

❖ 特约专栏 ❖

基于光纤自适应操控的激光相控阵技术研究进展(特邀)

耿超^{1,2}, 李枫^{1,2}, 黄冠^{1,2,3}, 杨燕^{1,2,3}, 刘家盈^{1,2,3}, 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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 当前, 基于多光束相干合成的激光相控阵技术面临着实际湍流环境下远距离传输的应用需求和挑战, 需同时校正系统内部光源噪声和外部动态湍流像差, 并解决远距离传输光延迟和系统规模增大导致的有效带宽急剧下降的问题。现有的技术手段如目标在回路技术和延迟 SPGD 算法无法应对湍流带来的动态倾斜像差, 而这一点对在远场目标处获得高质量相干合成光束至关重要。文中介绍了中国科学院光电技术研究所多孔径激光传输控制技术上的最新研究进展, 新技术实现了对光纤阵列激光出射光束倾斜像差的并行和高效校正, 并提出了基于主动波前测量的光纤激光阵列外部像差预补偿校正的方法, 为光纤激光相控阵技术的实际大气传输应用打下基础。

关键词: 激光相控阵; 收发一体控制; 多孔径波前测量; 湍流控制

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0103003

Research progress of laser phased array technique based on fiber adaptive manipulation(Invited)

Geng Chao^{1,2}, Li Feng^{1,2}, Huang Guan^{1,2,3}, Yang Yan^{1,2,3}, Liu Jiaying^{1,2,3}, Li Xinyang^{1,2}

- (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;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Laser phased array technique on coherent combining of multiple beams faces challenges when applied in propagation through the long-range atmosphere. Aberrations in such transmission systems include turbulence-induced dynamic aberrations located at the path from the fiber laser array to the target, besides the inherent phase errors like phase noises and tip/tilt errors. Effective bandwidth for eliminating such aberrations is limited by the optical transmission delay and the increment of the array scale. Existing techniques, e.g., target-in-the-loop and delayed stochastic parallel gradient descent, are difficult to deal with the fast-changing turbulence-induced tip/tilt aberrations. But correcting these aberrations is critical for obtaining combined laser beams on the target with the best beam quality. In this paper, research progress of multi-aperture laser transceiving control for beam combining applications in IOE, CAS was presented.

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61675205); 中国科学院西部青年学者项目

作者简介: 耿超(1984-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事光纤激光相控阵技术方面的研究。Email: blast_4006@126.com

This method provided efficient ways to achieve tip/tilt control for the beam coupling from space to fiber and the outgoing laser beams in the beam combining applications. Correction of the aberrations outside the fiber laser array based on active multi-aperture wavefront sensing of the fiber laser array was proposed. These novel techniques presented here would promote the application of laser phased array technique in atmospheric propagation.

Key words: laser phased array; transceiving control; multi-aperture wavefront sensing; turbulence correction

0 引言

受限于非线性、热致模式不稳定性和热损伤等效应,单根光纤激光束很难同时保证高功率和好的光束质量。光纤激光阵列的相干合成技术利用孔径拼接的方式,采用锁相控制将小口径光束拼接等效大口径激光输出,可保持单口径高光束质量,并提升光束亮度,是高功率激光相控阵技术的重要基础之一^[1-2]。相干合成需要各路光束在目标处重叠,相位和偏振态保持一致,而且光程差远小于相干长度。在存在外部像差如大气湍流或热晕等像差情况下,还需要在单口径上校正除活塞像差外的更高阶像差,如倾斜和离焦。为满足以上条件,现有的相干合成方法基本采用主振荡功率放大(MOPA)结构,并对各合成要素采用主动控制的方法使其满足相干合成条件。当对各路光束的延迟进行控制时,可无须要求各路光纤放大为线偏振单频放大,而适当展宽种子光源的谱线。2016年,国防科技大学报道了目前可应用于相干合成的最高输出功率 1.89 kW 的线偏振窄线宽光纤放大器,线宽 45 GHz,光束质量 $M^2 < 1.30$,消光比大于 15.5^[3]。

目前可见报道的相干合成研究绝大部分是为了实现室内环境下多单元阵列的相干合成,更关心的是如何通过锁相控制来消除光源及光放大过程中的相位噪声来实现相干合成。其中以频率抖动法和 SPGD 优化控制算法最为常见。2011年美国空军研究实验室利用频率抖动法实现了 16 路总 1.4 kW 输出的光纤激光相干合成^[4]。同年,国防科技大学利用改进的频率抖动法实现了 9 路总功率 1.08 kW 的相干合成输出^[5]。2012年国防科技大学采用优化法实现了 1.8 kW 的 9 路相干合成输出^[6]。2011年,美国麻省理工学院采用优化法实现了 8 路总功率 4 kW

的相干合成输出^[7]。

传统相干合成主要集中于室内短距离条件下的合成,瞄准如何提升输出功率,主要解决系统内部的光轴平行、光束延迟、相位噪声和阵列高密度拼接等问题,对系统外部像差考虑较少。光纤激光阵列的相干合成由室内走向室外,需要解决大气湍流造成的动态像差问题以及远距离传输造成的光传输延迟问题。光纤激光阵列本身即是一种激光收发传输系统,其用尺寸更小的单元孔径阵列取代传统整体孔径传输方式。这使得该系统兼具自适应光学功能,整体孔径上的像差被分配到单元孔径上的倾斜像差和活塞像差。光纤集成式相位调制技术,使得活塞像差执行器件的可用带宽达到 GHz。同时,称为自适应光纤准直器(Adaptive Fiber Optics Collimator, AFOC)的新型倾斜像差执行器件被开发出来^[8-9],该器件具有惯量小、带宽高和易于集成等优点。

目前,对光纤激光阵列大气传输校正仅有目标在回路(Target-in-the-loop, TIL)方法的报道。TIL 是用望远镜收集目标处对相干合成光束的散射回光作为性能指标,采用优化法如 SPGD 算法等对阵列的活塞相位进行优化迭代以实现目标处的相干合成。2011年,戴顿大学进行了 7 单元 AFOC 阵列传输 7 km 的大气补偿实验,采用 SPGD 算法进行锁相控制使得性能指标得到了 3.7 倍提升,采用改进的延迟 SPGD 算法(D-SPGD)使得性能指标得到 5.6 倍提升^[10]。2016年,该课题组将合成路数扩展至 21 单元,采用 D-SPGD 进行锁相控制,使得目标处桶中功率为开环时的 16.3 倍^[11]。紧接着采用相同结构实现了总功率 500 W 的相干合成输出,种子激光线宽 1 GHz, D-SPGD 迭代速率为 500 kHz,指标仅需 150~250 次迭代收敛至最大值,在 1.0~1.5 ms 内实现收敛^[12]。

TIL 本身存在缺陷, 首先其系统控制的延迟包括了光从阵列至目标处的双向传输时间, 该延迟决定了阵列活塞像差校正带宽的上限, 而且随着传输距离的增大, 该问题会越来越突出。其次, TIL 采用单性能指标对多路活塞像差和倾斜像差进行迭代收敛。虽然采用了 D-SPGD 算法能够实现的锁相迭代速率远远超过光双向传输延迟对应的带宽, 但该方法对于倾斜像差的校正却无效, 因为倾斜像差执行器件如 AFOC 等仅有数 kHz 的可用带宽, 不满足快速迭代的条件, 同时, 其控制维数为锁相控制的两倍, 其 SPGD 收敛速度更慢, 有效带宽极低。加上单孔径上湍流像差动态变化速率很快, 因此造成可见报道中倾斜校正加上活塞校正所获得的实验结果并不比单独活塞校正的效果更好。实际上在单元孔径上, 倾斜像差占据了科尔莫哥洛夫湍流的绝大部分, 其方差占据总像差部分约 87%。因此, 补偿单元孔径上的倾斜像差作用至关重要, 能够使光纤激光阵列在湍流环境下, 以更小的传输功率在远场目标处获得更高的激光亮度^[13]。

面对光纤激光阵列相干合成未来远距离大气传输的应用需求和挑战, 需解决湍流效应补偿和远距传输光传输延迟的问题。对单孔径上倾斜像差进行校正是进一步提升光纤激光阵列自适应光学能力的关键。一是需要提升控制平台本身的算法执行速率和控制实时性, 这就需要采用硬件框架的控制平台; 另一方面是改善控制方法, 以充分利用现有像差执行器件(AFOC)本身的有限带宽资源, 核心思想就是降低倾斜像差校正的维数^[14-15]。远距光传输延迟问题的解决方法之一, 就是将主动波前传感的功能引入光纤激光阵列传输系统中, 实现对外部湍流像差的预补偿校正。

笔者所在课题组对基于光纤自适应操控的激光阵列相干合成开展了大量的理论和实验研究。研制了可实现单元倾斜控制的 AFOC 器件, 并提出了基于主动光纤耦合的倾斜控制方法, 该方法通过主动的光纤耦合控制实现畸变波前的空间光束至 AFOC 单模光纤耦合效率的最大化。倾斜控制同时作用于光纤耦合过程和出射光束, 实现了对耦合光束和出射光束两者倾斜像差的同时校正。针对远距离光传输延迟的问题, 提出基于光纤耦合的 AFOC 阵列波前传感方法, 并据此进行了基于主动波前测量的光纤激光阵列外

部像差预补偿校正的实验, 为光纤激光阵列大气传输及湍流像差校正的研究打下坚实基础。

1 精确延时 SPGD 算法设计

针对基于 SPGD 算法的 AFOC 控制系统带宽利用率较低的问题, 设计了一种新型优化算法并命名为精确延时 SPGD (Precise-Delayed SPGD, PD-SPGD) 算法, 并已在单模光纤 (Single-Mode Fiber, SMF) 自适应耦合系统中得到了应用。

SMF 自适应耦合控制系统结构图如图 1 所示。由自适应光纤准直器(AFOC)、光电探测器(PD)、光纤分路器、SPGD 算法控制平台和高压放大器(HVA)实现闭环控制。系统工作时, 光纤分路器将耦合进 SMF 内的光束能量一部分传递给终端(Receiver), 另一部分传递给光电探测器(PD)并经其转换为电压性能评价指标。控制平台根据该指标推算出一组二维的控制电压序列至高压放大器, 后者驱动 AFOC 带动光纤端面寻找最优耦合位置, 使性能评价指标最大化, 从而实现高效、高稳定的 SMF 自适应耦合。

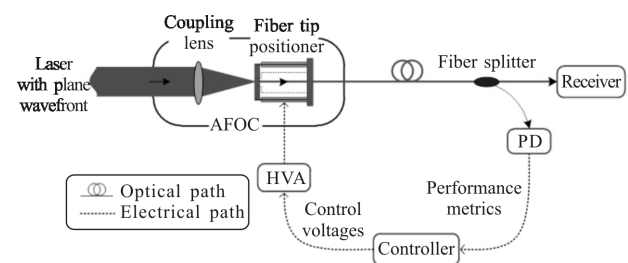


图 1 SMF 自适应耦合控制系统的结构示意图

Fig.1 Scheme of the SMF adaptive coupling system

此处的算法控制器为自主研发的基于 Xilinx spartan6 系列芯片的 FPGA 硬件控制平台, 用来生成二维控制电压 $U^{(n)} = \{u_x^{(n)}, u_y^{(n)}\}$ 。该组电压使用下述 SPGD 算法进行迭代:

$$U^{(n+1)} = U^{(n)} + \gamma \Delta U^{(n)} (J_+^{(n)} - J_-^{(n)}) \quad (1)$$

式中: n 为迭代次数; γ 为步长参数; $\Delta U^{(n)} = \{\delta u_x^{(n)}, \delta u_y^{(n)}\}$ 为一组二维随机扰动。算法开始执行时, 首先由控制器输出正向扰动电压 $U^{(n)} + \Delta U^{(n)}$ 并将 PD 捕获到的性能指标记做 $J_+^{(n)}$, 然后输出负向扰动电压 $U^{(n)} - \Delta U^{(n)}$ 并将 PD 捕获到的性能指标记做 $J_-^{(n)}$ 。当不考虑系统

的幅频响应特性时,SPGD 算法的迭代间隔 τ_{spgd} 可以由下式简单表示:

$$\tau_{\text{spgd}}=2(\tau_{\text{calc}}+\tau_{\text{resp}}) \quad (2)$$

式中: τ_{calc} 为控制器处理延时,由 AD 数据转换、FPGA 数据推算以及 DA 输出转换延时组成; τ_{resp} 为系统响应延时,指的是被控系统从接受控制信号开始到产生对应输出的延时,由 HVA、AFOC 以及 PD 等器件的所有响应延时组成。通过大量的实验测试,发现系统在水平方向与垂直方向的响应延时在输入信号频率 10 kHz 以内时近似于恒定值,其平均值分别为 0.095 ms 与 0.097 ms。当 SPGD 算法在高速迭代的过程中,这一延时会引起错误的梯度估计结果,从而使得算法发散。

因此,需要重新调整输出扰动电压与捕获性能指标之间的对应关系,一种行之有效的方法是在其中设计一个可控的时间延时。这一想法来自于延时 SPGD 算法 (Delayed-SPGD, D-SPGD), 其曾经被 Thomas Weyrauch 等人成功地应用于光纤激光相干合束系统中的光束传输延时补偿。不同的是对系统响应延时进行补偿时,受限于被控对象 AFOC 自身的幅频特性,经补偿后可实现的算法迭代间隔 τ_{spgd} 与响应延时 τ_{resp} 不会相差太大。而 D-SPGD 算法延时补偿的最小时间间隔即 τ_{spgd} , 因此需要设计一种更加精确的延时补偿算法。这里将算法性能指标的采样速率设置成迭代速率的 N 倍, 并且保存 M 个周期内的性能指标数值。将其迭代公式修改为如下形式:

$$U^{(n+1)}=U^{(n)}+\gamma\Delta U^{(n-\Delta n)}(J_i^{(n)}-J_{i+N/2}^{(n)}) \quad (3)$$

式中: $J_i^{(n)}$ 和 $J_{i+N/2}^{(n)}$ 代表经延时后分别对应于扰动 $U^{(n-\Delta n)}+\Delta U^{(n-\Delta n)}$ 和 $U^{(n-\Delta n)}-\Delta U^{(n-\Delta n)}$ 的性能指标; 正整数 Δn 和 i 分别定义为整周期延时参数和精确延时参数; N 是在一个算法迭代周期内采集到的性能指标个数; M 为性能指标需要记录的周期数, 通常 $M=\Delta n+1$; 将算法补偿时间 τ_{comp} 设计为:

$$\tau_{\text{comp}}=\tau_{\text{resp}}+\tau_{\text{spgd}}/4 \quad (4)$$

可以通过公式 $\langle \tau_{\text{comp}}/\tau_{\text{spgd}} \rangle$ 和 $\langle N\tau_{\text{comp}}/\tau_{\text{spgd}} \rangle$ 计算出整周期延时参数 Δn 和精确延时参数 i , 其中符号 $\langle \rangle$ 表示取整。

图 2 展示了一组 367 μrad 的空间光静态角偏差 (相当于光纤端面 5.5 μm 的静态对准偏差)下的自适应耦合实验结果。这里设置 PD-SPGD 算法的迭

代速率为 8 kHz, 采样速率为 80 kHz, 可以计算出 $N=10$, $\tau_{\text{spgd}}=0.125$ ms, 因此其补偿精度为 0.0125 ms; 为了补偿 0.96 ms (两个方向的平均值) 的响应延时, 可以计算出 $\tau_{\text{comp}}=0.127$ ms, $\Delta n=1$, $i=10$ 。如图 2 所示, 当 $\Delta n=0$, $i=5$ 时 (相当于使用 SPGD 算法) 迭代曲线发散; 当 $\Delta n=1$ 并且 $i=8, 10, 12$ 时 (相当于实际补偿时间为 0.1、0.125 和 0.15 ms), 迭代曲线开始收敛并可以计算出其收敛时间 t_c (定义为归一化性能指标 J 上升至 0.9 时所需的时间) 分别为 55、2.5 和 137.5 ms; 最后当 $\Delta n=1$, $i=15$ 时 (相当于使用 D-SPGD 算法), 迭代曲线重新开始发散。

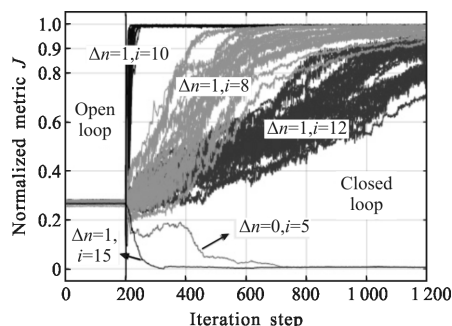


图 2 PD-SPGD 算法不同延时参数设置下的归一化性能指标迭代曲线

Fig.2 Normalized metric curve of the PD-SPGD algorithm with different delay parameters

图 3 展示了频率为 100 Hz, 幅值 166 μrad 正弦型角度抖动下的一组对比试验。这里 PD-SPGD 算法和 SPGD 算法的迭代速率分别设置为 8 kHz 和 3 kHz, 各自的参数设置都保证其工作在最优的状态。当系统开环的时候, 性能指标 J 的均值为 0.81, 均方根误

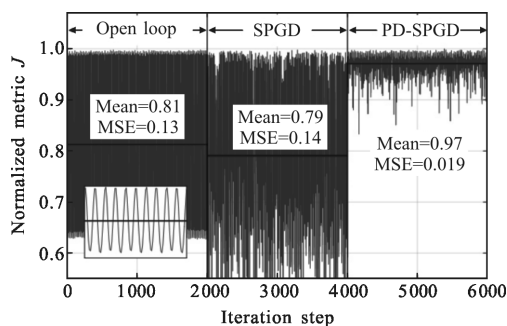


图 3 动态角抖动下 PD-SPGD 算法与 SPGD 算法的对比
Fig.3 Comparison of PD-SPGD and SPGD algorithm with dynamic angular perturbation

差(MSE)为 0.13;当 SPGD 算法闭环时,性能指标 J 的均值下降至 0.79, MSE 上升至 0.14;最后当 PD-SPGD 算法闭环时,性能指标 J 的均值上升至 0.97, MSE 下降至 0.019;可以看出相比于 SPGD 算法,更高迭代速率的 PD-SPGD 算法对于正弦型角抖动的抑制能力更强,其闭环后耦合效率均值上升了 19.8% 并且 MSE 下降了 86.4%,而 SPGD 算法闭环则起到了相反的校正效果。

2 基于 TIL 的七路激光组束 200 m 室外传输与湍流补偿

可见报道的基于 TIL 的光纤激光阵列传输及湍流效应校正,其目标多为合作目标(角锥阵列),反

射率很高,目标回光接收能量很强,这与实际非合作目标情况有很大不符。为此,搭建了基于 TIL 的 7 单元 AFOC 阵列激光传输 200 m 的湍流校正实验平台,目标为玻璃微珠片,其散射特性与实际目标更为接近,同时采用制冷型光电探测器接收目标处反射的微弱回光,以此为性能指标,对 AFOC 阵列的活塞相位和倾斜相位进行迭代以实现目标处的相干合成。

实验方案框图如图 4 所示,采用 MOPA 结构,11 mW 的 1064 nm 种子光源,经预放大至 100 mW 后分成 7 束,各子光束经压电光纤相位补偿器传输后被放大至 1 W。经各 AFOC 准直后的 7 路光束以共形聚焦的方式经 200 m 传输后重叠在玻璃微珠片上,其中部分合成光束透过高反镜被光斑分析仪探

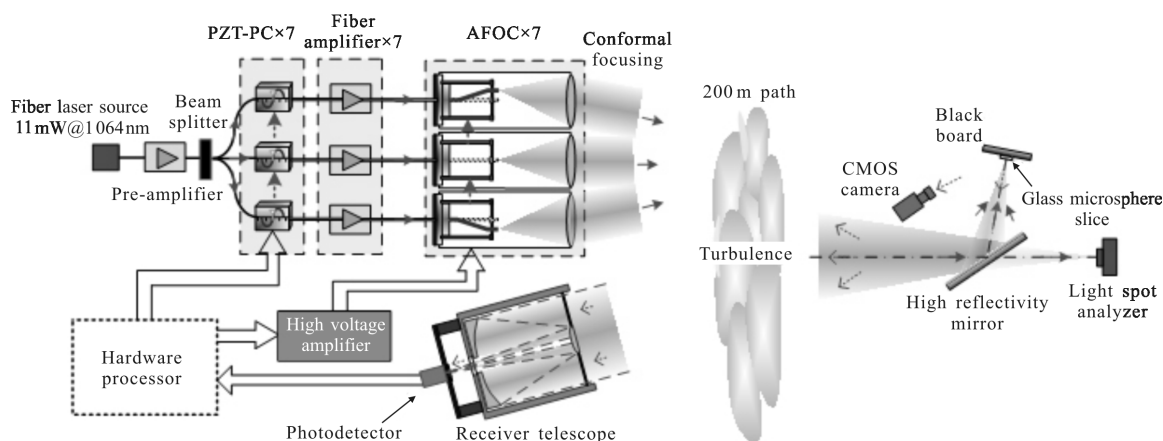
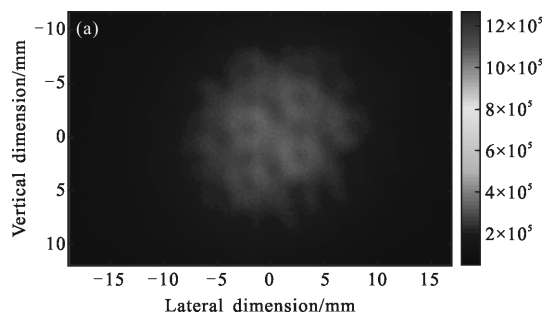


图 4 7 单元光纤激光阵列 200 m 传输及相干合成实验框图

Fig.4 Schematic of the experimental setup used for coherent beam combining of 7-element fiber laser array over 200 m atmospheric path

测到。玻璃微珠的反射回光沿原光路返回至接收望远镜,经光电探测器转换成电压信号后作为硬件处理板 SPGD 迭代算法的性能指标,对压电光纤相位补偿器和 AFOC 上的施加电压进行迭代运算。锁相控制的迭代速率为 12 kHz,倾斜控制的迭代速率为 1 kHz。图 5 为控制开闭环 30 s 时间内,光斑分析仪采集到的长曝光图像。可以看出,控制开环时,图像模糊,能量分散,闭环后,出现了对比度非常明显的干涉条纹,图像与理想相干合成图像十分相近。实验结果表明,采用 TIL 方法结合优化控制算法,即使是

在目标回光十分微弱的情况下,也能够很好地抑制湍流效应,获得很好的相干合成效果。



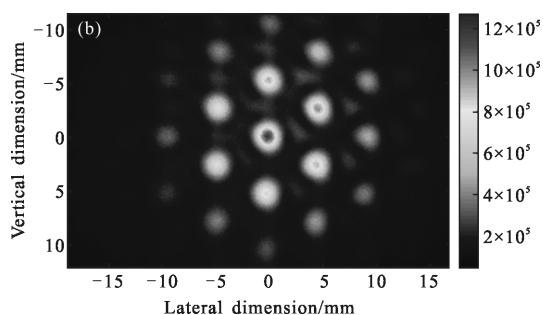


图 5 光斑分析仪采集到的开闭环条件下 30 s 长曝光图

Fig.5 Long-exposure intensity distribution of 30 s acquired by the light spot analyzer during open and closed loop

3 基于共孔径传输控制的 7 单元光纤激光阵列相干合成

这里将基于收发一体双向传输的倾斜控制与主动锁相控制相结合,实现模拟湍流环境下远场处的高效相干合成。如图 6 所示,7 单元 AFOC 阵列的光束来自同一的保偏、单频光纤激光源,经热水加热以引入模拟湍流后被聚焦至远场,部分光束被带有针孔的光电探测器探测到以用作锁相控制的性能指标。这里采用置于远场变换透镜焦平面上的光纤端

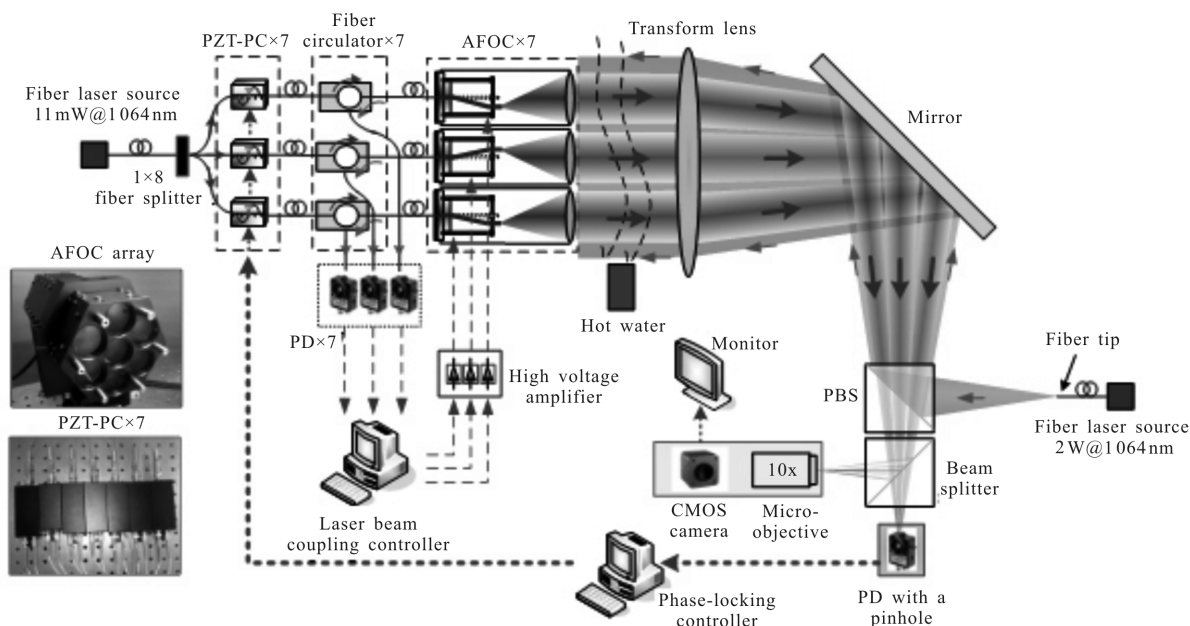


图 6 基于共孔径双向传输的 7 单元阵列相干合成实验框图

Fig.6 Experimental setup of CBC based on 7-aperture laser transceiving

面来模拟远场亮点目标,该点发出的光束将作为 AFOC 阵列对模拟湍流造成的倾斜像差进行控制的信标光。7 单元 AFOC 各自以耦合接收到的光能量为性能指标进行独立并行的倾斜控制。

7 单元 AFOC 归一化耦合光能量的均值在倾斜控制开环时为 0.76,闭环时该值提升至 0.94,如图 7 (a)所示。相应 MSE 的均值从开环时的 0.18 降至闭环时的 0.055,如图 7(b)所示。图 8 为远场 PD 探测到的归一化桶中功率 PIB 的曲线,曲线分成 4 段,分别是开环阶段、仅锁相阶段、锁相加倾斜控制阶段和仅

倾斜控制阶段。PIB 的均值在四个阶段内分别为 0.21、0.72、0.96 和 0.40,相应 MSE 值为 0.096、0.042、0.016 和 0.023。可以看出当锁相和倾斜控制同时作用时,PIB 的均值提升至开环时的 4.6 倍且 MSE 值降至开环时的 1/6。倾斜控制带来 PIB 提升的收敛时间约为 30 ms,该值与每路 AFOC 耦合接收光能量最大化的收敛时间相同。实验实现了对每个 AFOC 的并行倾斜控制,且该控制与锁相控制相互独立,摆脱了现有控制方式无法分离锁相和倾斜控制的局限。

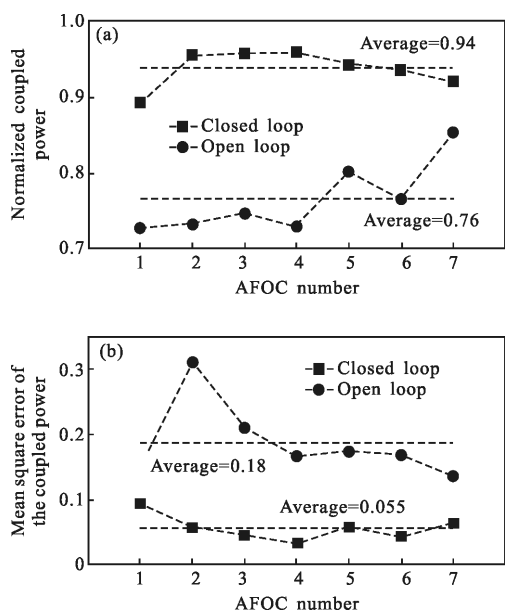


图 7 各 AFOC 倾斜开环和闭环时的(a)归一化耦合接收光功率及其(b)均方根误差

Fig.7 The normalized coupled power(a) and its mean square error (b)for each AFOC when TT control is in open loop and closed loop

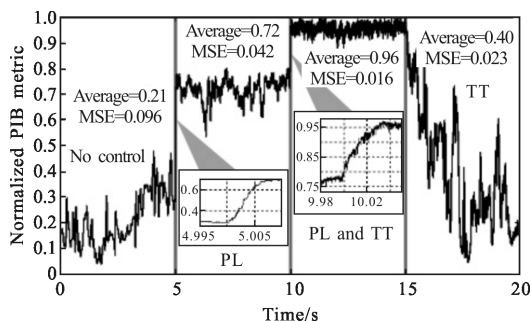


图 8 光电探测器采集到的归一化桶中功率随时间变化的曲线

Fig.8 Normalized PIB metrics acquired by PD as the function of time

不同阶段中的远场衍射光斑如图 9 所示，在开环时远场衍射受模拟湍流影响而造成曝光图像对比度模糊(如图 9(a))，锁相控制使得对比度有所提升(如图 9(b))，但湍流像差中的高阶成分及 AFOC 系统集成时引入的初始对准误差等因素造成相当部分能量散布于旁斑中，进一步的倾斜控制可获得接近理想衍射光斑的图样(如图 9(c))。同时，图 10(d)表明倾斜控制并未带来对比度的明显提升，而仅仅是能量更加集中在中心点附近。实验结果表明，倾斜像差校正结合主动锁相控制，实现了模拟湍流环境下 7

单元光纤激光束阵列的相干合成。

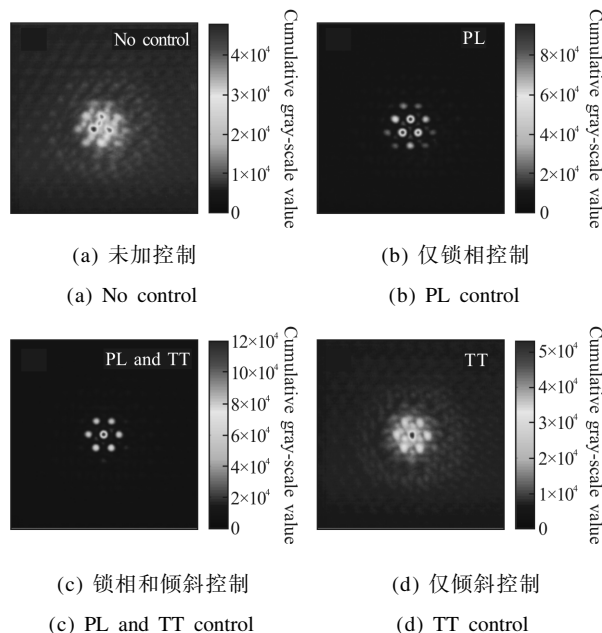


图 9 远场长曝光图

Fig.9 Long-exposure far-field intensity distributions

4 基于多孔径波前测量的光纤激光组束端流像差校正方法

当前，在基于 MOPA 结构的主动式相干合成系统中，可见报道的只有以 TIL 为代表的盲优化校正方法对大气湍流波前进行校正。但是，随着合成单元数目的增多，迭代算法的收敛速率将会变慢，控制带宽急剧下降。此时，需要寻求湍流像差测量的方法，并将该方法与光纤激光阵列相结合。哈特曼波前传感器为目前应用最为广泛的实时波前测量装置，其结构示意图如图 10 所示，主要由微透镜阵列和位于

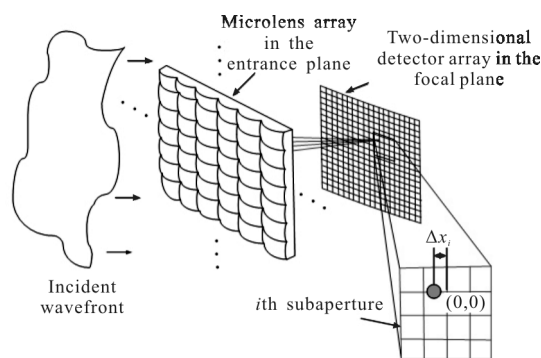


图 10 经典哈特曼传感器的示意图

Fig.10 Scheme of the conventional Hartmann wavefront sensor

微透镜阵列焦平面上的阵列式光电探测器组成。工作原理为用微透镜阵列将入射光束的畸变波前按子孔径区域分割,再用阵列式光电探测器(主要为 CCD 或 CMOS 相机) 测算出各子孔径内远场光斑相对于理想位置的质心偏移量,据此求得波前斜率,再采用一定的复原算法,得到畸变光束的整体波前。AFOC 阵列具有与哈特曼传感器相类似的结构,因此也可以实现波前传感的功能。

传统方法通过阵列式探测器来测量并求取聚焦光斑质心,进而获取分孔径上波前斜率。AFOC 阵列测量波前,首先需要通过对聚焦后的空间光束进行耦合。如图 11 所示,光纤端面放置于远场变换透镜焦点上的功率 2 W 且波长为 1 064 nm 的激光光源,经准直后形成平面信标光。信标光束透过携带离焦和像散等低阶像差的玻璃板后形成畸变波前。7 单

元 AFOC 阵列分割该光波前,并各自耦合进其内置 SMF 中,经光纤环形器后被光电探测器转换成电压信号。控制器以该信号为性能指标,采用 SPGD 算法,对施加到各路 AFOC 上电压进行迭代运算以使得指标最优化。已有的研究表明,对 AFOC 采取优化控制算法使其每路耦合接收光能量最优化,此时光纤端面的位置与孔径分割后子光束的聚焦光斑质心位置直接相对应。同时,AFOC 内置光纤端面在焦平面上的位置与施加其上驱动电压之间,在不考虑器件结构及压电片迟滞效应的情况下,可认为是简单线性关系。因此,可通过最优化耦合前后驱动电压值的变化量,间接得到由波前倾斜造成的子孔径内聚焦光斑的质心偏移,也就是得到了子孔径内畸变波前的斜率。采用模式法等波前复原算法即可复原出畸变光波前。

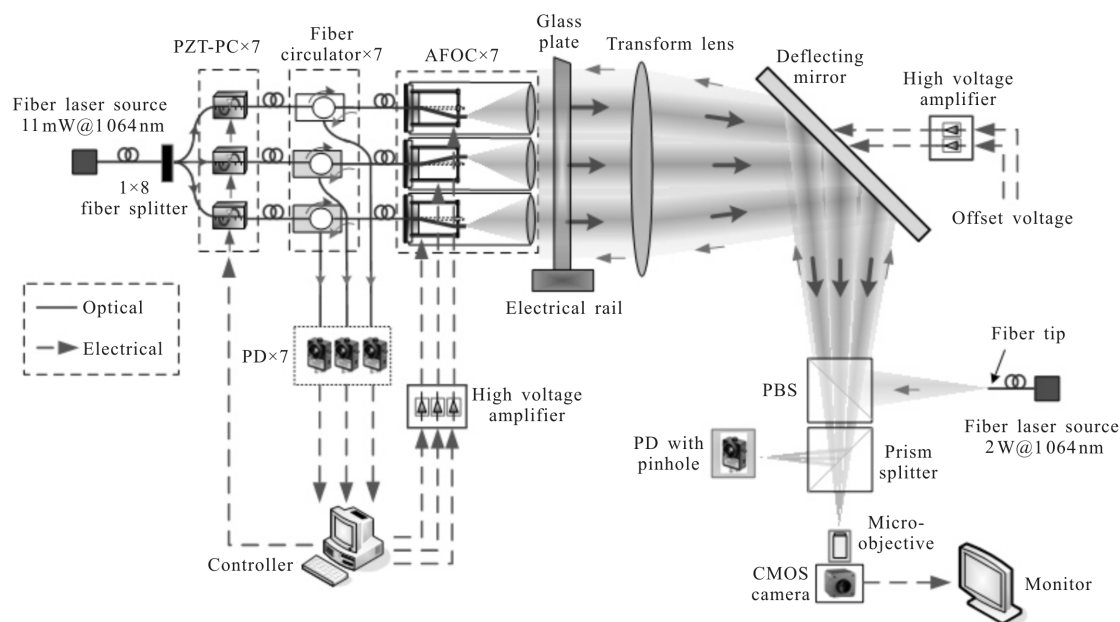


图 11 基于多孔径波前测量的光纤激光组束湍流像差校正实验方案图

Fig.11 Experimental setup of the simulated turbulence aberration correcting of the fiber laser array based on multi-aperture wavefront sensing

如图 12 所示,图 12(a)为干涉仪测量得到的畸变波前相位二维分布,虚线圆圈为 AFOC 单元孔径,箭头代表根据电压反演得到的各孔径上波前斜率的大小和方向。图 12(b)为复原得到的 Zernike 模式系数与真实值的对比图,图 12(c)为波前复原残差。原

始畸变波前 RMS 为 $0.433 \mu\text{m}$,复原残差 RMS 值为 $0.0749 \mu\text{m}$,是玻璃板原始像差 RMS 值的 0.173 倍,且小于十分之一波长。实验结果验证了,根据最优化耦合时 AFOC 驱动电压可有效测量波前畸变在单孔径上的波前斜率,并据此复原出畸变波前。

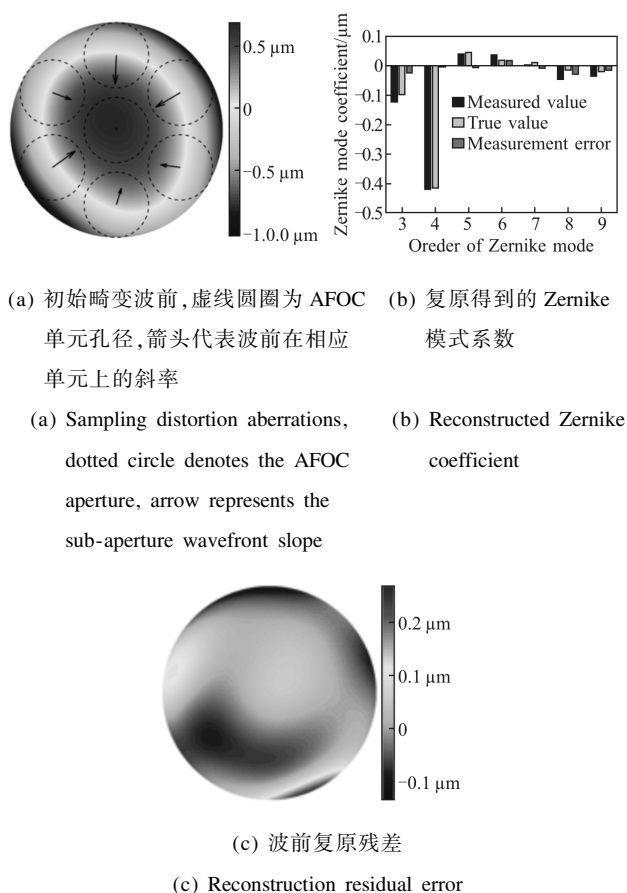


图 12 7 单元 AFOC 阵列波前复原实验结果

Fig.12 Experimental results of reconstructing wavefront with 7-element AFOC array

在畸变波前复原的基础上，同时进行了 AFOC 阵列出射光束对外部像差的预补偿校正传输实验。这里阵列出射光束由同一单频激光源(功率 11 mW, 波长 1 064 nm)经光纤分路器得到,各子光束经光纤环形器与 AFOC 相连并准直发射出去,经与信标光束相逆的光路传输后聚焦到模拟远场处。首先,在未加入外部像差时,采用 SPGD 算法,对各路光纤相位补偿器的相位调制量进行迭代运算,以使得放置在模拟远场处的带针孔 PD 探测到的光强最优化,此时阵列出射光束在 AFOC 阵列平面处达到锁相状态。同时,各路 AFOC 对信标光束进行第一次的最优化耦合,并记录稳态收敛时各路驱动电压值。紧接着,加入玻璃板,引入外部像差,各 AFOC 对信标光束进行最优化耦合,并记录电压值。该耦合过程同时实现了对信标光束和阵列出射光束在单孔径上波前倾斜的校正。根据前后两次最优耦合控制时的电压差,对外部像差进行复原,并计算得到各子孔径内平均相

位值,也就是外部像差在孔径内的平均活塞像差。各路光纤相位补偿器对该活塞像差进行预补偿,即可实现阵列出射光束经玻璃板传输后远场的相干合成。

图 13 给出了复原并预补偿校正外部活塞像差过程中远场合成的短曝光图像。相比于未校正时的状态,加玻璃板后进行单孔径内的倾斜校正,使得整体孔径一倍衍射极限内的桶中功率提升至 1.6 倍,进一步校正复原活塞像差使得该值提升至 5.7 倍。从远场衍射图样改善效果来看,主动波前测量加像差预补偿的确能够校正畸变波前及改善远场衍射图像,并能够获得与理想校正近乎一致的效果。

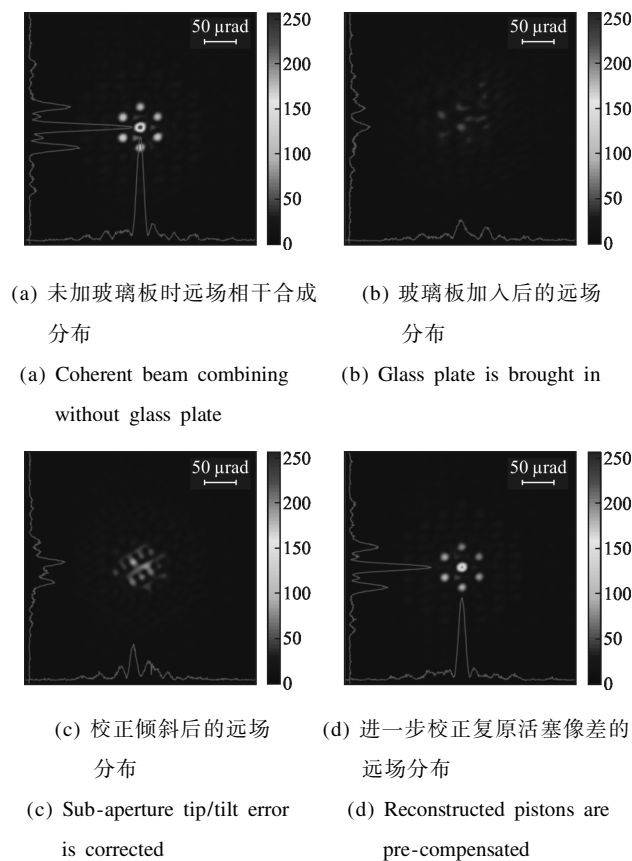


图 13 7 单元 AFOC 阵列复原并校正外部活塞像差过程中远场合成短曝光图像

Fig.13 Far-field short exposure image of the 7-element AFOC array during wavefront sensing and distortion correcting

5 结 论

光纤激光阵列的相干合成是实现高亮度和高质量光束的有效手段,同时也是一种兼具自适应光学校正能力的光束传输控制方法。国际上对多单元高功率相干合成输出的诸项关键技术进行了广泛的研

究,但仅有极少数的研究单位报道了多单元光纤激光阵列的大气传输补偿研究,总体上还处于对实际大气传输应用的起步和探索阶段。中国科学院光电技术研究所提出了基于收发一体双向传输的单孔径倾斜像差校正方法,将倾斜校正从传统目标在回路方法的单性能指标多维校正的局限中摆脱出来,并通过实验验证了其可与锁相控制密切配合,进而实现湍流环境下远场目标处的高效相干合成。同时提出了一种基于多孔径波前测量的光纤激光组束湍流像差校正方法,解决了传统目标在回路方法中,远距离光传输延迟及系统规模增大引起的系统有效带宽急剧下降的问题。这些技术突破将为基于光纤自适应操控的激光相控阵技术在基础前沿等领域的应用打下基础。

参考文献:

- [1] Goodno G S, Mcnaught S J, Rothenberg J E, et al. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(10): 1542–1544.
- [2] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2686–2688.
- [3] Ma Pengfei, Tao Rumaoyao, Su Rongtao, et al. 1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifier with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality [J]. *Opt Exp*, 2016, 24(14): 4187–4195.
- [4] Angel F, Shay T M, Lu C A, et al. Coherent beam combining of fiber amplifiers in a kW regime [C]//CLEO: Laser Application to Photonic Applications, 2011: CFE3.
- [5] Ma Yanxing, Wang Xiaolin, Leng Jingyong, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(6): 951–953.
- [6] Wang Xiaolin, Leng Jingyong, Zhou Pu, et al. 1.8-kW simultaneous spectral and coherent combining of three-tone nine-channel all-fiber amplifier array [J]. *Appl Phys B*, 2012, 107(6): 785–790.
- [7] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2686–2688.
- [8] Vorontsov M A, Weyrauch T, Beresnev L, et al. Adaptive array of phased-locked fiber collimators: analysis and experimental demonstration [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2009, 15(2): 269–280.
- [9] Geng Chao, Luo Wen, Tan Yi, et al. Experimental demonstration of using divergence cost-function in SPGD algorithm for coherent beam combining with tip/tilt control [J]. *Opt Exp*, 2013, 21(21): 25045–25055.
- [10] Weyrauch T, Vorontsov M A, Carhart G, et al. Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(22): 4455–4457.
- [11] Weyrauch T, Vorontsov M A, Mangano J, et al. Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(4): 840–843.
- [12] Vorontsov M A, Weyrauch T. High power lasers for directed-energy applications: comment [J]. *Appl Opt*, 2016, 55(35): 9950–9953.
- [13] Vorontsov M A, Filimonov G, Ovchinnikov V, et al. Comparative efficiency analysis of fiber-array and conventional beam director systems in volume turbulence [J]. *Appl Opt*, 2016, 55(15): 4170–4185.
- [14] Li Feng, Geng Chao, Li Xinyang, et al. Co-aperture transceiving of two combined beams based on adaptive fiber coupling control [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2015, 27(17): 1787–1790.
- [15] Li Feng, Geng Chao, Huang Guan, et al. Experimental demonstration of coherent combining with tip/tilt coherent based on adaptive space-to-fiber laser beam coupling [J]. *IEEE Photonics J*, 2017, 9(2): 7102812.