

中国激光

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

当前,光纤相控阵体制的激光相干合成技术在合成路数和合成功率方面都取得了突破,根据公开文献报道,最多合成路数和最高合成功率已分别达到 107 路和 20 kW。但是,该技术离实际的激光传输应用还有一定差距,必须要解决等效大口径问题、共形发射问题、湍流补偿问题以及实现轻量化和低成本的问题。光纤激光相控阵自适应光学(AO)系统通过对子孔径波前活塞和倾斜相位的主动操控和闭环补偿有望解决以上问题,实现阵列激光的高效传输及其在目标处的相干合成,是近期该领域的研究热点。2016 年,美国戴顿大学 Vorontsov 团队完成了基于目标在回路(TIL)的 21 孔径光纤阵列激光于室外 7 km 水平大气的传输和像差校正,证明了光纤相控阵的 AO 校正能力。2021 年,法国国家宇航研究中心基于单探测器电光频率标记相干锁定(LOCSET)技术,实现了 7 孔径光纤阵列激光经 1 km 水平大气的传输和 TIL 校正(仅锁相控制)。同年,瑞典国防研究局基于随机并行梯度下降(SPGD)算法实现了 4 孔径光纤阵列激光千米级传输和低速率(百赫兹级)的 TIL 校正演示。目前,国内开展光纤激光相控阵 AO 系统 TIL 闭环控制研究的单位较少,仅中国科学院光电技术研究所(本团队)和国防科技大学分别在 2017 年和 2019 年报道过

1 km 以内传输距离的 TIL 激光相干合成实验研究。2020 年,本团队报道了当时国内路数最多(19 孔径)、距离最远(2.1 km)的光纤相控阵激光室外传输全程像差校正实验研究。近期,本团队提出了借由多个 19 孔径基础模块的簇拼接构建等效大口径光纤激光相控阵 AO 系统的研究思路,并搭建了以 57 孔径阵列激光为代表的相位操控技术验证装置,演示了经 2.1 km 大气传输的 TIL 相干合成实验。这是目前国际上公开报道的最多孔径(57 孔径)的千米级光纤阵列激光室外传输全程像差校正实验。

实验原理及装置实物图如图 1 所示。利用由自适应光纤准直器(AFOC)构成的 19 孔径光纤激光阵列作为基础模块(填充因子为 0.902,单元孔径 $\Phi 28$ mm,相邻孔径中心距 31 mm),三组呈“品”字形排布的基础模块拼接成 57 孔径光纤阵列激光发射装置。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,前置 CCD 相机记录屏上的激光干涉图样。采用差分图像运动监测仪(DIMM)测量大气的湍流强度。在发射端,望远镜接收目标回光并将其作为 SPGD 算法的性能指标,据此实现对全程像差的锁相校正(PL,迭代速率为 10 kHz)及倾斜校正(TT,迭代速率为 1 kHz)。

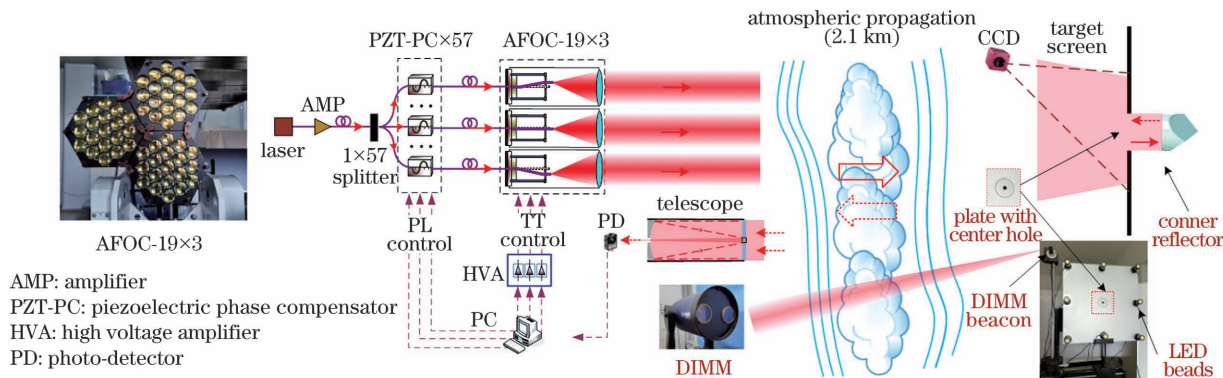


图 1 实验原理及实物装置图

Fig. 1 Experimental principle and setup diagram

图 2 和图 3 分别为目标回光的性能指标曲线以及目标屏上的长曝光图样,实验对应的大气湍流强度约为 $C_n^2 = 1.8 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ ($D/r_0 = 3.67$, 其中 D 为阵列等效发射口径, r_0 为大气相干长度), 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 不仅可使性能指标进一步提升, 还降低了抖动幅度。图 3 中的暗圆区域对应铝板屏的中心孔, 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, 如图 3(c) 所示, 其形态及旁瓣位置接近于图 3(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 AO 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。未来, 本课题组将优化控制系统, 使其满足更强湍流、更长传输距离及更多孔径的 TIL 相干合成需求。

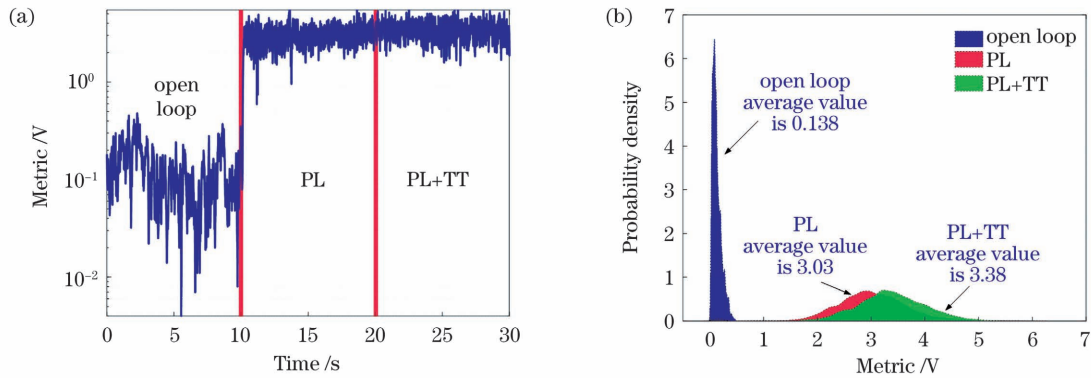


图 2 目标回光的性能指标曲线及其概率密度曲线。(a)性能指标曲线;(b)概率密度曲线

Fig. 2 Metric curve of back-reflected signal from the target and its probability density curve. (a) Metric curve; (b) probability density curve

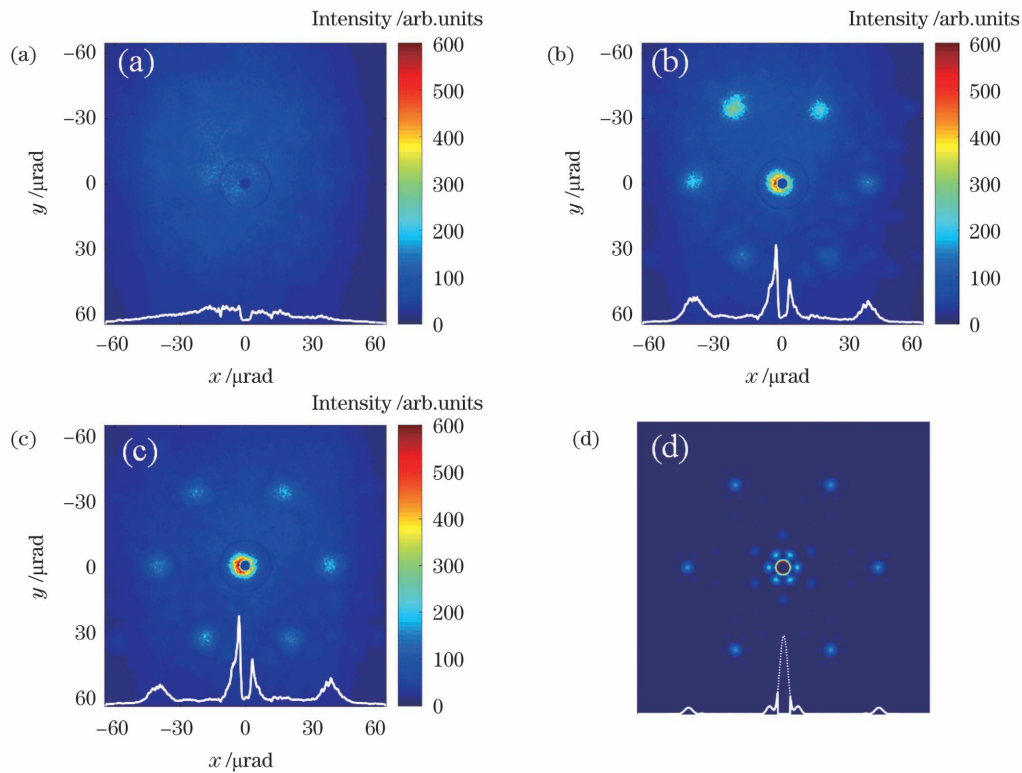


图 3 目标屏上的长曝光图样。(a)开环;(b)仅 PL;(c)PL+TT;(d)理想情况

Fig. 3 Long exposure patterns on target. (a) Open loop; (b) PL only; (c) PL and TT; (d) ideal pattern

李枫^{1,2}, 邹凡^{1,2}, 姜佳丽^{1,2}, 左竞^{1,2}, 周鑫^{1,2}, 李自强^{1,2}, 刘家盈^{1,2}, 潘丽康^{1,2},
潘姿廷^{1,2}, 杨旭^{1,2}, 黄冠^{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, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

通信作者: *blast_4006@126.com

收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2021-12-17; 录用日期: 2021-12-28