

目标在回路光纤激光阵列自适应锁相技术研究

陶汝茂 马阎星 董小林 司磊 邹永超 周朴* 刘泽金

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 对目标在回路(TIL)光纤激光阵列自适应锁相技术开展了理论与实验研究。介绍了目标在回路自适应锁相光纤激光阵列的基本结构和单抖动法的基本原理。搭建了两路高功率光纤放大器,利用信号处理器执行单抖动算法,实时控制光束的相位,实现了两路10 W级光纤放大器的目标在回路自适应相位锁定。实验结果表明,目标在回路自适应锁相光学系统能够有效控制光纤激光的相位噪声,实现阵列光束的相位锁定,光斑对比度可提高到73%。

关键词 光纤光学;光纤放大器;目标在回路;单抖动法;自适应锁相技术

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702012

Study of Target-in-the-Loop Fiber Laser Array Adaptive Phase-Locking Technique

Tao Rumao Ma Yanxing Dong Xiaolin Si Lei Zou Yongchao Zhou Pu Liu Zejin

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

Abstract The target-in-the-loop (TIL) fiber laser array adaptive phase-locking technique is studied theoretically and experimentally. The system configurations of TIL adaptive phase-locked fiber laser array and the fundamental theory for single-dithering algorithm are introduced. The performance of TIL adaptive phase-locked fiber laser array under high-power laser is studied. Two high-power fiber amplifiers are set up and the adaptive phase-locking of two 10-W-level fiber amplifiers is accomplished by implementing single-dithering algorithm on a signal processor. The experimental results demonstrate that the optical phase noise for each beam channel can be effectively controlled by the TIL adaptive optics system and the fringe contrast is increased to 73%.

Key words fiber optics; fiber amplifier; target-in-the-loop; single-dithering algorithm; adaptive phase-locking technique

OCIS codes 230.2285; 060.2320; 060.2380; 140.3510

1 引言

由于受到掺杂光纤的非线性效应、光学损伤及热损伤等物理机理的限制,大幅度地提高单个激光器的功率是相当困难的^[1]。采用光纤激光阵列相干合束,既能提高总的激光功率,又能保持光纤激光良好的光束质量,并为整个系统的热管理提供便利^[2~4],是目前国内外激光技术领域的研究热点。国内外研究人员开展了大量相干合成的研究,目前的研究重点集中于对激光器或放大器的相位控制,

使得激光阵列获得锁相输出^[5~15]。然而,不仅放大器噪声等会影响光纤激光阵列输出激光的传输性能,激光阵列在传输过程中还不可避免地会受到大气湍流的影响^[16~19],甚至会破坏相干性,而此前的相干合成研究大多未考虑此类影响。自适应光学被认为是消除大气湍流对光学系统传输效果影响的最有效工具之一,得到广泛研究^[20]。然而传统自适应光学都是基于合作目标,而实际的高能激光系统应用场合通常为非合作目标。Vorontsov等^[21~24]提

收稿日期:2011-02-14; 收到修改稿日期:2011-03-10

作者简介:陶汝茂(1987—),男,硕士研究生,主要从事高能激光技术等方面的研究。E-mail: taorumao@sohu.com

导师简介:司磊(1971—),男,博士,研究员,主要从事高能激光等方面的研究。E-mail: w_zt@163.com

*通信联系人。E-mail: zhoupu203@163.com

出了目标在回路(TIL)控制概念,该结构适用于非合作目标,为解决扩展非合作目标表面能量集中度的问题提供了新的方法。2002年,Vorontsov等^[25]在实验室利用随机并行梯度下降算法开展了毫瓦级目标在回路自适应光学系统的验证实验,取得了良好的效果;国内相关研究还未见报道。本文搭建了两路大功率光纤放大器,并进行了目标在回路光纤激光阵列自适应锁相实验,利用单抖动算法验证了高功率情况下目标在回路自适应锁相光学系统的性能。研究结果为高能光纤激光系统的工程应用提供了一定的参考。

2 基本原理

基于单抖动算法的光纤激光阵列目标在回路控制自适应光学系统的原理如图1所示^[26]。工作过程为:种子源输出激光被分为若干路,分别利用相位调制器进行相位调制,然后通过光纤放大器进行功率放大,经准直器准直后,传输到扩展目标靶面。用透镜收集经目标靶面散射后的光束,通过探测器将光信号转换为电信号。其输出信号经算法控制器后,产生相位控制信号反馈给相位调制器,形成闭环控制,实现各路光束间的相位锁定。

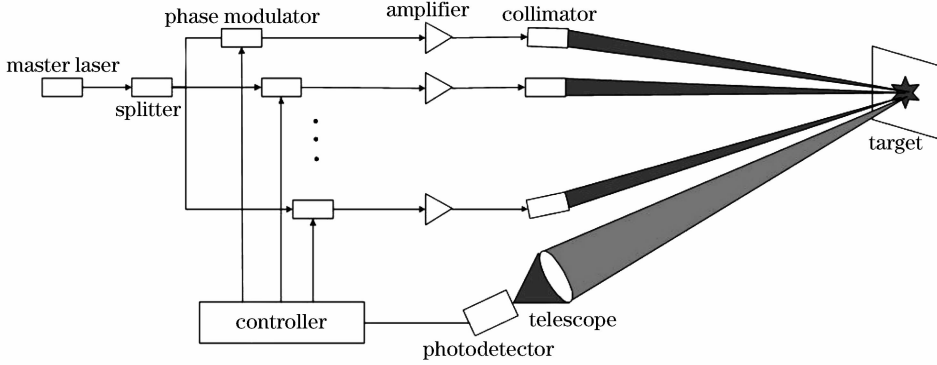


图1 目标在回路自适应锁相光纤激光阵列原理图

Fig.1 Scheme of a TIL adaptive phase-locked fiber laser array

采用单抖动算法进行控制,其基本原理为^[27]:

假设 $E_i(t)$ 为未调相光束光场,则有

$$E_i(t) = E_{i0} \cos(\omega_L t + \phi_i). \quad (1)$$

在 $t(t_0 < t < t_1)$ 时刻,调制信号施加在第1束光,则光场可以写成

$$E_1(t) = E_{10} \cos[\omega_L t + \phi_1 + \beta \sin(\omega t)], \quad (2)$$

(1),(2)式中 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ 代表不同的时刻, E_{i0} 为第 i 束光的振幅, ω_L 为光频率, ϕ_i 为第 i 束光的初始相位, β 和 ω 分别为相位调制幅度和调制频率。各光束叠加后光场的瞬时能流密度为

$$I(t) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left[\sum_{i=1}^n E_i(t) \right] \left[\sum_{j=1}^n E_j(t) \right], \quad (3)$$

式中 ϵ_0 代表自由空间介电常数, μ_0 代表自由空间磁导率。探测器输出电流可以表示为

$$I_{PD}(t) = R_{PD} \cdot A \cdot I(t), \quad (4)$$

式中 R_{PD} 为探测器灵敏度, A 为落在探测器上的光斑面积。则探测器输出电流中含有调相的各种载波频率,若用与载波信号相同频率的电信号与探测器输出电流相乘并积分,就可以得到每束光相位相对于参考光束的误差

$$V_i = R_{PD} \cdot A \cdot E_{i0} \cdot J_1(\beta) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \times \left[\sum_{j=2}^n E_{j0} \sin(\phi_j - \phi_i) \right], \quad (5)$$

式中 V_i 为第 i 束光的相位控制信号,通过(5)式即可对光纤激光阵列进行相位控制,直到实现锁相。

3 实验结果

利用目标在回路控制实现两路光纤放大器自适应锁相的系统结构如图2所示。种子源发出的光束通过分束器之后被分为两路,每路分别用含有200 mW和10 W的两级级联光纤放大器进行功率放大,放大器的后端接隔离器加以保护。其中每路都有两个相位调制器(PM),PM1,PM3起相位调制作用,而PM2,PM4起相位控制作用。所用种子源为单频光纤激光器,中心波长为1064 nm,线宽小于20 kHz。各路光束经过准直器后形成阵列光束,准直器输出的两路光束直径均为5 mm,排成“一”字形分布,光束中心距离约为7 mm。阵列光束经过高反射镜后被分成两部分,一部分光束聚焦到扩展漫反射体上,漫反射体散射的一部分光经会聚透镜聚焦,光

电探测器放置于望远镜的后焦平面上,探测到的信号经算法控制器后,产生控制信号施加给 PM2, PM4 用于相位控制,完成整个系统的闭环。利用 Altera 公司的 Cyclone III 执行单抖动算法,主频为

50 MHz。算法控制器同时产生相位调制信号用于控制 PM1, PM3;另一部分光传输到 CCD,用于观察目标在回路自适应锁相控制的效果。

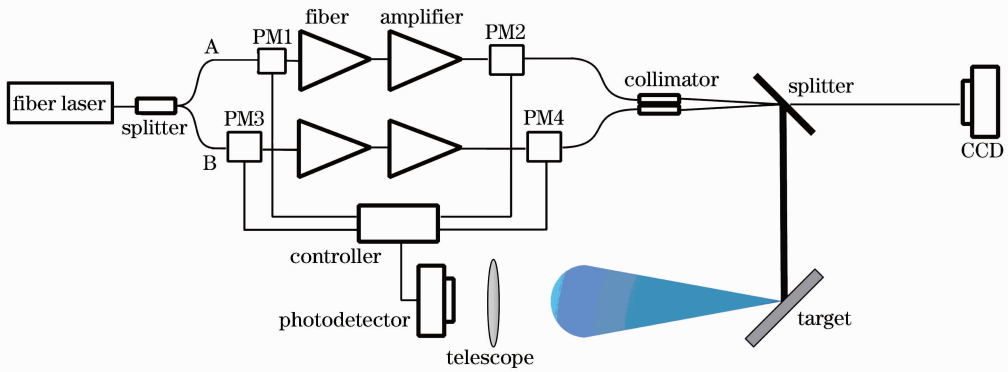


图 2 两路光纤放大器目标在回路自适应锁相系统结构

Fig. 2 Configuration of two fiber amplifiers target-in-the-loop adaptive phase-locking system

当同时开启所有放大器、各路光纤放大器输出功率均为 2 W 时, CCD 观测到的光斑处于不断变化中。图 3(a) 为 CCD 长曝光的图样。光斑变化是由于外界气流扰动、光纤放大器输出光束的相位不一致并随时间变化引起的。对其中一路光进行控制以实现系统闭环。当执行单抖动算法,系统处于闭环

状态时, CCD 观测到的光斑基本稳定,图 3(b) 为 CCD 长曝光的图样,可见系统有效实现了相位锁定。定义光斑对比度 $V = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, 其中 I_{\max} 为光强极大值, I_{\min} 为 I_{\max} 的临近极小值, 则开环、闭环光斑的对比度分别为 12.7% 和 74%。

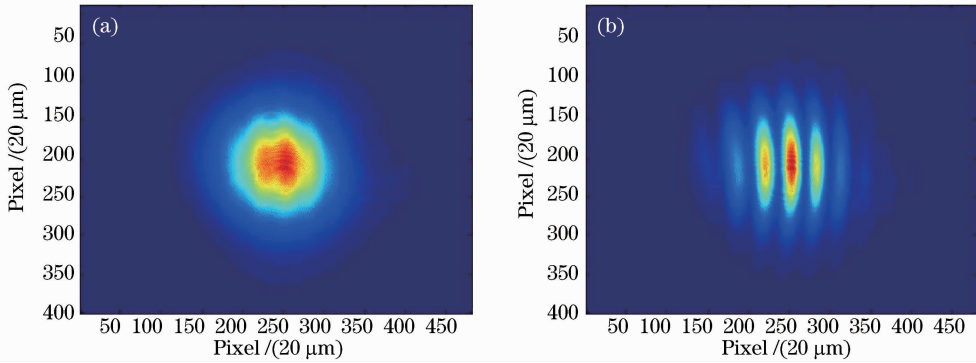


图 3 4 W 实验结果图。(a) 开环时的长曝光光斑图样; (b) 闭环时的长曝光光斑图样

Fig. 3 4 W experimental results. (a) Open loop long-exposure pattern; (b) close loop long-exposure pattern

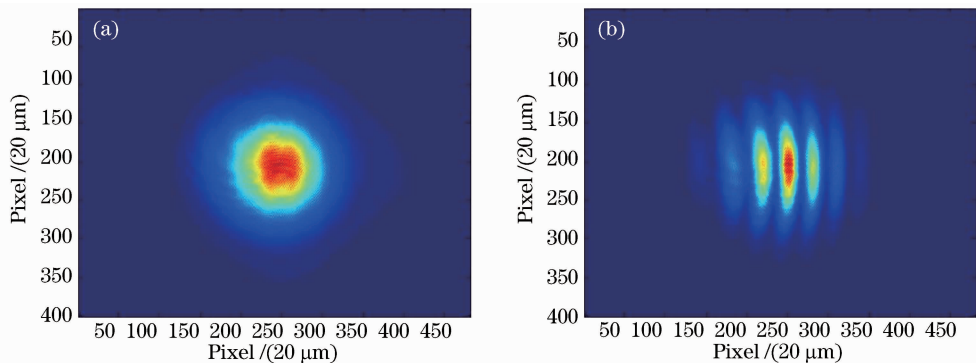


图 4 20 W 实验结果图。(a) 开环时的长曝光光斑图样, (b) 闭环时的长曝光光斑图样

Fig. 4 20 W experimental results. (a) open loop long-exposure pattern, (b) close loop long-exposure pattern

提高各路光纤放大器的输出功率到10 W,总功率达到20 W时,实验结果如图4所示。开环时,光斑对比度为12%;闭环控制时,光斑稳定,光斑对比度为73%。可见目标在回路自适应锁相控制具有对更高功率激光输出进行闭环控制的潜力。

4 结 论

实现了20 W级光纤放大器的目标在回路自适应锁相控制。实验研究表明,目标在回路闭环控制结构能够有效实现阵列光束的自适应相位锁定,对于总输出功率高达20 W的激光系统,经系统闭环后,扩展目标上光斑对比度从12%提高到73%,具有控制高功率激光阵列实现闭环的潜力,对于高能激光系统的进一步发展具有一定的参考意义。更多路数、更高功率的目标在回路自适应锁相光学系统的实验研究正在进行中,包括对于非扩展目标的研究。

参 考 文 献

- 1 J. R. Leger, J. Nilsson, J. P. Huignard *et al.*. Laser beam combining and fiber laser systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2):237~240
- 2 Zhou Pu, Liu Zejin, Xu Xiaojun *et al.*. Propagation performance of adaptive phase-locked fiber laser array in turbulent atmosphere [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6):1442~1447
周朴,刘泽金,许晓军等. 自适应锁相光纤激光阵列的湍流大气传输性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6):1442~1447
- 3 Zhou Pu, Liu Zejin, Wang Xiaolin *et al.*. Theoretical and experimental investigation on coherent beam combining of fiber lasers using SPGD algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8):2232~2237
周朴,刘泽金,王小林等. 随机并行梯度下降算法用于光纤激光相干合成的理论与实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8):2232~2237
- 4 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Ma Yanxing *et al.*. Phase control of coherent fiber laser array using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10):2874~2878
王小林,周朴,马阎星等. SPGD算法在光纤激光相干阵列光束控制中的应用[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10):2874~2878
- 5 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3):567~577
- 6 T. M. Shay, J. T. Baker, A. D. Sanchez *et al.*. High-power phase locking of a fiber amplifier array[C]. *SPIE*, 2009, **7195**:71951M
- 7 B. He, Q. H. Lou, J. Zhou *et al.*. High power coherent beam combination from two fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7):2721~2726
- 8 Chen Zilun, Hou Jing, Zhou Pu *et al.*. Mutual injection locking of two individual fiber lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12):7046~7050
陈子伦,侯静,周朴等. 两个光纤激光器的互注入锁定[J]. *物理学报*, 2007, **56**(12):7046~7050
- 9 Wang Jianming, Duan Kailiang, Wang Yishan. Experimental study of coherent beam combining of two fiber lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(9):5627~5631

- 王建明,段开棕,王屹山. 两光纤激光器相干合成的实验研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(9):5627~5631
- 10 Q. Peng, Y. Zhou, Y. Chen *et al.*. Phase locking of fibre lasers by self-imaging resonator [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(4):171~173
- 11 Cheng Yong, Liu Yang, Xu Lixin *et al.*. Mutual-injection phase-locking fiber laser with corner-cube cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1):77~81
程勇,刘洋,许立新等. 角锥腔互注入锁相光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1):77~81
- 12 X. J. Jia, F. N. Liu, S. G. Fu *et al.*. Realization of an efficient coherent combination via Michelson cavity [J]. *Chin. Phys.*, 2007, **16**(10):2993~2997
- 13 P. Zhou, Z. J. Liu, X. L. Wang *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm and its application [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2):248~256
- 14 L. Liu, M. A. Vorontsov, E. Polnau *et al.*. Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners [C]. *SPIE*, 2007, **6708**:67080K
- 15 J. E. Kinsky, C. X. Yu, D. V. Murphy *et al.*. Beam control of a 2D polarization maintaining fiber optic phased array with high-fiber count [C]. *SPIE*, 2006, **6306**:63060G
- 16 X. X. Chu, Z. J. Liu, Y. Wu. Propagation of a general multi-Gaussian beam in turbulent atmosphere in a slant path [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(1):74~79
- 17 Y. Cai, Y. Chen, H. T. Eyyuboglu *et al.*. Propagation of laser array beams in a turbulent atmosphere [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **88**(3):467~475
- 18 Zhou Pu, Xu Xiaojun, Liu Zejin *et al.*. Propagation of coherently combined beam in turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11):2051~2056
周朴,许晓军,刘泽金等. 相干合成光束在湍流大气中的传输[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11):2051~2056
- 19 Pu Zhou, Zilun Chen, Xiaolin Wang *et al.*. Tolerance on tilt error for coherent combining of fiber lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1):39~42
- 20 P. Piatrou, M. Roggemann. Beaconless stochastic parallel gradient descent laser beam control; numerical experiments [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(27):6831~6842
- 21 M. A. Vorontsov, V. Kolosov. Target-in-the-loop beam control; basic considerations for analysis and wave-front sensing [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(1):126~141
- 22 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, M. Chen *et al.*. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization; analysis and experimental demonstration [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(8):1440~1453
- 23 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov, T. G. Bifano *et al.*. Microscale adaptive optics; wave-front control with a μ -mirror array and a VLSI stochastic gradient descent controller [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24):4243~4253
- 24 T. Weyrauch, M. A. Vorontsov. Atmospheric compensation with a speckle beacon in strong scintillation conditions: directed energy and laser communication applications [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(30):6388~6401
- 25 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart. Adaptive phase distortion correction in strong speckle-modulation conditions [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(24):2155~2157
- 26 T. R. O'Meara. The multidither principle in adaptive optics [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(3):306~315
- 27 Y. Ma, P. Zhou, X. Wang *et al.*. Coherent beam combination of MOPA with single frequency dithering technique [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(9):1308~1310