



·激光合束技术·

光纤激光相控阵相干合成技术研究进展*

刘家盈^{1,2,3}, 李自强^{1,2}, 杨 然^{1,2,3}, 邹 凡^{1,2,3}, 杨 旭^{1,2}, 周 鑫^{1,2,3}, 潘姿廷^{1,2,3},
潘丽康^{1,2,3}, 李雨婷^{1,2,3}, 姜佳丽^{1,2}, 李 枫^{1,2}, 耿 超^{1,2}, 李新阳^{1,2}

(1. 中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209; 2. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 主要介绍了近年来光纤激光相控阵相干合成技术的发展现状, 总结了中国科学院光电技术研究所在这方面的最新研究成果, 包括基于振幅调制的光纤激光相控阵相干合成能力优化、光纤激光相控阵实现收发一体相干合成、光纤激光相控阵的目标在回路相干合成、光纤激光相控阵在大气湍流下实现耦合接收光束的共相合束、基于多孔径波前探测的相干合成方法、基于自适应光纤准直器和微透镜阵列的光束大角度高精度连续寻址扫描等。以上研究工作将促进光纤激光相控阵技术朝向更多单元、更高功率、更远距离等方向演进, 并推动其与激光大气传输、空间激光通信、自适应光学等理论和应用的结合与发展。

关键词: 光纤激光相控阵; 相干合成; 分布式孔径; 相位调控; 自适应光学

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220323

Research progress of coherent beam combining technique of phased fiber laser array

Liu Jiaying^{1,2,3}, Li Ziqiang^{1,2}, Yang Ran^{1,2,3}, Zou Fan^{1,2,3}, Yang Xu^{1,2}, Zhou Xin^{1,2,3}, Pan Ziting^{1,2,3},
Pan Likang^{1,2,3}, Li Yuting^{1,2,3}, Jiang Jiali^{1,2}, Li Feng^{1,2}, Geng Chao^{1,2}, 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: This paper introduces the state-of-the-art coherent beam combination of phased fiber laser array (PFLA), and summarizes the latest research progress in this area at the Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, including optimization of coherent combining capability of PFLA based on amplitude modulation, transceiving coherent combining of PFLA, coherent combining of PFLA using target-in-the-loop, co-phasing combining of receiving beamlets of PFLA under atmospheric turbulence, the method of coherent combining based on multi-aperture wavefront detection, as well as the large-angle high-precision continuous addressing scanning of beams using adaptive fiber-optics collimator and microlens array scanner. The above research will promote the evolution of PFLA technology towards more units, higher power, longer distance etc., and facilitate its combinations and developments with laser atmospheric transmission, space laser communication, adaptive optics and other related theories and applications.

Key words: phased fiber laser array, coherent beam combination, distributed-apertures, phase regulation, adaptive optics

在激光应用中, 对多束激光进行相干合成(CBC)是提升激光功率的同时保持光束质量的有效技术途径。以分布式孔径为特征的光纤激光相控阵(PFLA)技术是实现相干合成、相位灵活操控、电控光束扫描的一体化解决方案, 有望实现激光系统从以“光源为核心”发展到以“光束控制为核心”^[1-6]。2021年, 国防科技大学刘泽金院士指出: “除相控阵这种将分布式光源与分孔径发射相融合的新体系架构外, 绝大多数单口径输出的合束方案都是不

* 收稿日期: 2022-12-23; 修订日期: 2023-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2141255, 62175241, 62005286); 四川省杰出青年科学基金项目(2022JDJQ0042)

联系方式: 刘家盈, liu_jiaying@outlook.com;

李自强, lzq_ioe@163.com。

通信作者: 耿 超, blast_4006@126.com。

得已而为之^[7]”,对光纤激光相控阵技术的发展前景给予了肯定。

近 10 年来,光纤激光相控阵相干合成技术取得了长足的进步:实验室内无倾斜控制的相干合成技术验证方面,阵元规模已突破了 100 路^[8];激光组束室外传输全程像差校正方面,实现了数公里的高效合成传输与目标处相干合成^[9-10];应用领域有向空间光通信拓展的趋势^[11-14]。但是也必须认识到,光纤激光相控阵技术在实际应用中还有诸多问题和难点,比如:目前应用领域主要集中在激光大气传输;相控阵的合成规模尤其是室外湍流环境下的合成规模仍然有限;缺乏高效的多参量波前相位校正方法,同时缺乏多维度光学参量操控能力;电控光束扫描方法研究不足等。针对以上问题,中国科学院光电技术研究所进行了相应的研究工作,本文总结了研究团队的近期研究进展,包括光纤激光相控阵的室内、室外相干合成实验,基于多孔径波前测量的自适应光学校正与相干合成方法,光束大角度连续寻址扫描方法等,并对光纤激光相控阵的未来发展趋势进行展望。

1 光纤激光相控阵的室内相干合成实验

1.1 基于振幅调制的光纤激光相控阵相干合成能力优化

当前光纤激光器的电光转换效率通常为 30%~40%。因此,当总输入能量一定时,如何在远场提高主瓣的能量密度、进而提升能量利用效率至关重要。在微波相控阵技术中,采用幅度加权法可获得更优的衍射场。多种非均匀的振幅分布(切比雪夫分布、泰勒分布和高斯分布)对主瓣能量占比的影响已被充分研究,并且已证实高斯分布的微波振幅能取得最好的远场效果。与微波类似,光波也属于电磁波,两者的物理特性通常是一致的。最近, Han Wang 等人发现,通过近场中的振幅调制使子光束振幅的包络遵循高斯分布,可以增强光纤相控阵系统的主瓣能量占比^[15]。但是,他们的工作是基于数值计算的,缺乏数学模型和实验证明。

中国科学院光电技术研究所提出了一种在光纤激光相控阵的相位噪声和倾斜像差均得到校正后,通过调整子光束的振幅包络以进一步提高合成光束主瓣能量的方法,并在 19 单元相控阵(基础模块)系统中验证了该方法的可行性^[16]。19 路子孔径按照六边形方式密集排布于半径 $R = 76 \text{ mm}$ 的圆中。子孔径的直径 $d = 28 \text{ mm}$, 相邻子孔径的中心距 $s = 31 \text{ mm}$, 工作波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, 如图 1 所示。

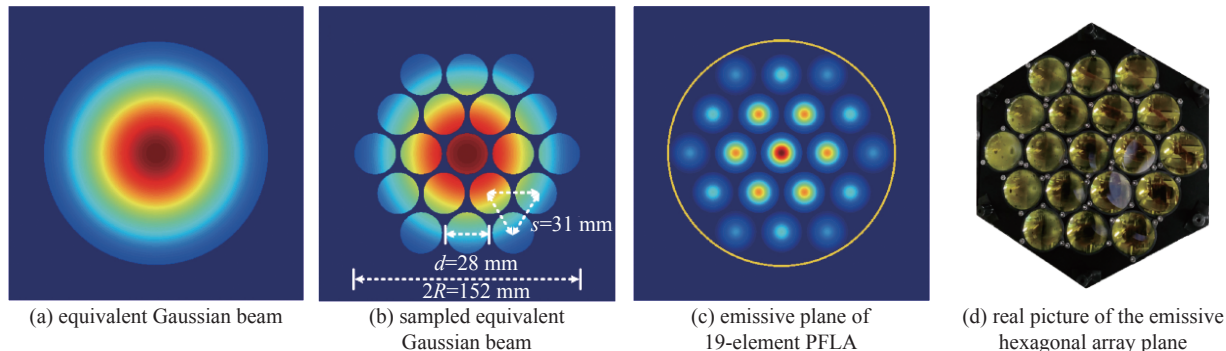


Fig. 1 Schematic diagram and real picture of the emissive hexagon array plane of a 19-element PFLA

图 1 19 单元光纤激光相控阵的六边形发射阵列平面的示意图和实物照片

由高斯光束的衍射模型可知, Fraunhofer 衍射区域的光强分布受光瞳大半径 R 和高斯光束束腰 Ω_0 调节。定义截断比 $T_r = R/\Omega_0$, 用于研究不同振幅分布下的光纤激光相控阵远场光强分布情况。图 2 为不同截断比 T_r 下, 19 单元光纤相控阵相干合成在远场的桶中功率 (PIB) 和合成光束主瓣宽度的仿真结果, 其中桶的直径 $d_{\text{bucket}} = 1.22\lambda/R$ 就是一倍衍射极限的直径。当相干合成过程中输出子光束的振幅均匀时, PIB 为 0.51。保持总输出功率不变, 将每个子光束的幅度调整为按特定截断比 T_r 分布。由图 2 可知, 当 $T_r = 1.3$ 时, PIB 为 0.57, 达到最大值。作为与相干合成光束的对比, 图 2(a) 中还展示了单孔径光束输出时的情况。图 2(b) 展示了不同 T_r 下相干合成的远场光强一维分布, 对纵坐标以最大的强度峰值进行归一化, 可看出一倍衍射极限的桶与光强分布的对应情况。

以仿真分析为指导, 在不同截断比 T_r 下, 进行了 19 单元光纤激光相控阵的相干合成实验, 从远场处合成光束的长曝光图像中提出性能指标并进行分析。实验结果表明, 随着 T_r 的增加, 发射阵列的幅度包络从均匀分布的平顶型变为离散分布的高斯型, PIB 值也从 0.49 ($T_r = 0$) 逐渐增加到 0.56 ($T_r = 1.3$)。然后, 随着 T_r 继续增加, PIB 值减小, 甚至可能低于初始值 0.49。为了验证调幅方法的可靠性, 进行了两组实验, 并更改了两个实验状态下的总发射功率。如图 3(a) 所示, 当 P_{total} 分别为 1.52 mW 和 0.76 mW 时, PIB 呈现相同的趋势。这意味着通过振幅调制方法可以提高合成光束的平均功率密度, 并且只有在 T_r 值合适的情况下才能获得最佳的实验结果。图 3(b) 为合成光束的

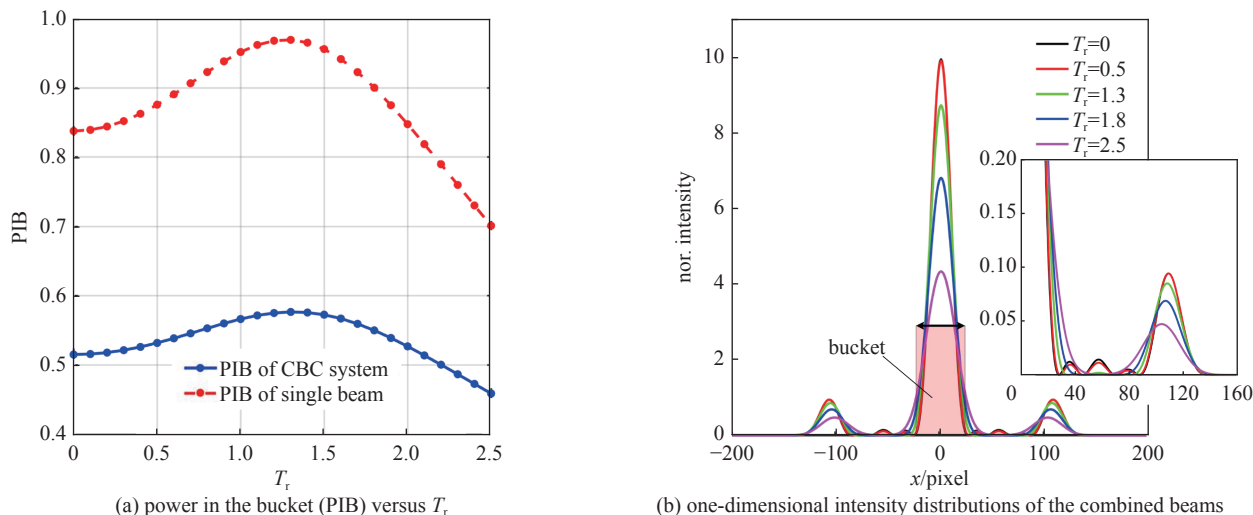

 Fig. 2 Simulation results of combined beam's metrics characteristics of 19 Gaussian beamlets in the far-field with different T_r

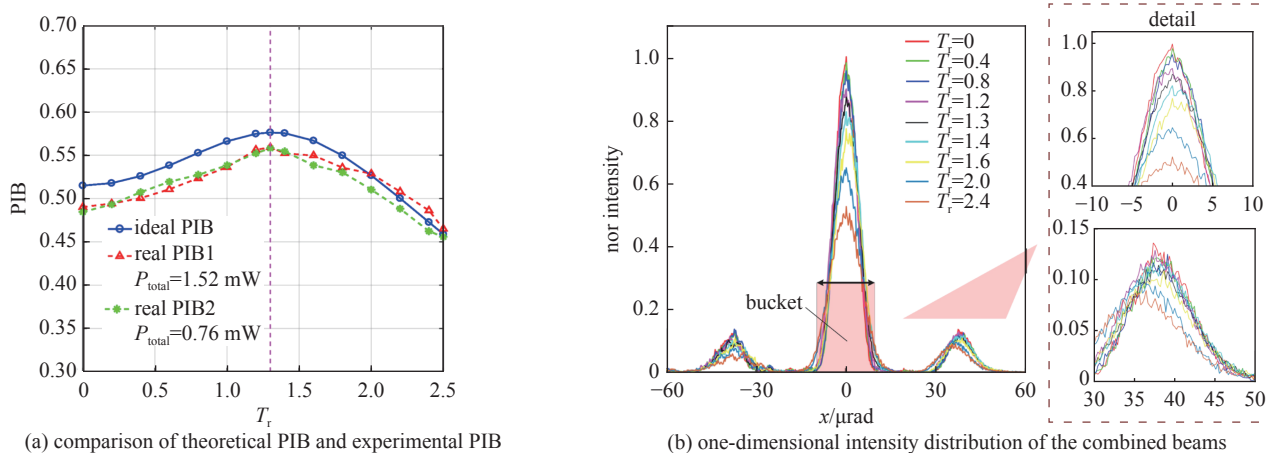
 图 2 不同截断比 T_r 下, 19 路高斯子光束的远场合成光束性能指标特性的仿真结果

 Fig. 3 Experimental results of combined beam's metrics characteristics of 19 Gaussian beamlets in the far-field with different T_r

 图 3 不同截断比 T_r 下, 19 路高斯子光束的远场合成光束性能指标特性的实验结果

一维强度分布曲线图。从细节图可以看出,随着 T_r 值从 0 增加到 1.3,旁瓣和中央瓣的峰值功率会略有下降,中央瓣的宽度会变宽,中央瓣的能量变高。

1.2 光纤激光相控阵实现收发一体相干合成

光纤激光相控阵相干合成技术的现有研究基本上只关注了其光束发射功能,较少关注其光束接收功能,有关其双向传输功能的研究就更鲜有报道。实际上,光纤激光相控阵不仅可用于光束发射,同时也可以用作一种高效的光束接收装置。中国科学院光电技术研究所采用 19 单元光纤激光相控阵,首次实验验证了其光束双向传输功能,包括了阵列光束相干合成输出和耦合接收光束的共相合束^[17]。实验装置如图 4 所示。

在接收过程中,在图 4 中分光棱镜下方的远场变换透镜焦点位置处放置一光纤头,连接至光源分出的一路功率为 50 mW 的光束,该光束经远场变换透镜准直后用以模拟合作点目标发出的光束。该光束覆盖整个阵列孔径,被阵列孔径各自分割成小的区域,小区域内的光束被自适应光纤准直器(AFOC)中的耦合透镜聚焦耦合进焦平面上的光纤中。每一路耦合接收光束的 5% 被光纤分路器分出去,通过光电探测器(PD)探测得到的电压值用作倾斜校正的随机并行梯度下降(SPGD)算法的性能指标,使得光纤头在 AFOC 耦合透镜焦面上进行平动以使其耦合效率最大化,这一过程被称为光纤自适应耦合(AFC)。采用基于电脑的控制,控制迭代速率为 0.93 kHz。剩余的 95% 耦合接收光束经过共相合束模块合成一路^[18-20],经光纤环形器被光电探测器接收,用来对共相合束模块中光纤相位补偿的驱动电压进行迭代运算,以最大化合成性能指标,这一过程被称为共相(co-Phasing)。

19 路 AFOC 耦合接收得到的归一化光强信号曲线如图 5 所示,开环和闭环持续的时间分别为 10 s 和 20 s,绝大部分性能指标的均方误差(MSE)在 50 ms 内收敛。归一化的闭环性能指标均值为 0.975,为开环时值 0.393 的

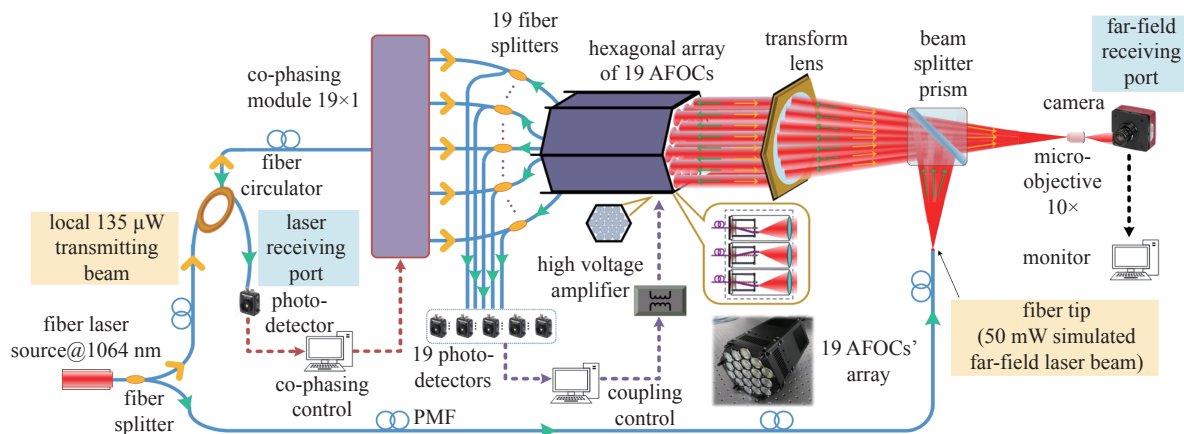


Fig. 4 Bidirectional CBC scheme based on 19-element PFLA

图4 19单元光纤激光相控阵的双向传输相干合成方案

2.48倍,相应性能指标的MSE值从0.0108降至0.0071。开环时较低的耦合效率主要是由光学校准误差及环境的微弱抖动造成的。结果显示,通过AFC控制,耦合效率可变得更优,而且更为稳定。同时,对每个AFOC来说,该控制过程是并行的,不会随着阵列规模的增大而降低性能或速率。

在接收的同时,根据光路可逆原理,当从模拟远场目标点处至分布式光纤激光阵列接收端处的全程像差被自适应地校正以后,AFOC阵列输出光束的像差就已经得到了预补偿校正。实验中AFOC阵列出射总光功率约 $135\ \mu\text{W}$,阵列准直光束被远场变换透镜聚焦,经分光棱镜透射后,在焦面上形成远场衍射光斑,光路如图4所示,阵列出射光束的远场帧平均长曝光如图6所示。当光纤自适应耦合工作时,远场光束的峰值功率以及能量分布集中度都得到了一定的提升,如图6(b)所示。当仅有共相合束控制时,远场光束的峰值功率及衍射条纹对比度,都得到了比较大的提升,但光强分布向左下角倾斜,如图6(c)所示。当耦合和共相合束同时工作时,峰值功率和条纹对比度都达到了最大化,如图6(d)所示。

光纤激光相控阵的收发一体相干合成技术在高能激光传输、自由空间光通信中具有重要的研究价值和应用前景。尤其是在自由空间光通信中,能够仅使用一套光纤激光相控阵校正大气湍流,实现低成本、高速、稳定、低延迟的光通信,是下一代通信技术的重要技术储备。

2 光纤激光相控阵的室外高效传输与湍流校正实验

2.1 光纤激光相控阵的目标在回路相干合成

在光纤激光相控阵的高效传输和大气湍流校正研究方面,当解决了单路AFOC的校正带宽和瞄准问题后^[21-23],便可以采用目标在回路(TIL)^[24]方法,开展基于无波前传感的光纤激光相控阵全程像差优化控制研究。2016年,美国Vorontsov团队用TIL方法完成了21孔径光纤阵列激光的室外7 km发射校正实验,代表着当时的业界最高水平^[9];2017年,中国科学院光电技术研究所在国内率先实现了TIL方法的合成光束发射校正,传输距离为200 m,孔径数为7^[25];2019年,国防科技大学完成了TIL方法的6孔径光纤阵列激光室外800 m发射校正实验^[26]。2021年,中国科学院光电技术研究所实现了19孔径光纤阵列激光的2 km湍流传输校正^[27],为验证光纤激光相控阵相干合成的可扩展性,又进行了38孔径的2 km湍流传输校正实验^[28],并于2022年实现了57孔径的2 km目标在回路相干合成^[29],是目前国内外公开报道的路数最多的光纤激光相控阵远距离传输全程像差校正实验。

2.1.1 19单元光纤激光相控阵的2 km室外传输校正实验

目标在回路相干合成的实验装置与原理示意图如图7所示。种子光源被放大到250 mW,然后被分成19个子光束。所有的子光束都经过压电陶瓷光纤相位补偿器(PZT-PC)来校正活塞像差,然后连接到AFOC阵列中。AFOC

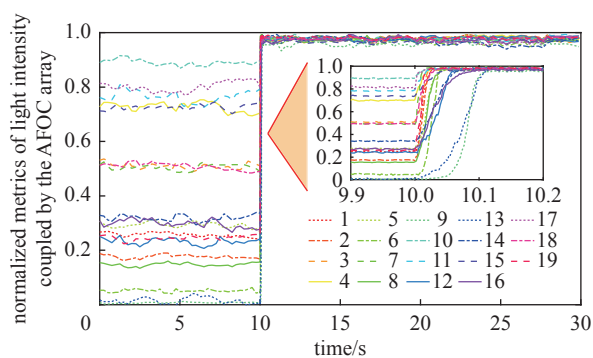


Fig. 5 Curves of normalized optical intensity coupled by the AFOC array

图5 AFOC阵列耦合接收光强的归一化曲线

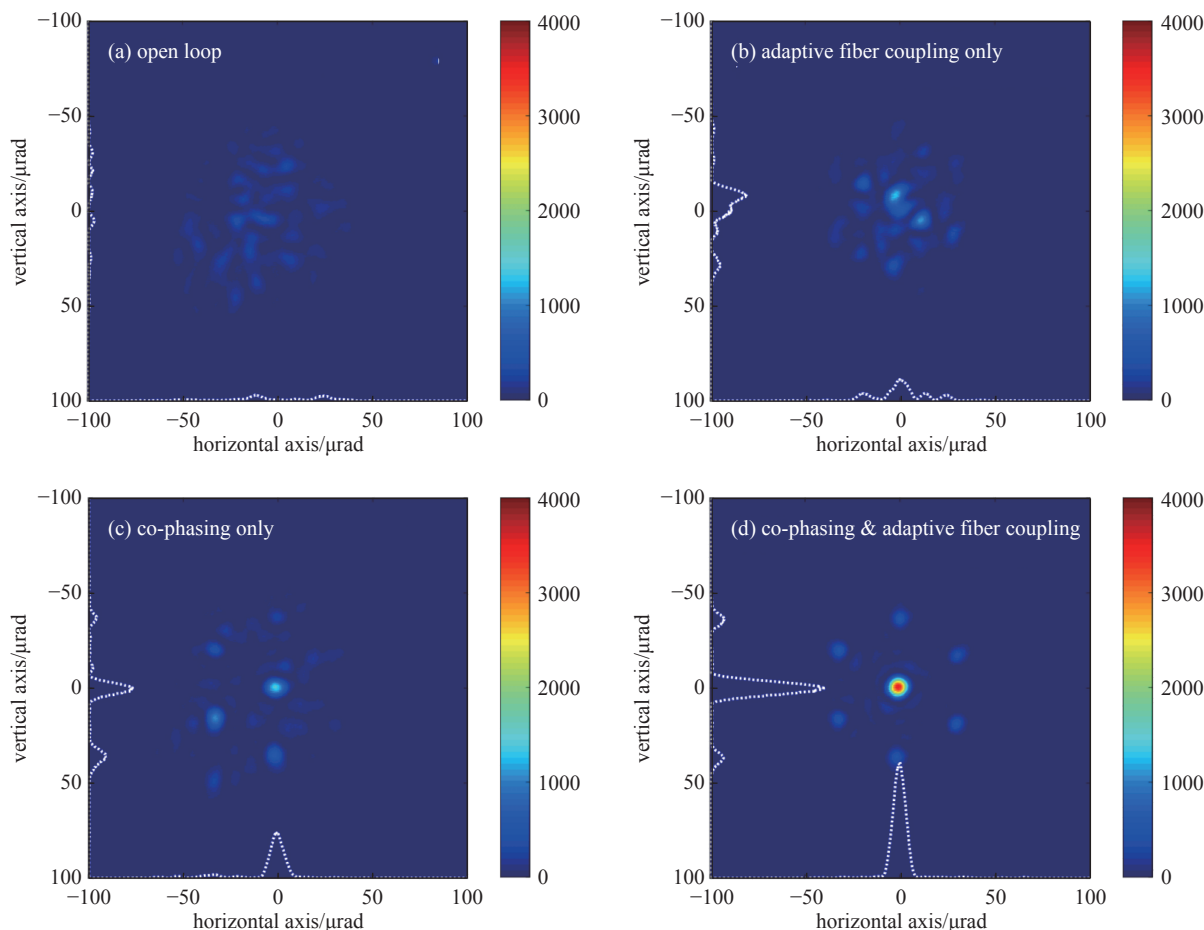


Fig. 6 Long exposure patterns in far field (frame averaged) at different stages in the closed loop control processes

图 6 闭环控制过程中不同阶段的远场衍射光斑长曝光(帧平均)图样

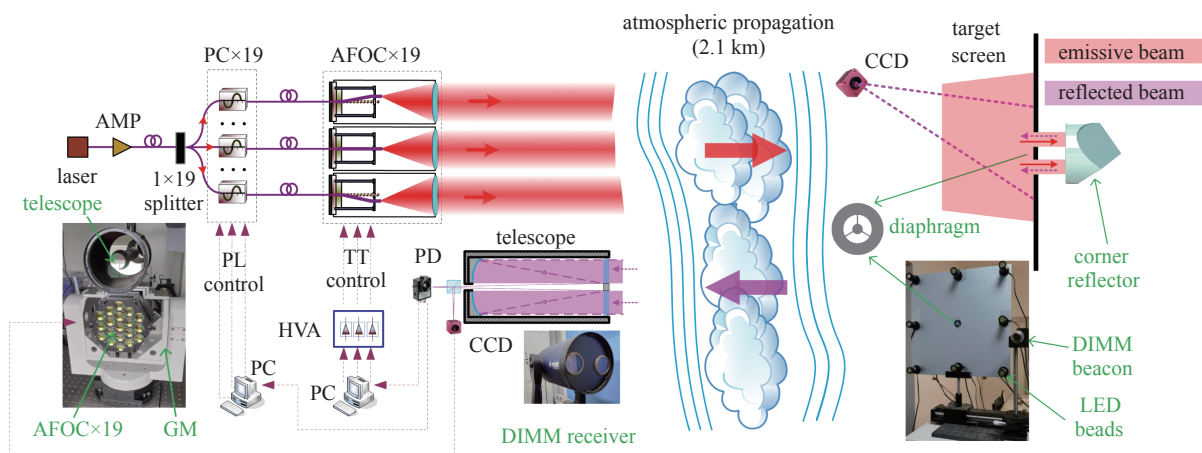


Fig. 7 Experimental setup and block diagram for CBC and pointing of a 19-element PFLA under 2 km turbulence conditions

图 7 2 km 湍流条件下 19 单元光纤激光相控阵相干合成与指向的实验装置与原理框图

控制光束方向以精确跟踪目标并校正倾斜像差。

在相干合成开始之前,使用万向架粗略地将光束指向角锥反射器,以便有足够的光信号返回到望远镜和光电探测器 PD。PD 将反射光转换成性能指标 J , J 与前述定义的 PIB 值正相关。在多云的天气下,采集了一系列不同湍流强度(以接收阵列的等效口径 D 和大气相干长度 r_0 之比 D/r_0 为特征)下相干合成的实验结果,过程分为开环(OP)、仅锁相(PL)、锁相加倾斜控制(PLTT)三个阶段;性能指标 J 被发送到控制器,控制器利用 SPGD 算法,控制校正器件精确校正活塞和倾斜像差,闭环过程的 J 变化曲线如图 8 所示。实验中 SPGD 算法的迭代速率分别为 10 kHz(校正活塞像差)和 1 kHz(校正倾斜像差)。

相干合成的效果会随着湍流的增强而减弱。与开环 OP 相比,在不同湍流强度的大气条件下 ($D/r_0=1.588$ 、 2.634 、 4.221 , $D=152$ mm), PL 状态下 PD 探测到 SPGD 算法闭环的性能指标 J 分别提升了 9.3、7.6 和 1.6 倍; PLTT 时平均性能指标 J 分别提升了 13.4、9.1 和 3.9 倍。PLTT 校正效果在不同强度的湍流条件都获得了明显提升。特别是中强湍流 $D/r_0=4.221$ 条件下(大气相干长度 r_0 较小时),仅 PL 状态时指标 J 提升效果不明显,但当倾斜像差得到校正后, PLTT 的平均指标相比 PL 提升了 2.4 倍。该实验表明倾斜像差校正对湍流下的相干合成效果有很大影响。

2.1.2 57 单元光纤激光相控阵的 2 km 室外传输校正实验

在 19 单元校正基础上,中国科学院光电技术研究所进一步完成了 57 单元光纤激光相控阵的室外传输校正实验。

该装置由 3 个 19 单元基础模块呈“品”字形排布拼接而成,如图 9 所示。保偏光源的总功率约 600 mW@ 1064 nm,阵列准直光束以共形方式传输至 2.1 km 外的目标处。目标处放置中心带孔 ($\Phi 10$ mm) 的铝板屏,由铝板前的 CCD 相机来记录屏上的激光干涉图样。采用差分图像运动监测仪 (DIMM) 测量大气湍流强度。在发射端,望远镜接收目标回光作为 SPGD 算法的性能指标,同时实现对全程像差的锁相校正 (PL, 迭代速率 10 kHz) 及倾斜校正 (TT, 迭代速率 1 kHz)。

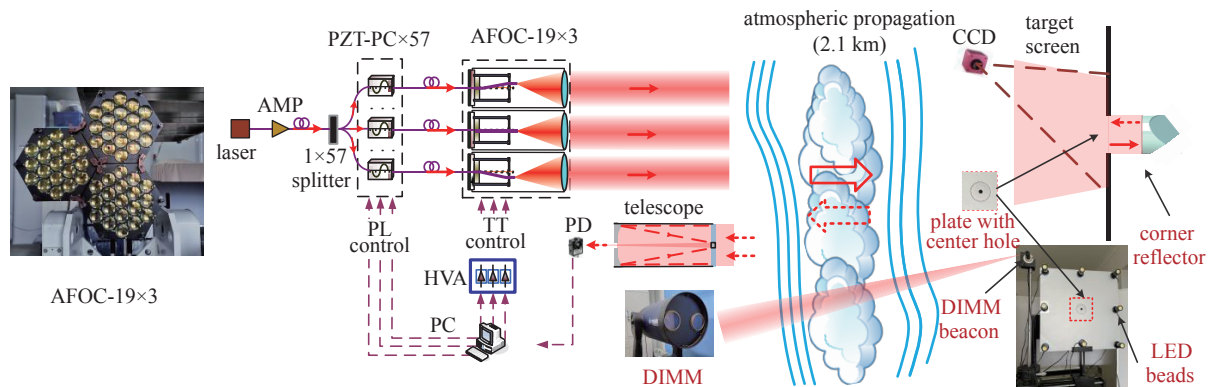


Fig. 9 Experimental principle and real device diagram of CBC and pointing of 57-element PFLA in 2.1 km transmission

图 9 57 单元光纤激光相控阵 2.1 km 传输的相干合成与指向实验原理及实物装置图

如图 10 和图 11 所示,分别为目标回光的性能指标曲线和目标屏上的长曝光图样,实验对应的大气折射率结构常数 $C_n^2 = 1.8 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$,湍流强度 $D/r_0 = 3.67$ ($D=340$ mm),为中强度湍流。PL 和 TT 两个控制过程可使回光性能指标的均值相较开环时提升约 25 倍。与单独 PL 相比,PL+TT 不仅可使性能指标有了进一步的提升,还降低了

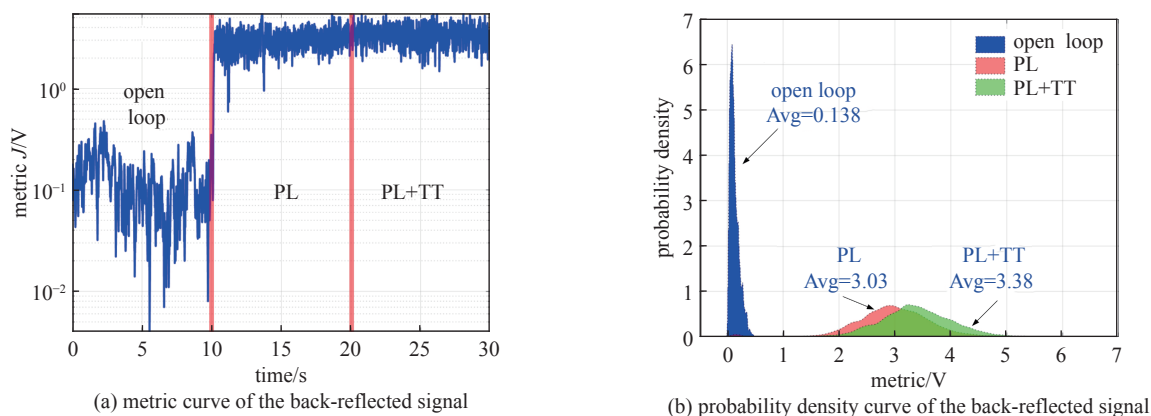


Fig. 10 Metric curve of back-reflected signals from the target of different stages in the closed-loop control process

图 10 闭环控制中不同阶段的目标回光性能指标曲线

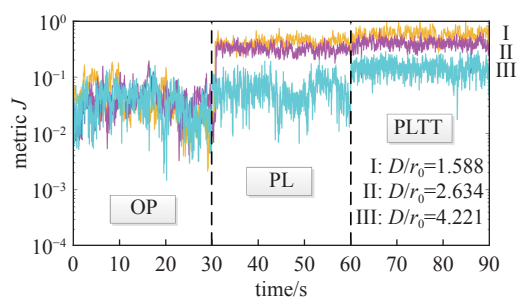


Fig. 8 Variation of the reflected optical intensity metrics of the combined beam under different turbulence intensities at the stages of OP, PL, PLTT of SPGD algorithm

图 8 不同湍流强度下,合成光束的反射回光性能指标在 SPGD 算法开环 OP、仅锁相 PL、锁相加倾斜控制 PLTT 三个阶段的变化情况

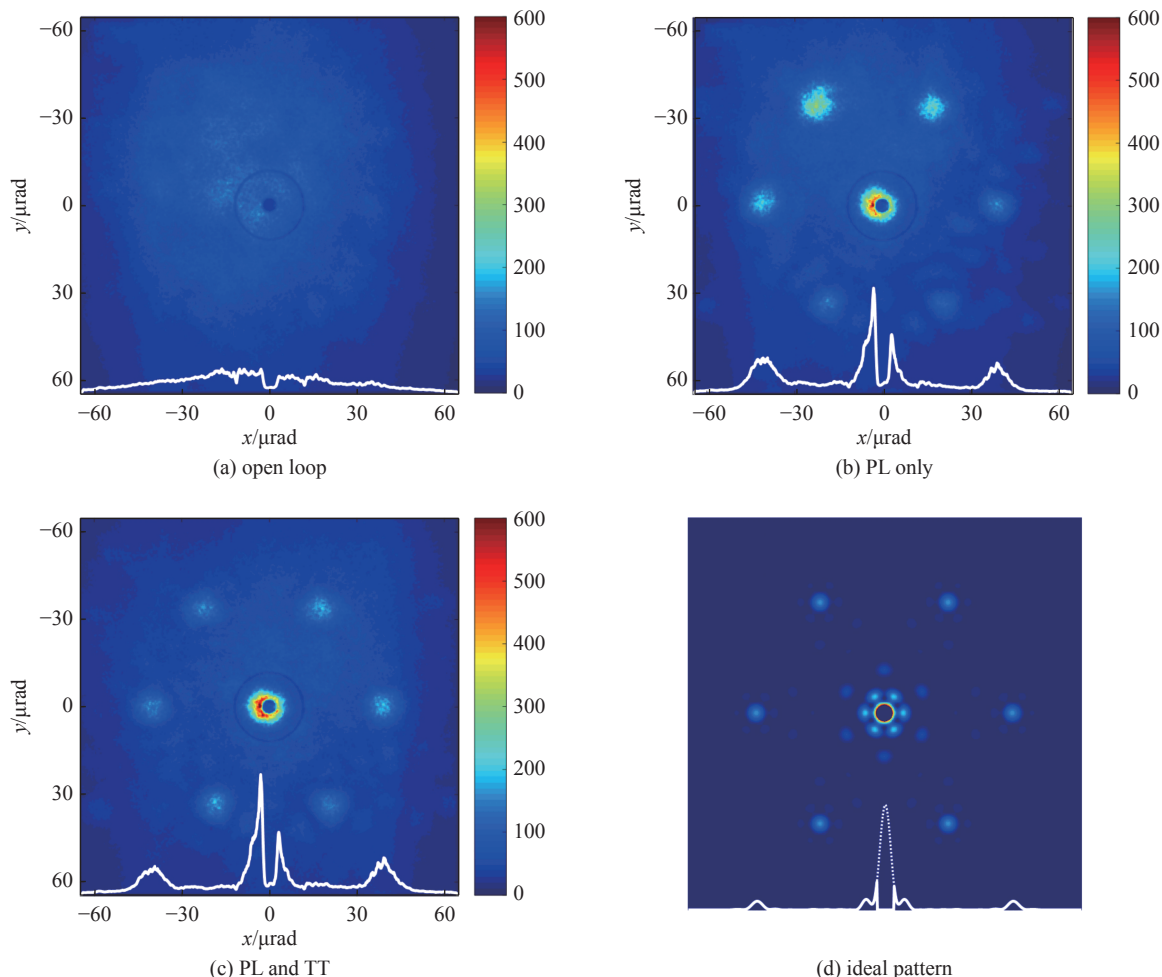


Fig. 11 Long exposure patterns on the target of different stages in the closed-loop control process

图 11 闭环控制中不同阶段目标屏上的长曝光图样

抖动幅度。图 11 中的暗圆区域对应于铝板屏的中心孔，角锥（置于铝板屏背面）的反射光沿原路返回，故不在相机的视场内。PL+TT 稳定闭环后，目标屏上获得了稳定的相干合成光斑分布（图 11(c)），其形态及旁瓣位置接近于图 11(d)所示的理想情况。实验结果证实了 19 孔径基础模块簇拼接及其相位操控实现等效合成大口径的可行性，为光纤激光相控阵自适应光学系统提供了轻量化和低成本解决方案；也验证了基于 SPGD 算法的 TIL 方法能够有效实现甚多孔径光纤阵列激光的共形传输和湍流像差抑制。

受限于采用的执行器件的工作带宽，实验中所实现的 SPGD 迭代速率在应对较短距离、中低强度湍流时，能够取得很好的校正效果，但在面对长距离、强湍流应用时会显得力不从心。可以预见，随着执行器件和控制算法的进一步发展，光纤激光相控阵今后在强湍流环境甚至是存在大量相位奇异点的深度湍流环境下也能发挥重要作用。

2.2 光纤激光相控阵在大气湍流下实现耦合接收光束的共相合束

为了验证光纤激光相控阵在真实大气湍流中实现耦合接收光束的共相合束以及湍流像差抑制能力，中国科学院光电技术研究所室外 2.1 km 水平链路下进行了 19 单元光纤激光相控阵的光束接收实验，实验方案如图 12 所示。远处发射过来的准直光束经过大气湍流到达 AFOC 阵列的接收表面，19 单元子光束经过共相合束后，合成一路并被 PD 探测接收，用作性能指标 J 。实验中，先进行共相合束，再通过 AFOC 实现倾斜校正，输出端 PD 的性能指标 J 闭环曲线如图 13 所示。从图可以看出，相比于开环

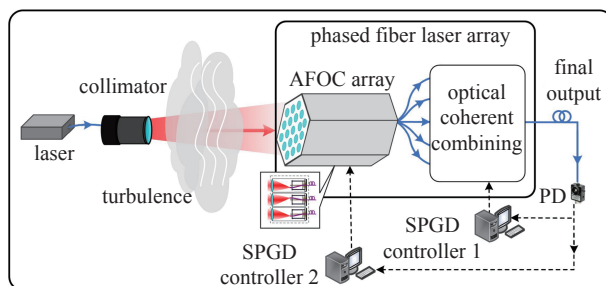


Fig. 12 CBC Receiving system diagram of a 19-element PFLA array within 2.1 km horizontal turbulence

图 12 2.1 km 水平湍流下的 19 单元光纤激光相控阵的相干合成接收系统图

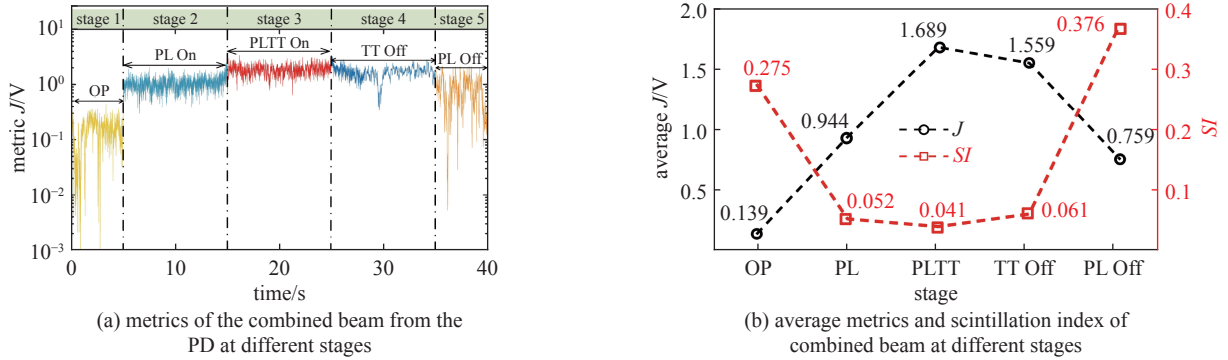


Fig. 13 Metrics characteristics of 19-element CBC receiving in 2.1 km horizontal turbulence

图 13 2.1 km 水平湍流环境下 19 单元相干合成接收的性能指标特性

OP 阶段, PL 阶段中, 性能指标 J 均值从 0.139 V 上升到了 0.944 V, 同时闪烁指数 SI 从 0.275 下降到了 0.052; 当倾斜校正在此基础上开启 (PLTT On), J 均值再次提升, 增加到了最大值 1.689 V, 同时闪烁指数也降低到了最小值 0.041; 而在 TT Off 中, 倾斜开环仅保留共相控制, J 均值下降到了 1.559 V, 但仍高于 PL 阶段, 闪烁指数增加到了 0.061, 说明了 PLTT On 中系统能对动态倾斜像差与闪烁进行补偿与抑制, 并且在 PLTT On 阶段结束后, 保留了最后一次迭代电压, 使得系统的静态倾斜像差得以校正。最后, 在 PL Off 阶段中, 得益于静态倾斜像差的校正, J 均值下降到了 0.759 V, 但仍高于 OP 阶段, 此时闪烁指数增加到了 0.376。该实验证明了光纤激光相控阵在大气湍流下实现耦合接收光束的共相合束的可行性, 既提高了空间光的耦合效率, 又为采用空间分集的激光通信提供了光学合成方法, 降低合成解调信号处理的复杂度。光学合成在物理层面上提高了到达探测器的光强大小, 降低了接收信号的闪烁系数, 为信噪比较低和闪烁指数过高而造成的通信中断提供了有效的解决方案, 保障了空间激光通信在强湍流大气条件下工作的可靠性。

3 基于多孔径波前探测的相干合成方法

在基于多孔径阵列结构的主动式相干合成系统中, 通常都是采用以 TIL 为代表的盲优化校正方法对大气湍流进行校正。但随着合成单元数目的增多, 迭代类算法的收敛速率将会变慢, 控制带宽急剧下降^[30-34]。此时, 如果能对湍流相位进行实时探测, 将极大提升光纤激光相控阵系统的控制带宽。传统望远镜系统需要对整体光束进行缩放和分光, 从而能够在小的空间尺度上进行波前操控。而光纤激光相控阵是分布式孔径系统, 阵列单元相互独立, 难以进行缩放和分光, 传统自适应光学中成熟的波前传感方法不能够直接应用。传统的夏克-哈特曼 (S-H) 波前传感器在光纤激光相控阵中难以进行共光路的设计, 在工程应用上可行性不高, 因此需要研究出新构架的、且能够与光纤激光相控阵紧密结合的波前传感和波前校正方法。

3.1 基于光纤耦合的光纤激光阵列像差探测

S-H 波前传感器是传统自适应光学中应用最为广泛的一种实时波前测量装置, 其主要特点是利用微透镜阵列将入射光束的畸变波前按子孔径区域分割, 通过一定手段获取子孔径上的波前斜率, 再采用一定的复原算法, 得到畸变光束的整体波前。由 AFOC 组成的光纤激光相控阵在结构上与 S-H 类似, 也同样具有对波前按孔径排布进行分割的功能, 因此同样可实现波前测量的功能。以光纤自适应耦合技术为基础, 中国科学院光电技术研究所提出了一种基于 AFOC 阵列的波前传感器^[35]。

基于 AFOC 阵列的波前传感器的示意图如图 14 所示, 其主要包括 AFOC 阵列、传输光纤、光电探测器阵列、高压放大器和控制平台。其中, 控制平台又包括性能指标并行优化和波前重构这两个功能模块。AFOC 阵列将入射激光束的波前 $\phi(x, y)$ 进行分割、聚焦, 并利用其内部的光纤耦合接收聚焦光束。光电探测器将耦合接收光束转化为相应的电信号 J_1, J_2, \dots, J_N 。以接收的电信号为指标, 性能指标并行优化功能模块采用优化控制算法 (如 SPGD 等) 产生二维驱动电压 $V_1^x, V_2^x, \dots, V_N^x$ 和 $V_1^y, V_2^y, \dots, V_N^y$, 该电压经高压放大后, 各自作用于 AFOC 阵列单元上, 通过调整光纤端面在二维平面上的移动实现各路耦合接收的光强最大化; 控制平台的波前重构功能模块对每路 AFOC 耦合接收光能量最大化时对应的驱动电压进行反演, 可计算得到整体波前在各子孔径上的波前斜率, 并据此采用一定的波前复原算法, 如模式法、区域法等, 即可重构畸变波前的相位。

以 Zernike 模式法为例, 通过将圆孔径内的波前相位展开成各阶相互正交的 Zernike 模式, 并基于全孔径内的

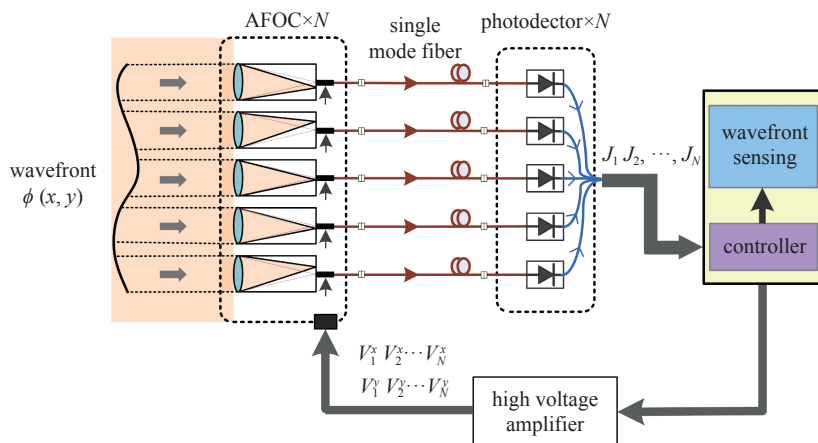


Fig. 14 Scheme of the wavefront sensor based on AFOC array

图 14 基于 AFOC 阵列的波前传感器的示意图

波前相位斜率测量数据去求解各阶模式的系数,就能得到完整的波前相位展开式。波前测量的实验结果如图 15 所示,像差板的实际像差是根据干涉仪的测量结果经过 MATLAB 软件绘制出来的,如图 15(a)所示。图 15(b)和图 15(c)分别为基于 AFOC 阵列的波前传感器复原得到的复原波前及其复原残差,复原残差 RMS 值为 74.9 nm,是像差板原始像差 RMS 值的 0.173 倍。因此,基于 AFOC 阵列的波前传感器复原得到的波前很好地吻合了被测像差,说明了该新型波前探测方法的有效性。

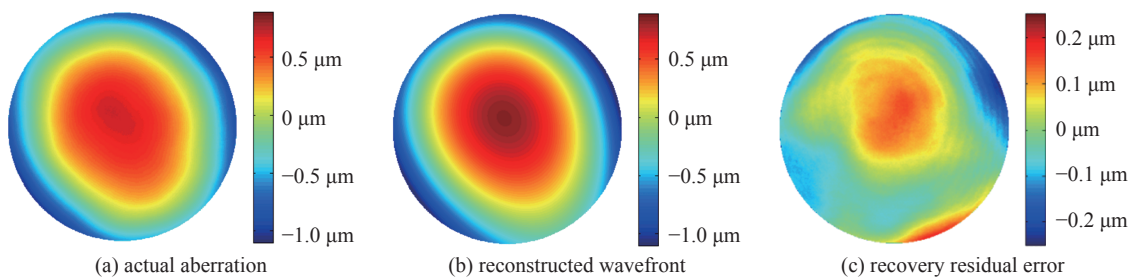


Fig. 15 Wavefront recovery results

图 15 像差复原结果

3.2 基于主动波前测量的光纤激光相控阵外部像差校正

中国科学院光电技术研究所团队提出了基于主动波前测量的光纤激光相控阵外部像差校正方法。由于各子孔径都有各自的光电探测器并且是各自独立运行的优化控制算法,因此该方法不受阵列单元规模的困扰。不仅如此,该方法能够集成到现有系统中而无需任何额外的复杂空间光学设备,使光纤激光阵列获得了不受传输延迟限制的外部像差预补偿能力。实验装置如图 16 所示。

实验结果也验证了这种自适应光学校正方法的有效性,如图 17 所示。图 17(a)表示弥散的远场光斑,这种弥

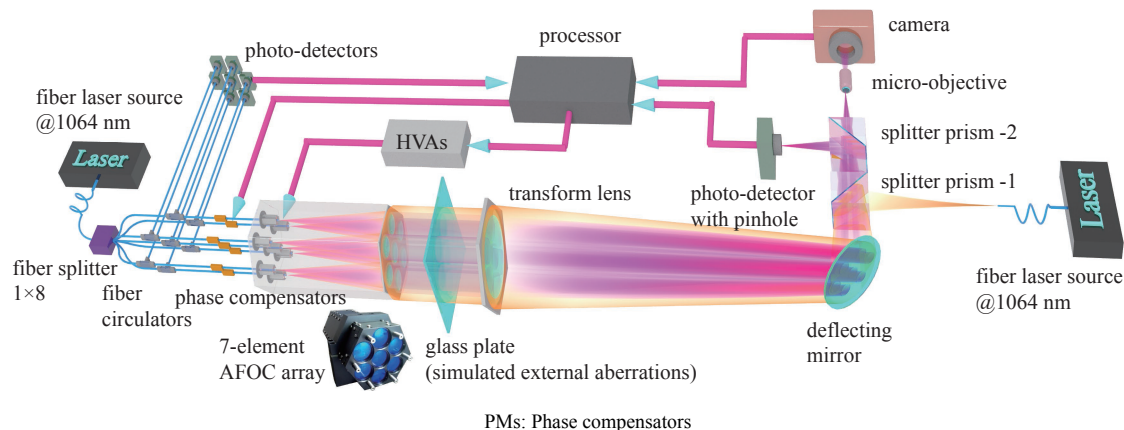


Fig. 16 Experimental setup of PFLA based on active wavefront measurement and external aberration pre-compensation

图 16 基于主动波前测量和外部像差预补偿的光纤激光相控阵实验装置图

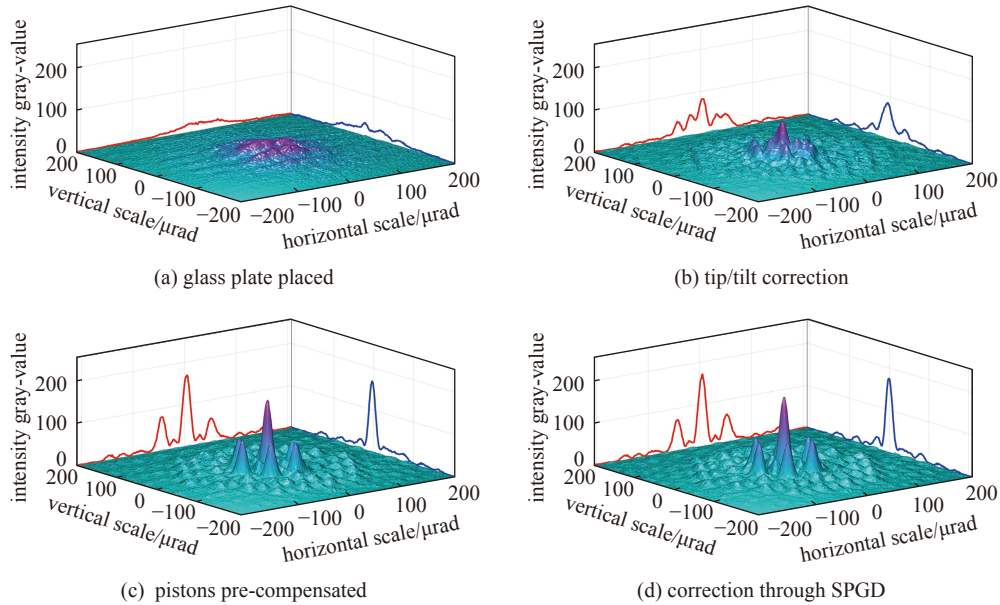


Fig. 17 Far-field spot distribution at different stages of the pre-compensation process

图 17 预补偿过程中不同控制阶段的远场光斑分布

散是由玻璃板的相位畸变引起的。在实际应用中，相位畸变可能来自湍流引起的像差和热晕现象。这种外部畸变可能会将相干合成降低为非相干合成。在校正 AFOC 阵列中每个子孔径的倾斜像差后，远场光斑的性能得到改善，如图 17(b) 所示。图 17(c) 显示了在预补偿子孔径活塞像差后获得的远场光斑，这种光斑形态非常接近 7 单元光纤激光阵列的理想相干合成远场模式，这证明了所提出的 AFOC 阵列外部像差的波前探测和预补偿方法是有效的。为了进一步验证校正性能，对比最常见的 SPGD 控制算法获得的远场光斑如图 17(d) 所示，可以看出，基于主动波前测量的光纤激光相控阵外部像差校正可以获得与 SPGD 闭环控制相同的相干合成性能。

4 基于 AFOC 和微透镜阵列的光束大角度高精度连续寻址扫描

光纤激光相控阵的终极目标是实现电控大角度光束扫描，但是面临着极大的难度和挑战。传统的万向架、旋转双棱镜、液晶相控阵等手段^[36-38]，存在着诸如体积大、转动惯量大、功率耐受性差、角度小、速度慢等问题，可以说，目前还有没有哪一种手段能够完全满足现代光学系统对灵巧光束指向能力以及口径/功率/角度/速度等的需求。

微透镜阵列扫描(MLAS)方法的扫描角度大、转动惯量小，并且可根据自身需要选择合适的材料、增透膜系，以应对功率、波段等方面的需求。针对大角度光束扫描，微透镜阵列扫描器需要小的 F 数的微透镜阵列，而最近被引入微透镜阵列扫描器的超透镜技术利用广义折射原理，通过微纳结构实现相位调制，在制作小 F 数的微透镜阵列上具有天然优势。当 F 数达到 1 时，其理论扫描视场可以达到 50° 。但是，微透镜阵列扫描通常只能实现大角度的离散寻址扫描^[39-44]。中国科学院光电技术研究所团队提出了在 AFOC 实现小角度精扫描的基础上，利用 MLAS 实现子孔径大角度粗扫描的级联扫描技术^[45-46]，解决了 MLAS 只能实现离散寻址扫描的问题。

图 18 为利用两级调控实现大角度连续寻址扫描方法的光路排布示意图，该结构主要包含两个部分，实现小角度精扫描的 AFOC 和实现大角度粗扫描的开普勒结构 MLAS。图 19 为 MLAS 与 AFOC 共同实施的连续寻址扫描

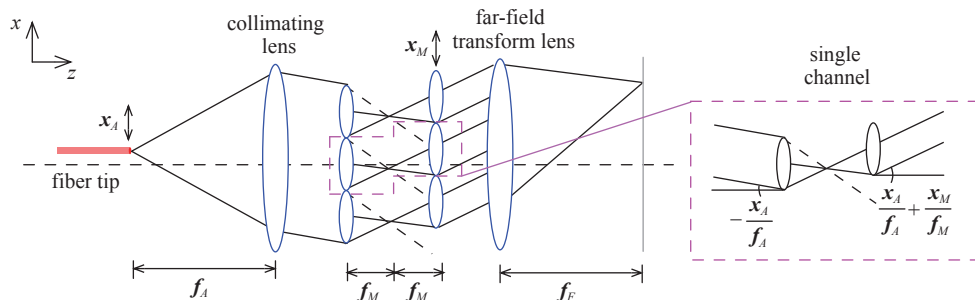


Fig. 18 Schematic diagram of the optical arrangement of the continuous beam scanning system

图 18 光束连续扫描系统的光路排布示意图

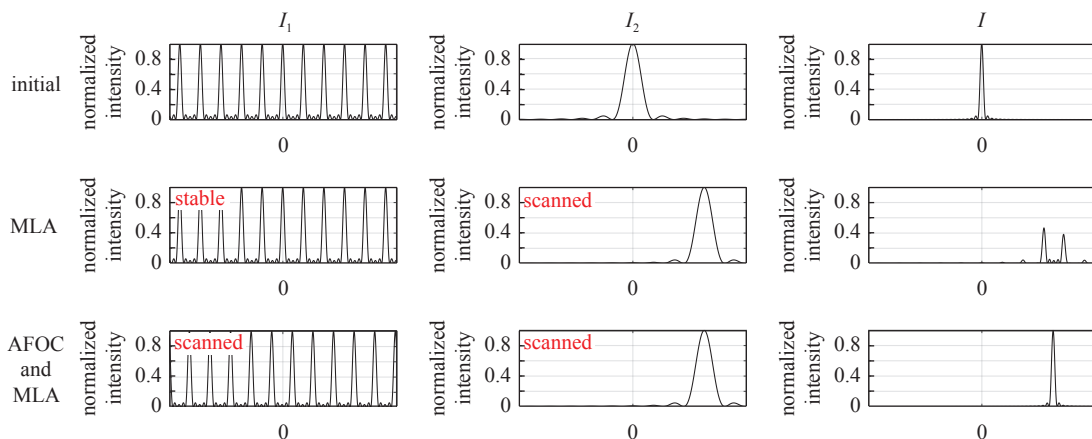


Fig. 19 Principle of continuous scanning based on AFOC and MLAS

图 19 基于 AFOC 和 MLAS 的连续寻址扫描原理图

原理, 其中 I_1 为远场网格因子, I_2 为远场包络因子, I 为扫描光束的远场分布。AFOC 中光纤端面的平移将导致包络因子和网格因子同时朝相反方向移动。而两组凸透镜阵列间的相对位移只会引起包络因子的移动, 网格因子保持不变。因此, 当按照一定策略同时调节光纤端面的位置和透镜阵列间相对位移时, 可以确保系统实现在任意角度上的连续寻址扫描。

为了对上述方法及其原理进行验证, 中国科学院光电技术研究所的研究团队搭建了如图 20 所示的实验装置。图 21 为实验装置在 7.52 m 的距离上进行光束扫描的结果。实验对比了在 $\pm 10^\circ$ 的扫描范围内单独使用 MLAS 进行离散扫描, 和使用 AFOC 配合 MLAS 进行连续扫描的长曝光光斑图。可以看出, 通过同时调节透镜阵列间的相对位移和光纤端面的相对位置, 实现了光束连续寻址扫描, 证明了将 AFOC 作为预扫描装置, 实现连续寻址的可行性。

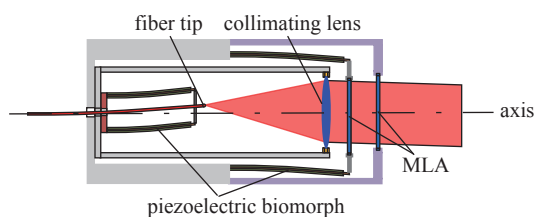
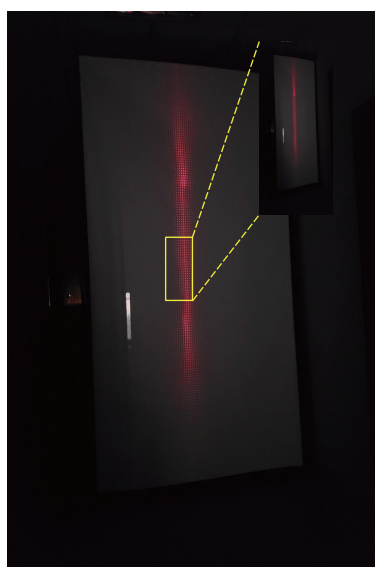
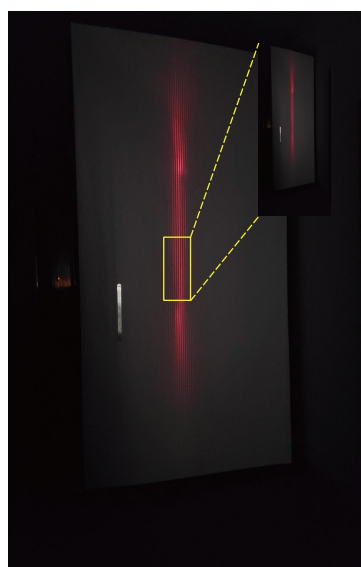


Fig. 20 Experimental structure of beam scanning with two-stage modulation of AFOC and MLAS

图 20 AFOC 和 MLAS 两级调控的光束扫描结构实现图



(a) MLAS discrete scanning



(b) AFOC+MLAS continuous scanning

Fig. 21 Long-exposure pictures of the linear scanning of MLAS alone and AFOC+MLAS

图 21 仅 MLAS、以及 AFOC+MLAS 的线形扫描的长曝光图样

5 结论

光纤激光相控阵作为一种将分布式光源与分孔径发射相融合的新体系架构, 是获得高功率、高光束质量激光的重要手段, 在近年来获得了长足的发展, 也逐渐扩展到更多的应用领域。本文总结了中国科学院光电技术研究

所近年来在光纤激光相控阵上取得的一系列进展,包括基于振幅调制的光纤激光阵列的相干合成能力优化;面向自由空间激光通信的光纤激光相控阵收发一体传输和像差校正;开展的19、38和57单元的大规模相干合成室外实验;基于主动波前测量的光纤激光相控阵外部像差校正方法;在自适应光纤准直器的基础上,提出的光束大角度连续电控扫描方法等。未来,随着光纤激光相控阵朝向更多单元、更高功率、更远距离和工程化等方向演进,以上对光纤激光相控阵进行的激光组束传输与湍流校正、激光耦合与收发一体、大角度高精度连续寻址扫描等研究,必将助力激光大气传输、空间光通信、自适应光学等理论与应用的发展。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Ma Yanxing, Wang Xiaolin, Leng Jinyong, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 951-953.
- [3] Dawson J W, Messerly M J, Beach R 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.
- [4] Vorontsov M A, Weyrauch T, Beresnev L A, et al. Adaptive array of phase-locked fiber collimators: analysis and experimental demonstration[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 269-280.
- [5] Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun, et al. Comparative study on the propagation performance of coherently combined and incoherently combined beams[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(8): 1640-1647.
- [6] Becker N C, Hädrich S, Eidam T, et al. Adaptive pre-amplification pulse shaping in a high-power, coherently combined fiber laser system[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 3916-3919.
- [7] 刘泽金, 王红岩, 许晓军. 高能半导体泵浦气体激光器[J]. *中国激光*, 2021, 48: 0401001. (Liu Zejin, Wang Hongyan, Xu Xiaojun. High energy diode pumped gas laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0401001)
- [8] Chang Hongxiang, Chang Qi, Xi Jiachao, et al. First experimental demonstration of coherent beam combining of more than 100 beams[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1943-1948.
- [9] Weyrauch T, Vorontsov M, Mangano J, et al. Deep turbulence effects mitigation with coherent combining of 21 laser beams over 7 km[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 840-843.
- [10] Rouzé B, Lombard L, Jacqmin H, et al. Coherent beam combination of seven 1.5 μm fiber amplifiers through up to 1 km atmospheric turbulence: near- and far-field experimental analysis[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(27): 8524-8533.
- [11] Han Ronglei, Sun Jianfeng, Hou Peipei, et al. Multi-dimensional and large-sized optical phased array for space laser communication[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5026-5037.
- [12] Ma Jing, Li Kangning, Tan Liying, et al. Performance analysis of satellite-to-ground downlink coherent optical communications with spatial diversity over Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(25): 7575-7585.
- [13] Geisler D J, Yarnall T M, Stevens M L, et al. Multi-aperture digital coherent combining for free-space optical communication receivers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 12661-12671.
- [14] Yuan Renzhi, Cheng Julian. Free-space optical quantum communications in turbulent channels with receiver diversity[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(9): 5706-5717.
- [15] Wang Hanbin, He Bing, Yang Yifeng, et al. Beam quality improvement of coherent beam combining by gradient power distribution hexagonal tiled-aperture large laser array[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58: 066105.
- [16] Zuo Jing, Li Feng, Geng Chao, et al. Experimental demonstration of central-lobe energy enhancement based on amplitude modulation of beamlets in 19 elements fiber laser phased array[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13: 1500113.
- [17] Geng Chao, Li Feng, Zuo Jing, et al. Fiber laser transeiving and wavefront aberration mitigation with adaptive distributed aperture array for free-space optical communications[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(7): 1906-1909.
- [18] Yang Yan, Geng Chao, Li Feng, et al. Combining module based on coherent polarization beam combining[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(7): 2020-2028.
- [19] Yang Yan, Geng Chao, Li Feng, et al. Fiber-based coherent polarization beam combining with cascaded phase-locking and polarization-transforming controls[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20: 055703.
- [20] Lao Chenzhe, Sun Jianfeng, Lu Zhiyong, et al. Multi-aperture fiber coherent combining system in urban horizontal atmospheric laser link[J]. *Optics Communications*, 2020, 466: 125172.
- [21] Huang Guan, Geng Chao, Li Feng, et al. Control bandwidth promotion of adaptive fiber-optics collimator and its application in coherent beam combination[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10: 7105513.
- [22] Huang Guan, Geng Chao, Li Feng, et al. Adaptive SMF coupling based on precise-delayed SPGD algorithm and its application in free space optical communication[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10: 7904212.
- [23] Zou Fan, Zuo Jing, Geng Chao, et al. Adaptive laser aiming through 2 km horizontal atmosphere with precise-delayed SPGD algorithm[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2021, 42(4): 462-467.

- [24] Vorontsov M A, Kolosov V V, Polnau E. Target-in-the-loop wavefront sensing and control with a Collett-Wolf beacon: speckle-average phase conjugation[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(1): A13-A29.
- [25] 耿超, 李枫, 黄冠, 等. 基于光纤自适应操控的激光相控阵技术研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47: 0103003. (Geng Chao, Li Feng, Huang Guan, et al. Research progress of laser phased array technique based on fiber adaptive manipulation (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47: 0103003)
- [26] 支冬, 马阎星, 马鹏飞, 等. 公里级湍流大气环境下光纤激光高效相干合成[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48: 1005007. (Zhi Dong, Ma Yanxing, Ma Pengfei, et al. Efficient coherent beam combining of fiber laser array through km-scale turbulent atmosphere[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48: 1005007)
- [27] 李枫, 左竞, 黄冠, 等. 19孔径光纤阵列激光经2 km湍流传输实现目标在回路的相干合成[J]. *中国激光*, 2021, 48: 0316002. (Li Feng, Zuo Jing, Huang Guan, et al. Target-in-loop coherent beam combining of a 19-aperture fiber laser array over 2 km in atmosphere[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0316002)
- [28] Zuo Jing, Zou Fan, Zhou Xin, et al. Coherent combining of a large-scale fiber laser array over 2.1 km in turbulence based on a beam conformal projection system[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 365-368.
- [29] 李枫, 邹凡, 姜佳丽, 等. 57孔径光纤激光相控阵自适应光学系统实现经2 km大气传输的目标在回路相干合成[J]. *中国激光*, 2022, 49: 0616002. (Li Feng, Zou Fan, Jiang Jiali, et al. Target-in-loop coherent beam combining of a 57-aperture fiber laser array over 2 km in atmosphere based on a adaptive optical system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49: 0616002)
- [30] Li Feng, Geng Chao, Li Xinyang, et al. Co-aperture transeiving of two combined beams based on adaptive fiber coupling control[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(17): 1787-1790.
- [31] Li Feng, Geng Chao, Huang Guan, et al. Experimental demonstration of coherent combining with tip/tilt control based on adaptive space-to-fiber laser beam coupling[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9: 7102812.
- [32] 李枫, 耿超, 李新阳, 等. 基于光纤耦合器的全光纤链路锁相控制[J]. *光电工程*, 2017, 44(6): 602-609. (Li Feng, Geng Chao, Li Xinyang, et al. Phase-locking control in all fiber link based on fiber coupler[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(6): 602-609)
- [33] Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Yanxing, et al. Active phasing a nine-element 1.14 kW all-fiber two-tone MOPA array using SPGD algorithm[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3121-3123.
- [34] Vorontsov M A, Sivokon V P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(10): 2745-2758.
- [35] 李枫, 耿超, 黄冠, 等. 基于光纤耦合的光纤激光阵列像差探测[J]. *光电工程*, 2018, 45: 170691. (Li Feng, Geng Chao, Huang Guan, et al. Wavefront sensing based on fiber coupling of the fiber laser array[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45: 170691)
- [36] 马阎星, 吴坚, 栗荣涛, 等. 光学相控阵技术发展概述[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49: 20201042. (Ma Yanxing, Wu Jian, Su Rongtao, et al. Review of optical phased array techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49: 20201042)
- [37] Li Anhu, Liu Xingsheng, Sun Wansong. Forward and inverse solutions for three-element Risley prism beam scanners[J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7677-7688.
- [38] Li Anhu, Jiang Xuchun, Sun Jianfeng, et al. Laser coarse-fine coupling scanning method by steering double prisms[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(3): 356-364.
- [39] Gokce S K, Holmstrom S, Hibert C, et al. Two-dimensional MEMS stage integrated with microlens arrays for laser beam steering[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2011, 20(1): 15-17.
- [40] Abiri B, Aflatouni F, Rekihi A, et al. Electronic two-dimensional beam steering for integrated optical phased arrays[C]//OFC 2014. 2014: 1-3.
- [41] Watson E A, Whitaker W E, Brewer C D, et al. Implementing optical phased array beam steering with cascaded microlens arrays[C]//Proceedings IEEE Aerospace Conference. 2002: 3.
- [42] Goltsov W C, Holz M. Agile beam steering using binary optics microlens arrays[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(11): 1392-1397.
- [43] 黄鹰, 向思桦, 陈四海, 等. 微型光扫描器研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(1): 26-29. (Huang Ying, Xiang Sihua, Chen Sihai, et al. Study on microoptical scanner[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 26(1): 26-29)
- [44] 谢洪波, 王瑶, 毛晨盛, 等. 一种可实现收发一体连续扫描的微透镜阵列[J]. *应用光学*, 2018, 39(5): 613-618. (Xie Hongbo, Wang Yao, Mao Chensheng, et al. Micro-lens array for integrative transmitting and receiving continuous scanning[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(5): 613-618)
- [45] Yang Xu, Geng Chao, Li Feng, et al. High-resolution beam scanning technique with microlens array and adaptive fiber-optics collimator[J]. *Optics Express*, 2021, 29(1): 359-367.
- [46] Yang Xu, Huang Guan, Li Feng, et al. Continuous tracking and pointing of coherent beam combining system via target-in-the-loop concept[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(20): 1119-1122.