

公里级湍流大气环境下光纤激光高效相干合成

支冬, 马阎星, 马鹏飞, 粟荣涛, 陈子伦, 周朴, 司磊

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 光纤激光阵列光束相干合成可在提升输出激光总功率的同时保持良好的光束质量, 进而提升激光亮度, 是激光技术领域的研究热点。目前光纤激光相干合成实验已在实验室内获得了大量、良好的验证, 然而在真实湍流大气环境下的长距离传输实验却开展较少, 相干合成技术对湍流大气引入的相位畸变的校正能力尚需实验验证。目标在回路技术是实现长距离湍流大气环境下阵列光束到靶相干合成的重要方案, 是近年来国际上的重点研究方向。基于自适应光纤准直器阵列和共形发射系统, 搭建了 6 路光纤激光目标在回路相干合成系统, 成功校正了湍流大气带来的相位畸变, 实现了公里级作用距离、湍流大气环境下阵列光束在目标表面的相干合成。

关键词: 相干合成; 光纤激光; 目标在回路; 湍流大气; 共形发射

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1005007

Efficient coherent beam combining of fiber laser array through km-scale turbulent atmosphere

Zhi Dong, Ma Yanxing, Ma Pengfei, Su Rongtao, Chen Zilun, Zhou Pu, Si Lei

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Coherent beam combining (CBC) of fiber laser array can improve the total output laser power while maintaining good beam quality, thus improving the laser brightness. CBC of fiber laser array has been a research hotspot in the field of laser technology and has attracted much attention. At present, lots of CBC experiments have been successfully established and verified in the laboratory. However, there is few long distance propagation experiment carried out in real turbulent atmospheric environment. The ability of compensating the phase distortions introduced by the turbulent atmosphere still needs to be tested and verified experimentally. The target-in-the-loop technique is an important and useful method to realize the coherent combining of array beams at the target surface in a real long-distance turbulent atmospheric environment. CBC of fiber lasers based on target-in-the-loop technique becomes a key goal and an important research direction since it has been proposed. Based on the adaptive fiber collimator array and conformal projection system, a target-in-the-loop CBC system of six fiber amplifiers was established, which successfully compensated the phase distortions and realized CBC at the target surface through a kilometer-scale propagation distance with atmospheric turbulence.

Key words: coherent beam combining; fiber laser; target-in-the-loop; turbulent atmosphere; conformal projection

收稿日期: 2019-05-05; 修订日期: 2019-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61905278, 61705265, 61378034)

作者简介: 支冬(1989-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光束控制、光束合成方面的研究。Email: zhidong38173103@163.com

随着光纤激光功率和类型的不断拓展,相干激光在多领域均获得了广泛应用^[1-3]。光纤激光相干合成技术可以在保持高光束质量的同时实现更高功率的输出,一直是国际上的研究热点^[4-7]。高功率光纤激光相干合成系统的长距离应用和到靶功率密度的提升是目前相干合成领域的国际难题^[8-9]。将目标在回路技术应用于阵列光束相干合成系统在真实湍流大气环境中的长距离传输领域,有望通过仅近场控制便实现有效消除所有扰动因素,尤其是大气湍流带给阵列光束波前相位的影响,从而有效提升阵列光束到达目标表面的光束亮度^[10-12]。目前,美国陆军实验室和代顿大学已开展了 7 路和 21 路光纤激光 7 km 长距离目标在回路相干合成的实验研究,且取得了较好效果^[13]。国内仅国防科技大学和中国科学院光电技术研究所开展了较短传输距离的目标在回路相干合成实验^[5,14],但湍流大气环境下更长距离的目标在回路相干合成尚未见相关实验报道。

最近,国防科技大学前沿交叉学科学院开展了公里级湍流大气环境下的目标在回路相干合成实验研究。通过主动倾斜相位控制和活塞相位控制,成功实现了 6 路光纤激光在 0.8 km 传输距离下的目标在回路高效相干合成,中央主瓣能量占比达到 21.1%,是无主动相位控制情况的 3.1 倍。

此次实验在国防科技大学开展,实验场地选取相距 0.8 km 的两栋建筑物,分别放置发射平台和目标平台。实验中应用的阵列光束发射系统为本单位自行研制的光纤激光共形发射系统,由自适应光纤准直器阵列构成^[15]。自适应光纤准直器主要包含光纤端帽控制器和高效准直透镜组。光纤端帽控制器采用柔性铰链机构和堆叠型压电陶瓷实现对光纤端帽的高频高精度二维位移控制,从而实现对各准直光束的高精度倾斜控制,进而实现阵列光束精准到靶。该自适应光纤准直器为基于柔性铰链的一体化改进型结构,其性能如图 1 所示。在给压电驱动器施加 0.1 Hz、0~150 V 的正弦控制信号时,该控制机构可驱动光纤端帽实现 0.1 Hz、0~38.8 μm 的正弦型位移变化。通过平行方向和垂直方向的位移变化曲线可以看出,其线性度很高,如图 1(a)所示。通过优化设计,该自适应光纤准直器的谐振频率大大提升至约 3 kHz,如图 1(b)所示。通过合理设计,高效准直透镜组实现了填充比(单元光束口径 d /相邻光束间距 D)

高达 96.7%、光束束腰半径 $\omega_0=32.5$ mm、光束截面系数($2\omega_0/d$)高达 1.12 的阵列准直光束高效拼接^[15]。

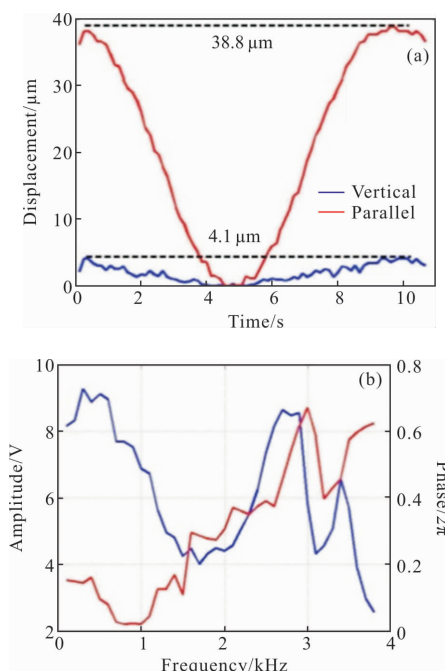


图 1 新型自适应光纤准直器性能(a)位移变化曲线;(b)振幅与相位的频率响应曲线

Fig.1 Properties of new adaptive fiber optics collimator (a) curves of displacements; (b) Frequency response curves of amplitude and phase

该系统选取桶中功率作为评价函数,选用角锥作为合作目标,反射回光经回光接收器接收后,由光电探测器收集并传递给倾斜与活塞相位控制系统。倾斜控制和锁相控制算法分别采用 SPGD 算法^[6]和单抖动算法^[6],SPGD 算法控制频率为 100 Hz,单抖动算法抖动频率为 100 kHz。实验方案示意图如图 2(a)所示。实验选取了长度为 0.8 km 的传输距离,放置于建筑物 A 的发射平台主要包含光源系统、共形发射系统、回光接收系统和控制系统,而放置于建筑物 B 的目标平台主要由目标和探测系统组成。

不同阶段的归一化评价函数曲线及对应的评价函数概率密度分布分别如图 2(b)和(c)所示。在系统开环阶段(OFF Control),归一化评价函数均值仅为 0.29;当仅倾斜控制系统开启(TT Control)及倾斜锁相控制同时开启(TT&PL Control)后,归一化评价函数均值分别提升至 0.42 和 0.67。不同阶段的长曝光目标面光强二维分布分别如图 2(d)~(f)所示,可以看

出目标靶面的光强归一化极大值由开环时的 0.25 提升至倾斜与活塞同时控制时的 1.00, 达到开环时

的 4 倍; 中央主瓣区域内的光强积分值达到总靶面光强的 21.1%, 为开环阶段的 3.1 倍。

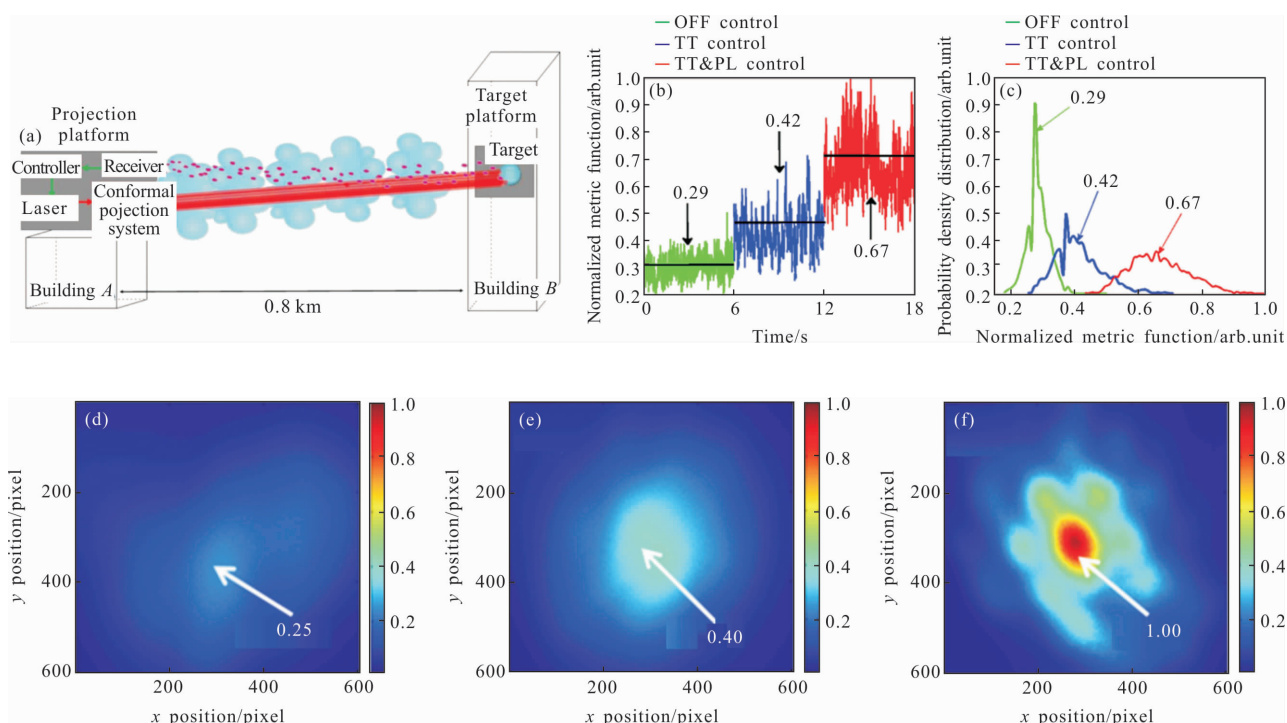


图 2 (a) 实验方案示意图; (b) 归一化评价函数曲线; (c) 评价函数概率密度分布; (d)~(f) 不同阶段的长曝光目标面光强二维分布 ((d) 开环; (e) 仅倾斜控制; (f) 倾斜与锁相同时控制)

Fig.2 (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) Normalized metric function; (c) Probability density distribution of metric function; (d)–(f) Long exposure intensity distributions at the target surface in different situations ((d) Open loop; (e) Only tip-tilt control is on; (f) Both tip-tilt control and phase-locking control are on)

通过对比美国代顿大学已开展的 21 路光纤激光 7 km 长距离目标在回路相干合成的实验结果, 发现在控制路数和控制效果上尚存在较大差距。这是由于该系统设计的单路光束尺寸 58 mm 远大于代顿大学的 37 mm, 这就从本质上带来了系统矫正大气湍流的能力远弱于代顿大学的实验。该系统的优势在于采用光纤端帽作为激光输出端, 其在高功率拓展能力上要优于代顿大学采用的裸光纤输出方式。后续研究应以进一步优化倾斜控制器件与控制算法为突破口, 寻找高功率下的稳定高效控制方案, 提升湍流校正能力以及相干合成效果。

此次实验取得了良好的控制结果, 验证了目标在回路技术在相干合成长距离传输领域应用的可行性。该系统运行稳定, 有望进一步向长距离、大阵元、高功率拓展。

参考文献:

[1] Li Jingzhao, Chen Zhenqiang, Zhu Siqi. Passively Q-switched laser with a Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG composite crystal [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 55–61. (in Chinese)

[2] Cheng Xue, Wang Jianli, Liu Changhua. Beam combining of high energy fibre lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103011. (in Chinese)

[3] Lv Tao, Zhang Heyong, Guo Jin, et al. Acquisition and enhancement of remote voice based on laser coherent method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(3): 569–575. (in Chinese)

[4] Su Rongtao, Zhou Pu, Zhang Pengfei, et al. Review on the progress in coherent beam combining of ultra-short fiber lasers (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018,

- 47(1): 0103001. (in Chinese)
- [5] 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 (1): 0103003. (in Chinese)
- [6] Zhou Pu, Liu Zejin, Wang Xiaolin, et al. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15: 248–256.
- [7] Bourdon P, Lombard L, Durécu A, et al. Coherent combining of fiber lasers[C]//SPIE, 2017, 10254: 1025402.
- [8] Nelson W, Sprangle P, Davis C C. Atmospheric propagation and combining of high-power lasers [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1757–1764.
- [9] Vorontsov M, Filimonov G, Ovchinnikov V, et al. Comparative efficiency analysis of fiber-array and conventional beam director systems in Volume Turbulence [J]. *Applied Optics*, 2016, 55: 3887–4192.
- [10] Wang Weibing, Wang Tingfeng, Guo Jin. Simulation on the law of wave-front shaping with stochastic parallel gradient descent algorithm for adaptive optics [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2014, 7(3): 411–420. (in Chinese)
- [11] Vorontsov M. Speckle-effects in target-in-the-loop laser beam projection systems[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2013, 2: 369–395.
- [12] Wei Peifeng, Liu Xinyue, Lin Xudong, et al. Temporal simulation of atmospheric turbulence during adaptive optics system testing [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2013, 6(3): 371–377. (in Chinese)
- [13] Weyrauch T, Vorontsov M, Mangano J, et al. Deep turbulence effects mitigation via coherent combining of 21 laser beams over 7 km[J]. *Optics Letters*, 2016, 41: 740–743.
- [14] Ma Yanxing, Zhou Pu, Tao Rumao, et al. Target-in-the-loop coherent beam combination of 100W level fiber laser array based on an extended target with a scattering surface [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(7): 1019–1021.
- [15] Zhi Dong, Zhang Zhixin, Ma Yanxing, et al. Realization of large energy proportion in the central lobe by coherent beam combination based on conformal projection system [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 2199.
- [16] Ma Yanxing, Zhou Pu, Wang Xiaolin, et al. Coherent beam combination with single frequency dithering technique [J]. *Optics Letters*, 2010, 35: 1308–1310.