在 0~9 V 之间不断变化,在 40 s 的观察时间内,小孔探测到电压的平均值为 3.09 V,对应于非相干合成的效果。此时 CCD 观测到的远场光斑处于不断变化中,图 7(b)是 CCD 长曝光的图样。小孔内能量的起伏是由于三路光纤放大器输出光束的相位不一致,并随时间变化引起的。

实验中对三路光纤放大器出射光束的其中两路进行控制以实现系统闭环。利用主频为 25 MHz 的 DSP 执行 SPGD 算法。经测试,算法产生控制电压的速度达到了 16500 次/s。当执行 SPGD 算法 ($\gamma = 0.5$, $|\delta u_i| = 0.1$),系统处于闭环状态时,示波器显示小孔内包含的能量随时间变化如图 8(a)所示,在 40 s 的长时间观察范围内, J 值基本稳定在极大值 9 V 附近,小孔探测到电压的平均值为 8.10 V,系统闭环将目标圆孔内的能量提高了 2.62 倍,此时远场光斑基本稳定。图 8(b)是 CCD 长曝光的图样,此时远场光斑的可见度为 85%。需要说明的是,在系统执行 SPGD 算法、处于闭环状

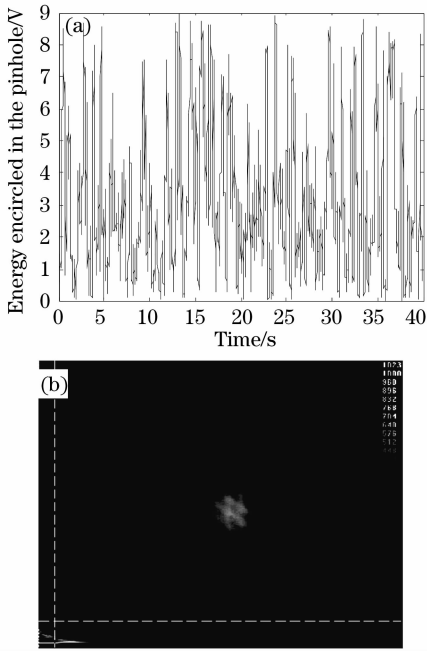


图 7 系统开环时的实验结果. (a) 小孔内能量随时间的变化曲线; (b) 远场光斑的长时间曝光图样

Fig. 7 Experimental result in open-loop. (a) Dependence of energy encircled in the pinhole on time evolution (b) long-exposure far-field pattern

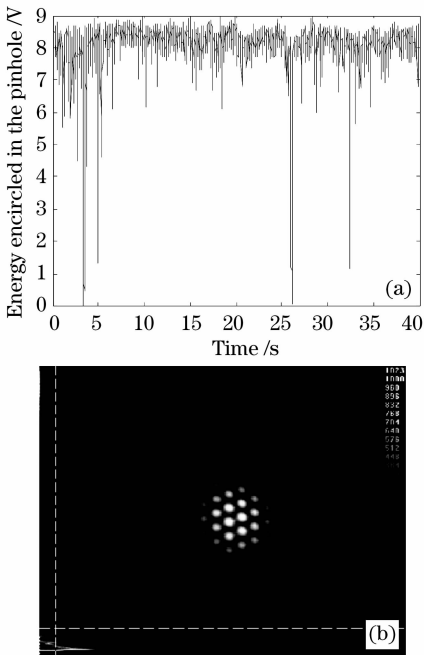


图 8 系统闭环时的实验结果. (a) 小孔内随时间的变化曲线; (b) 远场光斑的长时间曝光图样

Fig. 8 Experimental result in close-loop. (a) Dependence of energy encircled in the pinhole on time evolution; (b) long-exposure far-field pattern

态时, J 值仍在部分时间内处于 0。这是因为整个系统不对光束的相位进行探测, 而是利用算法产生

相位控制信号, 而相位调制器的行程有限(往往只有 $3 \sim 4 \lambda$), 当算法产生的相位控制信号大于相位调制器的行程时, 相位调制器将被重置^[12], 导致系统失锁。

2.3.2 评 论

对于 N 路子光束的相干合成, 外差法需要 N 个光强探测器与 N 个相位解调电路以完成系统的闭环控制; 多抖动法需要 1 个光强探测器以及 N 个相位解调电路以完成系统的闭环控制; 基于 SPGD 算法的 N 路子光束的相干合成系统无需相位解调电路, 只需 1 个光强探测器, 控制信号由计算机执行算法产生。相比之下, 采用 SPGD 算法有望在实现多路光纤激光相干合成的同时不增大系统的复杂性, 是一种较有实用前景的相干合成方案, 有望在新型高能激光系统结构中得到应用^[24]。但是, 以往的模拟计算结果表明, SPGD 算法的收敛速度将随着合成光束路数的增多而降低^[29], 因此整个相位控制系统的带宽会随着合成光束路数的增多而减小。而 SPGD 算法的执行速度受限于硬件的发展水平, 目前最先进的 SPGD 算法执行电路每秒能执行 95000 次运算^[19], 因此利用 SPGD 算法合成多路光纤激光时, 算法的执行速度将是制约合成效果的关键因素。

3 综合分析

由第二部分的分析可知, 采用外差法扩展至更多路时不存在理论上的制约, 但是系统复杂, 调节难度大; 采用多抖动法系统较为紧凑, 扩展至更多路时不需增加探测器数目, 系统调节简单, 但是扩展至更多路时, 各路光束的射频调制频率增大, 电路制作困难。探测器的信噪比降低, 不利于信息提取; 采用 SPGD 法系统紧凑, 扩展至更多路时不需增加光学单元和电学单元, 调节简单, 但是算法的收敛速度将随着合成光束路数的增多而降低, 算法的执行速度受限于硬件的发展水平。可以看出, 这三种主动相位控制方案都没有同时满足可扩展性和系统复杂度之间的权衡。在实际应用中, 应根据不同场合寻找最佳的匹配方案。当然, 也应继续探索同时满足可扩展性和系统复杂度要求的新型主动相位控制方案。总体说来, SPGD 法主动相位控制系统紧凑, 调节简单, 执行算法的硬件运行速度仍有很大的提升空间, 并且基于 SPGD 算法的 SPGD 法自适应光学技术已经使得自适应光学系统实现小型化、紧凑化^[30], 因此, 该方法更适合于可扩展、可定标放大高能激光系统的设计, 有望在未来目标在回路(Target

in the loop)高能激光系统^[31]中得到应用。

需要说明的是,上述三种主动相位控制方法除了各自本身存在的缺点外,在工程实际中,还有一些共性因素影响这三种方法相干合成的效果:

首先是单路高功率窄线宽光纤放大器的设计与搭建。主动相位控制光纤激光相干合成的阵列单元是光纤放大器,并且为了追求理想的相干合成效果,对放大器的输出线宽还有一定的要求,这是与被动相位控制光纤激光相干合成的不同之处^[3~7]。目前单根单模光纤激光器的输出功率不断提升,但单根窄线宽光纤放大器的输出功率由于受到非线性效应的影响,输出功率仍限于 500 W 量级^[21,32]。为了减少阵元数目和系统的复杂度,单路高功率窄线宽光纤放大器的设计与搭建是采用本文提及的三种主动相位控制方法获得高功率、高光束质量激光输出的基础所在。

其次是相位噪声^[11,12]的控制,这也是采用主动或被动相位控制获得相干合成光束输出需要解决的共同问题。以往的测量结果表明,光纤放大器的相位噪声强度会随着激光功率的提高而增强。当上述三种主动相位控制方法用于高功率光纤激光相干合成时,控制系统的有效带宽也需随之提高。

最后是填充因子的影响。填充因子指的是近场激光阵列有效出光面积占整个孔径的比率,文献^[10,33~35]明确指出填充因子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,实际系统填充因子一般小于 1。文献^[8]报道的 4 路百瓦级光纤放大器相干合成的实验受限于填充因子,使得远场中央主瓣内能量仅为激光束总能量的 63% 左右。目前国内开展的相干合成实验尚未对填充因子给予足够的重视,在作者的实验系统中填充因子也很小,导致三种主动相位控制方法相干合成的主瓣内能量均很少。在相干合成高能光纤激光系统中,需要研究相应的孔径填充技术尽可能增大激光阵列的填充因子。

4 结 论

基于 MOPA 结构的主动相位控制方案是获得高功率、高光束质量激光输出的有效途径,本文介绍了三种主动相位控制方法的基本原理、研究进展,报道了利用这三种方法进行 3 路光纤瓦量级光纤激光相干合成的实验结果,并分析了这些方案的优缺点及可扩展性,指出了工程实际中影响主动相位控制

相干合成效果的一些共性因素。接下来将对单路高功率窄线宽光纤放大器、光纤阵列填充因子等因素进行深入研究,并进一步优化主动相位控制系统的设计,开展更多路数高功率光纤放大器相干合成的实验。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, **11**: 567~577
- 2 Yanming Huo, Peter K. Cheo, George G. King. Fundamental mode operation of a 19-core phase-locked Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**: 6230~6239
- 3 Akira Shirakawa, Tomoharu Saitou, Tomoki Sekiguchi *et al.*. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [J]. *Opt. Express*, 2002, **10**: 1167~1172
- 4 E. J. Bochove, P. K. Cheo, G. G. King. Self-organization in a multicore fiber laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1200~1202
- 5 Bing He, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 113-W in-phase mode output from two ytterbium-doped large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 412~414
- 6 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun *et al.*. Phase-locking and high coherent power output of two fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1154~1158
何 兵,楼祺洪,周 军等.两个光纤激光器的相位锁定及高相干功率输出 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1154~1158
- 7 B. Lei, Y. Feng. Phase locking of an array of three fiber lasers by an all-fiber coupling loop [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**: 17114~17119
- 8 Jesse Anderegg, Stephen Brosnan, Eric Cheung *et al.*. Coherently Coupled High Power Fiber Arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 9 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**: 1247~1249
- 10 Eric C. Cheung, James G. Ho, Gregory D. Goodno *et al.*. Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**: 354~356
- 11 S. J. Augst, T. Y. Fan, A. Sanchez. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**: 474~476
- 12 D. C. Jones, C. D. Stacey, A. M. Scott. Phase stabilization of a large-mode-area ytterbium-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**: 466~468
- 13 R. Xiao, J. Hou, M. Liu *et al.*. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**: 2015~2022
- 14 Xiao Rui, Hou Jing, Jiang Zongfu *et al.*. Experimental research of coherent combining of three fiber amplifiers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12): 6464~6469
肖 瑞,侯 静,姜宗福等.三路光纤放大器相干合成技术的实验研究 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(12): 6464~6469
- 15 T. M. Shay, V. Benham, J. T. Baker *et al.*. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(11): 12022~12027
- 16 Thomas M. Shay, Vincent Benham, Jeffrey T. Baker *et al.*. Self-synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**: 480~486

- 17 Thomas M. Shay. Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(11): 12188~12195
- 18 Ling Liu, Mikhail A. Vorontsov. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller[C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 58950P
- 19 Ling Liu, Mikhail A. Vorontsov, Ernst Polnau *et al.*. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners[C]. *SPIE*, 2007, **6708**:67080
- 20 Jan E. Kinsky, Charles X. Yu, Daniel V. Murphy *et al.*. Beam control of a 2D polarization maintaining fiber optic phased array with high-fiber count[C]. *SPIE*, 2006, **6306**:63060G
- 21 Jens Limpert, Fabian Röser, San Klingenberg *et al.*. The rising power of fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**:537~543
- 22 Qihong Lou, Jun Zhou, Bing He *et al.*. Fiber lasers and their coherent beam combination [J]. *Optics Photonics News*, 2008, **19**(5):46~51
- 23 Ma Yanxing, Si Lei, Xu Xiaojun. Comparison of two phase-locking methods in optical coherent combining [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1):110~113
马阎星, 司磊, 许晓军. 光纤激光相干合成中两种相位控制方法的比较 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1):110~113
- 24 M. A. Vorontsov. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): system architecture and wavefront control concept [C]. *SPIE*, 2005, **5895**: 589501
- 25 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**:907~909
- 26 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**: 1440~1453
- 27 Liang Yonghui, Wang Sanhong, Long Xuejun *et al.*. Experimental explorations of the laser beam cleanup system based on stochastic parallel-gradient-descent algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4):613~618
梁永辉, 王三宏, 龙学军 等. 随机并行梯度下降激光束净化实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4):613~618
- 28 Yang Huizhen, Chen Bo, Li Xinyang *et al.*. Experimental demonstration of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 205~210
杨慧珍, 陈波, 李新阳 等. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 205~210
- 29 Zhou Pu, Liu Zejin, Ma Yanxing *et al.*. Simulation and experimental investigation on coherent beam combining of two fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, accepted
周朴, 刘泽金, 马阎星 等. 随机并行梯度下降算法两路光纤放大器相干合成的模拟与实验研究[J]. *光学学报*, 已录用
- 30 Justin Mansell, Robert Praus, Morris Maynard *et al.*. Progress Toward Compact Low-Cost Adaptive Optics Systems [R]. Available on <http://www.mza.com>
- 31 Piotr Piatrou, Michael Roggemann. Beaconless stochastic parallel gradient descent laser beam control: numerical experiments[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(27): 6831~6842
- 32 Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Single-frequency, single-mode, plane-polarized ytterbium-doped fiber master oscillator power amplifier source with 264 W of output power [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(5): 459~461
- 33 M. A. Vorontsov, S. L. Lachinova. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators. I. Basic considerations for analysis [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**:1949~1959
- 34 Phillip Sprangle, Joseph Penano, Bahman Hafizi *et al.*. Incoherent combining of high-power fiber lasers for long-range directed energy applications[C]. // 2006 SSDLTR Proceedings, 2006
- 35 Tang Qianjin, Shi Xiangchun, Hu Qiuquan. Effect of the filled factor on the far-field profiles of laser beam combination[J]. *Journal of propulsion technology*, 2007, **28**(5): 566~569
唐前进, 施翔春, 胡企铨. 填充因子对激光组束远场功率分布的影响[J]. *推进技术*, 2007, **28**(5): 566~569