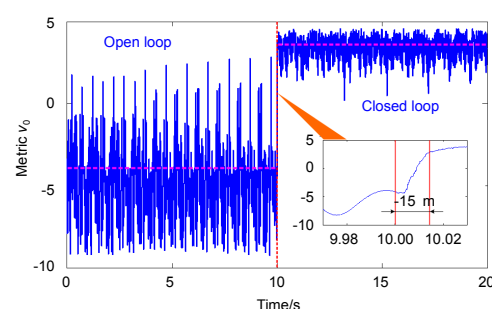




基于光纤耦合器的全光纤链路锁相控制

李枫^{1,2,3,4}, 耿超^{1,3}, 李新阳^{1,3*}, 邱琪²

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209; ²电子科技大学光电信息学院, 成都 610054; ³中国科学院光电技术研究所, 成都 610209; ⁴中国科学院大学, 北京 100049



摘要: 提出了一种基于光纤耦合器的全光纤链路锁相方法。通过光纤交叉互联使得出射光束与本振激光之间以及光纤端面后回光相互间在光纤耦合器内进行干涉以获得性能指标, 利用随机并行梯度下降算法(SPGD)对性能指标进行盲优化控制, 实现多路出射光束在光纤端面处的相位锁定。首先建立了这种锁相方法的模型, 讨论其锁相控制的稳态条件。搭建了两路全光纤链路锁相实验, 并对两路出射光纤激光进行准直发射, 通过相机获得的远场干涉条纹图像来判定锁相精度。实验结果表明, 在引入正弦相位扰动幅值 4 个波长和频率 2 Hz 的情况下, 该锁相方法能够将 10 s 长曝光图像条纹对比度从开环时的 0.25 提升至闭环时的 0.82, 单帧短曝光图像条纹对比度从开环时的 0.65 提升至闭环时的 0.98。

关键词: 相干合成; 全光纤链路; 相位锁定; 光纤耦合器

中图分类号: TN253

文献标志码: A

Phase-locking control in all fiber link based on fiber coupler

Feng Li^{1,2,3,4}, Chao Geng^{1,3}, Xinyang Li^{1,3*} and Qi Qiu²

¹The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; ²School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; ³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; ⁴University of Chinese of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: A new technique of phase-locking control in all fiber link based on fiber coupler has been proposed. Laser beams backscattered by the fiber tips of the different outgoing fiber laser beams interfere with each other in the fiber couplers. Meanwhile, the outgoing laser beams interfere with the partial local laser beams in the fiber couplers. These interference results provide metrics for phase-locking control algorithm named stochastic parallel gradient descent (SPGD). Laser beams are then phase-locked on their outgoing fiber tips under such system. Model of such novel phase-locking system for multi-laser-beams is built and steady-state control conditions are discussed. All fiber phase-locking is achieved for two laser beams in our experiment. The two laser beams are collimated and adjusted to overlap and interfere with each other in far field. Interference patterns in far field are collected by high speed camera to judge the control performance. Experimental results show that such technique promotes the fringe visibility of the long-exposure pattern during 10 s from 0.25 in open loop to 0.82 in closed loop, under phase disturb with an amplitude of 4 wavelengths and a frequency of 2 Hz. Fringe visibility of the short exposure pattern rises from 0.65 to 0.98 correspondingly.

收稿日期: 2017-01-17; 收到修改稿日期: 2017-02-28

*E-mail: xyli@ioe.ac.cn

Keywords: coherent beam combining; all fiber link; phase locking; fiber coupler**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.06.005**Citation:** *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(6): 602–609

1 引言

光纤激光阵列的相位锁定是多光束光纤激光相干合成和光纤激光相控阵等领域的关键基础技术，并有望在激光雷达、目标扫描跟踪与主动照明^[1]、自由空间光通信^[2]、定向能^[3-4]等领域有着广泛的应用前景。目前光纤激光阵列的主动相位控制方法主要有外差法、频率抖动法、优化算法和其他相位控制方法。外差法将各路放大后的光束分出小部分光与种子激光移频得到的参考光束进行外差检测，以此获得各路光束的相位扰动，并对该扰动进行补偿，实现相位锁定。在 2010 年，英国的 QinetQ 公司采用外差法实现了 4 路光纤放大器的相干合成^[5]，输出功率 600 W。频率抖动法是采用不同频率的高频振荡信号对各路放大光束的相位进行调制，该调制信号作为各路相位扰动的载波，对获取的远场性能指标信号进行解调以获得各路光束的相位扰动并加以补偿实现相位锁定。2011 年国防科学技术大学采用多抖动法实现了 9 路总功率 1.08 kW 的光纤放大器的相干合成^[6]；2014 年美国诺斯罗普·格鲁曼公司采用多抖动法实现了 3 路光纤放大器相干合成，总功率 2.4 kW^[7]。优化算法以随机并行梯度下降算法^[8](stochastic parallel gradient descent, SPGD) 为主要代表，该方法将各路光束的相位进行盲优化的迭代控制，在使得远场相干合成性能指标达到最优时实现相位锁定。2010 年，国防科学技术大学采用 SPGD 算法实现了 9 路光纤激光相干合成，总功率 1.14 kW^[9]，而后将功率提升至 1.8 kW^[10]；2011 年，美国的麻省理工学院实现了 8 路总功率 4 kW 的相干合成^[3]。

总结以上三种光纤激光阵列相位锁定方法：外差法需要对种子分出的参考光束进行扩束，以与各合成前的光束进行空间外差检测，系统复杂，探测器要求多，在 2012 年后国际上很少有关于该方法的进展报道；频率抖动法和优化算法都依赖于相干合成性能指标的获取，在室内一般是通过长焦的远场变换透镜来模拟相干合成的远场，但在实际大气远距离传输应用中很难满足性能指标获取的条件。而且性能指标中包含了从光源至目标的全链路相位扰动，因此这些方法都不能用作光束扫描控制。

为此，Bowman^[11]和 Roberts^[12]等人提出了一种全

光纤链路锁相控制方法，利用出射光纤激光在介质和空气界面处的后向反射回光^[11-12]与高频相位调制的种子激光进行外差检测，实现位扰动的探测及补偿。该方法无需获取额外的性能指标，具有结构紧凑、适应性强等优点。为实现多路光纤激光相位的测量，现有方法需要进行不同高频率(几十兆赫兹)的正弦或伪随机相位编码的调制以区分各路光纤激光的相位扰动，相位调制的信号控制复杂，相位测量的计算量很大，同时需要配套高速信号采集与实时硬件处理系统。与此同时，高频率的相位调制器件，如声光调制器或电光调制器等插损较大、价格昂贵。

本文在现有的研究基础上，提出了一种新的全光纤链路相位锁定方法，通过光纤交叉互联使得出射光束与本振光纤激光之间以及出射光束在各自光纤端面处的回光之间在光纤耦合器内进行干涉以获得相位差信息，利用 SPGD 算法对性能指标进行盲优化控制。基于光纤耦合器，将光纤链路相位锁定等效成不同节点上探测光强的最优化，最终实现多路出射光束在光纤端面处的相位锁定。其优点是无需复杂的相位扰动的测量，直接采用盲优化的控制方法直接对相位扰动进行控制。实验结果表明了本文提出的锁相方法的有效性，并有望在光纤激光相控阵和光纤激光阵列相干合成得到广泛应用。

2 系统方案

2.1 系统原理

基于光纤耦合器的全光纤链路锁相方案如图 1 所示，这里以四路光纤激光束锁相输出为例进行分析，更多路数可通过简单的路数扩展即可实现。这里将光纤耦合按照级联先后顺序分为 J_0 至 J_3 四级，光纤耦合器命名为 C_{mn} (m 为级数， n 从 1 开始，并从上至下递增)。各光纤耦合器节点之间光纤路径上光程对应的相位命名为 φ_{ij} (i 为路径后端所连接的光纤耦合级数， j 从 1 开始按照从上至下递增)，如图 1 中所示。 J_0 级光纤耦合器 C_0 的两路输出中 Out1 及以后的分支可做高功率的光纤放大，称之为放大分支；Out2 及以后的分支起到相位锁定参考光束的作用，称之为参考分支。放大分支的中间级(J_1 和 J_2)起到光束均分的作用，而参考分支的中间级同时起到光束均分及使后向光束干涉

的作用。最后一级 J_3 中的四路光纤耦合器 C_{3n} (n 取 1~4) 为非对称光纤耦合器, 它将经过光强放大的各路光纤激光中的绝大部分光强通过端口 Out1 传输到发射光纤端中去, 同时起到将剩余的极小部分光束通过端口 Out2 与参考光束进行干涉的作用, 干涉光强被光电探测器 PD_{3n} 探测。同时在中间级 (J_1 和 J_2) 中参考分支对应光纤耦合器的剩余输入端口连接光电探测器 (图中 PD_{11} 、 PD_{12} 和 PD_0)。

PD_{31} 探测的光强信号是从激光源途经 C_0 - C_{11} - C_{21} - C_{31} 的光束与途经 C_0 - C_{12} - C_{23} - C_{31} 的两路光束干涉叠加的结果。前者的复振幅表达式为

$$I_{311} = \kappa(1 - \gamma^2)^{1/2} \eta^2 \chi \cdot I_0 \exp[j(\phi_0 + \phi_{11} + \frac{\pi}{2} + \phi_{21} + \frac{\pi}{2} + \phi_{31} + \frac{\pi}{2})], \quad (1)$$

其中: κ 为光纤放大器的放大倍数, γ 为光纤耦合器 C_0 的耦合系数, χ 为 C_{31} 的耦合系数, η 为 C_{11} 和 C_{21} 的耦合系数, I_0 为激光光源的振幅。途经 C_0 - C_{12} - C_{23} - C_{31} 激光束的复振幅表达式为

$$I_{312} = \gamma(1 - \eta^2)^{1/2} \eta(1 - \chi^2)^{1/2} \cdot I_0 \exp[j(\phi_0 + \frac{\pi}{2} + \phi_{12} + \phi_{23} + \frac{\pi}{2} + \phi_{35})]. \quad (2)$$

这里的耦合系数为光纤耦合器从输入端口 In1 (或 In2) 的振幅耦合到 Out2 (或 Out1) 的比例系数。光纤耦

合器可同时作反向传输耦合, 从端口 Out1 (或 Out2) 输入的光束也会按相应的比例系数耦合至 In2 (或 In1)。实际中可以根据 κ 参数选取合适的 γ 、 χ 和 η 等参数使得 I_{311} 和 I_{312} 基本相同。实际上, 中间级 J_1 和 J_2 均可采用 3 dB 光纤耦合器, 此时 $\eta = 1/\sqrt{2}$ 。采用一定的控制策略, 通过相位调制器改变 ϕ_{31} 和 ϕ_{35} 使得 PD_{31} 探测到的光强最弱, 此时满足的锁相条件如式(3):

$$\begin{aligned} \phi_0 + \phi_{11} + \frac{\pi}{2} + \phi_{21} + \frac{\pi}{2} + \phi_{31} + \frac{\pi}{2} = \\ \phi_0 + \frac{\pi}{2} + \phi_{12} + \phi_{23} + \frac{\pi}{2} + \phi_{35} + (2k+1)\pi, \quad (3) \end{aligned}$$

其中 k 为整数。对 PD_{32} 至 PD_{34} 所探测到的干涉光强信号的来源作同样的分析分别可以得到如式(4)、式(5)和式(6)所示的锁相条件:

$$\begin{aligned} \phi_0 + \phi_{11} + \frac{\pi}{2} + \phi_{21} + \phi_{32} + \frac{\pi}{2} = \\ \phi_0 + \frac{\pi}{2} + \phi_{12} + \phi_{23} + \phi_{36} + (2k+1)\pi, \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_0 + \phi_{11} + \phi_{22} + \phi_{33} + \frac{\pi}{2} = \\ \phi_0 + \frac{\pi}{2} + \phi_{12} + \frac{\pi}{2} + \phi_{24} + \phi_{37} + (2k+1)\pi, \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_0 + \phi_{11} + \phi_{22} + \frac{\pi}{2} + \phi_{34} + \frac{\pi}{2} = \\ \phi_0 + \frac{\pi}{2} + \phi_{12} + \frac{\pi}{2} + \phi_{24} + \frac{\pi}{2} + \phi_{38} + (2k+1)\pi. \quad (6) \end{aligned}$$

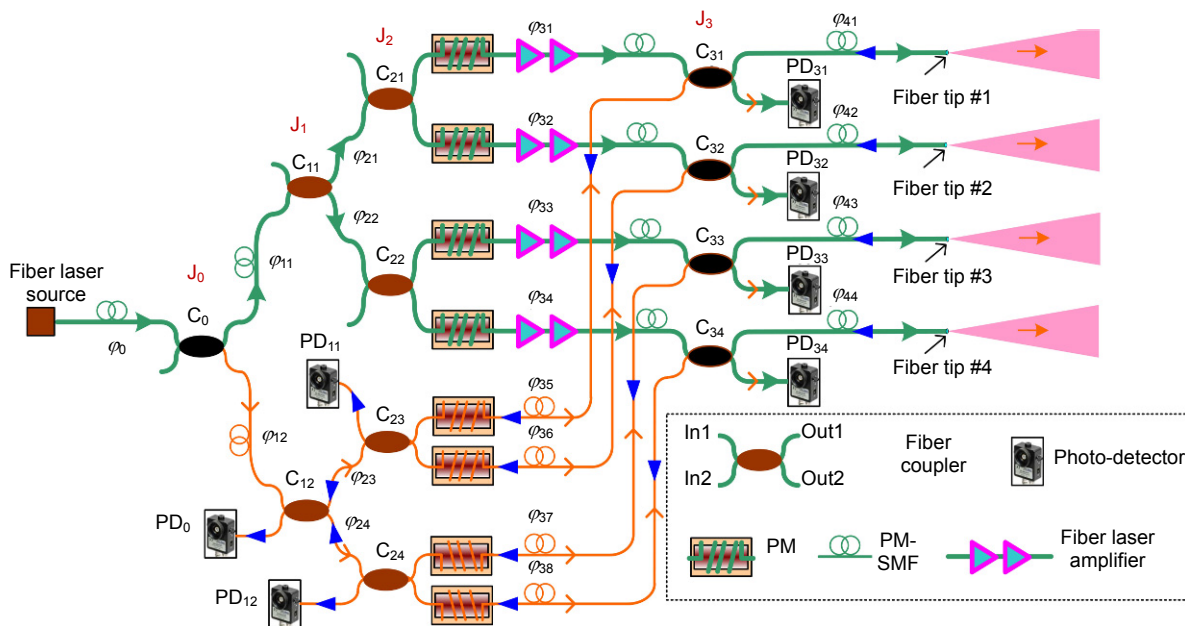


图 1 光纤链路锁相方案. PM: 光纤相位调制器; PM-SMF: 保偏单模光纤.

Fig. 1 Scheme of all-fiber-link phase-locking for 4 outgoing fiber laser beams. PM: Fiber phase modulator. PM-SMF: polarization-maintaining single-mode fiber.

PD₁₁ 探测的光强信号主要是从激光源途经 C₀-C₁₁-C₂₁-C₃₁-光纤端面#1 反射-C₃₁-C₂₃ 的光束与途经 C₀-C₁₁-C₂₁-C₃₂-光纤端面#2 反射-C₃₂-C₂₃ 的光束干涉叠加的结果, 前者的复振幅为

$$I_{111} = (1-\gamma^2)^{1/2} \eta^2 \kappa (1-\chi^2)^{1/2} \varepsilon \chi (1-\eta^2)^{1/2} \cdot \exp[j(\phi_0 + \phi_{11} + \frac{\pi}{2} + \phi_{21} + \frac{\pi}{2} + \phi_{31} + 2\phi_{41} + \frac{\pi}{2} + \phi_{35})], \quad (7)$$

后者的复振幅为

$$I_{112} = (1-\gamma^2)^{1/2} \eta^2 \kappa (1-\chi^2)^{1/2} \varepsilon \chi (1-\eta^2)^{1/2} \cdot \exp[j(\phi_0 + \phi_{11} + \frac{\pi}{2} + \phi_{21} + \phi_{32} + 2\phi_{42} + \frac{\pi}{2} + \phi_{36} + \frac{\pi}{2})], \quad (8)$$

其中 ε 为光纤激光在光纤波导-空气界面处的反射系数, 一般为 5% 左右(仅考虑平光纤端面输出)。两者的复振幅强度一致, 这里不考虑参考分支对光纤端面回光的贡献, 实际上经过数十倍甚至上百倍的多级放大后, 参考分支所占比重可忽略不计。此时采取一定控制方法, 通过相位调制器改变 ϕ_{32} 和 ϕ_{36} 使得 PD₃₁ 探测到的光强最弱, 此时满足的锁相条件为式(9)所示

$$\phi_0 + \phi_{11} + \frac{\pi}{2} + \phi_{21} + \frac{\pi}{2} + \phi_{31} + 2\phi_{41} + \frac{\pi}{2} + \phi_{35} = \phi_0 + \phi_{11} + \frac{\pi}{2} + \phi_{21} + \phi_{32} + 2\phi_{42} + \frac{\pi}{2} + \phi_{36} + \frac{\pi}{2} + (2k+1)\pi, \quad (9)$$

其中 k 为整数。对 PD₁₂ 探测到的光强信号的来源做同样的分析处理可以得到式(10)的锁相条件:

$$\phi_0 + \phi_{11} + \phi_{22} + \phi_{33} + 2\phi_{43} + \frac{\pi}{2} + \phi_{37} + \frac{\pi}{2} = \phi_0 + \phi_{11} + \phi_{22} + \frac{\pi}{2} + \phi_{34} + 2\phi_{44} + \frac{\pi}{2} + \phi_{38} + (2k+1)\pi. \quad (10)$$

同时令从激光源到光纤端面#1 所经过的光程上的光相位为

$$P_1 = \phi_{11} + \frac{\pi}{2} + \phi_{21} + \frac{\pi}{2} + \phi_{31} + \phi_{41}, \quad (11)$$

令从激光源到光纤端面#2 对应的光相位为

$$P_2 = \phi_{11} + \frac{\pi}{2} + \phi_{21} + \phi_{32} + \phi_{42}, \quad (12)$$

令从激光源到光纤端面#3 对应的光相位为

$$P_3 = \phi_{11} + \phi_{22} + \phi_{33} + \phi_{43}, \quad (13)$$

令从激光源到光纤端面#4 对应的光相位为

$$P_4 = \phi_{11} + \phi_{22} + \frac{\pi}{2} + \phi_{34} + \phi_{44}. \quad (14)$$

经过一定运算, 可以从式(3)、式(4)和式(9)中得到关系式:

$$P_1 = P_2 + k\pi. \quad (15)$$

可从式(5)、式(6)和式(10)中得到关系式:

$$P_3 = P_4 + k\pi. \quad (16)$$

在完成以上的锁相条件后, 四路光纤端面的回光将从 C₂₃ 的 In2 和 C₂₄ 的 In1 端口后向传输至耦合器 C₁₂, 并可在 PD₀ 处探测到回光, 其探测光强是从激光源途经 C₀-C₁₁-C₂₁-C₃₁-光纤端面#1 反射-C₃₁-C₂₃-C₁₂ 的光束(或者途经 C₀-C₁₁-C₂₁-C₃₂-光纤端面#2 反射-C₃₂-C₂₃-C₁₂ 的光束, 式(15)成立后两者同幅同相), 以及从激光源途经 C₀-C₁₁-C₂₂-C₃₃-光纤端面#3 反射-C₃₃-C₂₄-C₁₂ 的光束(或途经 C₀-C₁₁-C₂₂-C₃₄-光纤端面#4 反射-C₃₄-C₂₄-C₁₂, 式(16)成立后两者同幅同相)。前者的复振幅可表示为

$$I_{01} = 2(1-\gamma^2)^{1/2} \eta^4 \kappa (1-\chi^2)^{1/2} \varepsilon \chi \cdot \exp[j(P_2 + 2\phi_{42} + \frac{\pi}{2} + \phi_{36} + \phi_{23} + \frac{\pi}{2})], \quad (17)$$

后者的复振幅可表示为

$$I_{02} = 2(1-\gamma^2)^{1/2} \kappa (1-\chi^2)^{1/2} \varepsilon \chi (1-\eta^2)^2 \cdot \exp[j(P_2 + 2\phi_{42} + \frac{\pi}{2} + \phi_{36} + \phi_{23} + \frac{\pi}{2})]. \quad (18)$$

实际上 $\eta=1/\sqrt{2}$ 时, 两者的幅度一致。在 J₂ 级和 J₃ 级之间的相位调制器满足锁相条件式(15)和式(16)以后, 可进一步使复振幅 I_{01} 和 I_{02} 满足锁相条件如式(19)所示, 此时 PD₀ 处探测到回光最强。

$$P_2 + 2\phi_{42} + \frac{\pi}{2} + \phi_{36} + \phi_{23} + \frac{\pi}{2} = P_3 + 2\phi_{43} + \frac{\pi}{2} + \phi_{37} + \phi_{24} + 2k\pi. \quad (19)$$

可以从式(4)、式(5)和式(19)中得到关系式:

$$P_2 = P_3 + k\pi - \frac{\pi}{2}. \quad (20)$$

式(15)、式(16)和式(20)决定了最终光纤端面#1 至 #4 处的锁相稳态。考虑到相位的周期性, 以 P_1 为参考, P_2 、 P_3 和 P_4 的稳态各自只有两种, 且两种稳态相位之间相差 π , 在实际稳定的锁相控制只会使各自锁定在一个稳态, 不存在串扰的问题。至于如何通过空间光路的补偿或者采用一定的光纤相位调制方法, 使得到达目标点处各路光纤激光相位一致, 是另外的研究课题, 这里不予展开。

总结以上分析过程, 只要在 J₂ 和 J₃ 级之间的各路光纤路径上进行相位补偿, 使其满足 PD₀ 探测光强的最大化, 除此之外所有相应探测点上探测光强最小化, 就等效于实现式(15)、式(16)和式(20)所示相位锁定条件。这里也可从解算方程的角度来看锁相控制问题, 实际中的相位调制器数为 8 个, 它们需要满足的方程

数仅有7个(式(3)至式(6)及式(9)、式(10)和式(19)),因此锁相是有解的而且是多个解。

这里分析了四路光纤链路锁相方案,实际中更多路数可通过此方案倍增路数即可。当放大及锁相输出光纤激光路数为 $N=2^m$ (m 为整数), 其所需的相位调制器数为 $2N$, 最后一级非对称光纤耦合器的路数为 N , 所需光电探测器数为 $2N-1$, 3 dB 耦合器数为 $2N-1$ 。

2.2 实验装置

本文设计了双路全光纤链路锁相实验,以验证本文提出的全光纤链路锁相方法的有效性,试验系统如图2所示。所有光纤为保偏单模光纤,光纤链路连接方式与2.1节所述相同,所不同的是最终锁相输出的光纤激光路数为两路。保偏光纤激光器(NKT公司, Koheras Adjustik)作为激光光源,其功率为11 mW,线宽20 kHz,中心波长为1064 nm。这里采用中国科学院自适应光学重点实验室研发的自适应光纤准直器AFOC作为光纤准直发射的器件^[13-14],准直透镜焦距为150 mm,通光孔径为28 mm,AFOC1和AFOC2孔镜中心间距32 mm。实验所用光纤相位调制器的一阶谐振频率在20 kHz左右,平均半波电压为1.25 V。光电探测器(型号PDA36A,美国THORLABS公司)响应波长范围为350 nm~1100 nm,最高带宽为12.5 MHz。性能指标采集和电压输出分别采用NI6254及NI6423(美国国家仪器公司),通道数均为32,位数均为16位,NI6254最高采样率为1.25 Mb/s,NI6423最高输出频率为1 Mb/s。

控制器根据PD₁、PD₂和PD₃采集得到的数据,采用SPGD算法,对施加到相位调制器T₁至T₄上的

驱动电压作迭代寻优,以实现AFOC1和AFOC2上两光纤端面处的激光相位的锁定,同时相机采集远场干涉图样以判定锁相结果的好坏。

为简单起见,本实验方案并未引入光纤激光放大器,而是在相位调制器T₁和T₂后用额外的相位调制器引入相位扰动来模拟光纤放大器的相位扰动。如此一来,最后一级光纤耦合器的输入端激光束的幅值基本相同,因此采用3 dB耦合作为最后一级,而不是非对称光纤耦合器。非对称光纤耦合器在光纤芯径10.5 μm情况下可以做到百瓦级以上的功率,增大纤芯直径可以做到更高功率^[15]。

2.3 控制算法

本文采用双边扰动的SPGD^[13-14]控制策略对PD₁、PD₂和PD₃探测到的光强进行优化,SPGD算法的优点就是无需考虑具体的收敛过程。设三个光电探测器得到的光功率电压分别为 v_1 、 v_2 和 v_3 。如2.1小节所示,要实现AFOC1和AFOC2光纤端面处两光束的相位锁定,有三个闭环过程:首先是控制图2中 φ_2 和 φ_7 使得 v_1 最小化;然后控制图2中 φ_4 和 φ_6 使得 v_2 最小化;在前两者的基础上控制图2中 φ_6 和 φ_7 使得 v_3 最大化。为了简化控制过程,将SPGD控制算法的性能指标简化为一个综合性能指标 $v_0=v_3-v_1-v_2$ 。 v_0 的最大化等效 v_3 最大化和 v_1 及 v_2 的最小化。这里对 φ_2 、 φ_4 、 φ_6 和 φ_7 的控制,是通过改变分别施加在光纤相位调制器T₁、T₂、T₃和T₄上的电压 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_4 实现的。

其具体控制过程如下所示:

- 1) 生成一组零均值的伯努利分布扰动电压 ΔV_j (j 取1,2,3,4);

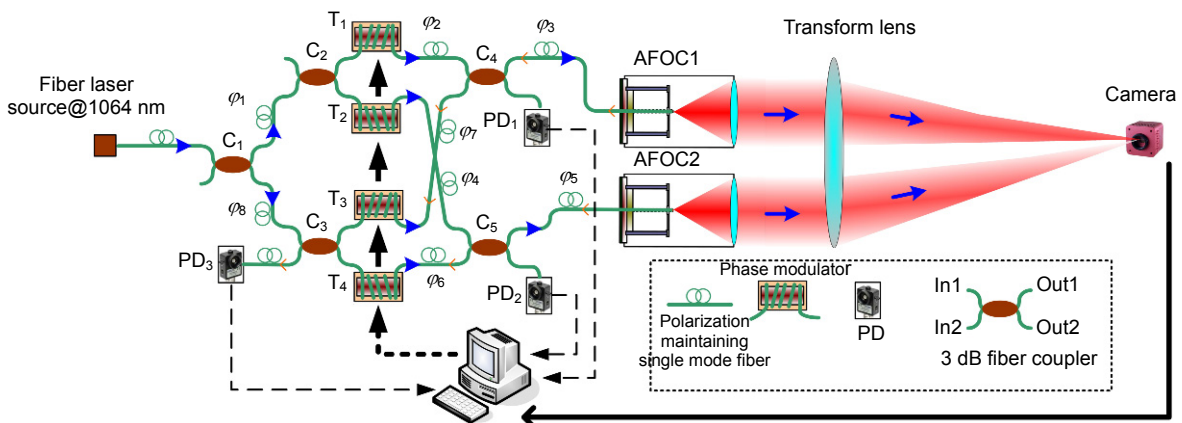


图2 双路全光纤链路锁相的实验装置图。

Fig. 2 Experimental scheme of all-fiber-link phase-locking for 2 outgoing fiber laser beams.

2) 将电压 $V_j^k + \Delta V_j$ (j 取 1,2,3,4) 施加到光纤相位调制器 T_1 至 T_4 上, 并采集 PD_1 至 PD_3 上探测到的光强电压值 v_1 、 v_2 和 v_3 , 计算得到综合性能指标 v_{0k}^+ ;

3) 将电压 $V_j^k - \Delta V_j$ (j 取 1,2,3,4) 施加到光纤相位调制器 T_1 至 T_4 上, 并采集 PD_1 至 PD_3 上探测到的光强电压值 v_1 、 v_2 和 v_3 , 计算得到综合性能指标 v_{0k}^- ;

4) 按式(21)更新施加到 T_1 至 T_4 上的驱动电压值, 并转到步骤 1) 继续执行, 直到迭代次数达到预定值或综合性能指标 v_0 达到最优。

$$V_j^{k+1} = V_j^k + \xi \Delta V_j (J_{0k}^+ - J_{0k}^-), \quad (21)$$

其中: $j=1, 2, 3, 4$; ξ 为 SPGD 算法的增益因子, 控制收敛的速度和控制稳定性, 可通过从小到大的试探过程找到能稳定收敛的最大值。

3 实验结果及分析

为考察这种相位锁定方法对于动态相位扰动校正的效果, 在相位调制器 T_1 所在光纤段中加入额外的光纤相位调制器以引入幅度为 8π (4 个波长) 和频率为 2 Hz 的相位扰动, 并采用同样的办法在 T_2 处光纤段中引入幅度 5π 和频率为 1 Hz 的相位扰动。并利用前述的光纤端面相位锁定方法及 SPGD 控制算法对该动态扰动进行校正。双边扰动 SPGD 的迭代速率为 9 kHz, 扰动电压 0.02 V, 增益在 5 至 50 之间调整。

综合性能指标 $v_0 = v_3 - v_1 - v_2$ 在开闭环各 10 s 区间内的变化曲线如图 3 所示。开闭环各 10 s 期间内 v_1 、 v_2 和 v_3 的变化曲线分别如图 4(a)、4(b) 和 4(c) 所示。从其中可以看出, 在开环时受两正弦相位扰动的影响, 性能指标在最强和最弱之间往复震荡。SPGD 闭环后,

v_1 和 v_2 收敛到最小值, 而 v_3 收敛至最大值, 因此综合性能指标也收敛至最大值。从开环到闭环的 v_0 上升时间约为 15 ms, 收敛补偿步数约为 130 次。 v_0 在开环时均值为 -4.84, 闭环后均值为 3.39, 开环抖动 RMS 值为 2.27, 闭环抖动 RMS 值为 0.58, 约降低至开环时的四分之一。从图 4(a) 和图 4(b) 中可以看出 v_1 和 v_2 在闭环后并未收敛至零, 有以下原因: 实际的光纤 3 dB 耦合器耦合系数并不是严格的 50%, 而是存在一定的波动; 各器件之间的光纤跳线通过法兰盘连接, 因此存在不同的损耗; 自制的光纤相位调制器的插损也有不同程度的差异。这些因素最终造成在光纤 3 dB 耦合器 C_4 和 C_5 的两输入端的光强不会严格一致, 因此 v_1 和 v_2 在闭环后并未收敛至零, 但这并不会影响锁相控制的闭环。

实验开始时利用 AFOC1 和 AFOC2 调整两出射光斑在远场处完全重叠。开闭环各 10 s, 利用相机 (开窗 256×256 , 帧频 600 Hz) 采集远场图像进行累加计算得到的远场长曝光图如图 5(b) 和 5(e) 所示, 对应的短曝光图如图 5(c) 和 5(f) 所示。为方便对比, 对长曝光图进行累计帧数的平均。这里同时给出 AFOC1 出射光束的单路开环远场短曝光图 (图 5(a)) 和闭环远场短曝光图 (图 5(d))。从图 5(a) 和图 5(d) 的对比中可以看出, 开闭环前后单孔径光束的远场分布没有形态上的变化, 只有光能量的变化。AFOC1 中出射光束与 v_1 的总能量之和一定, 在开环时由于受到相位扰动的影响, 两者之间的分配比例随相位扰动而变化, 在闭环后 v_1 被抑制, AFOC1 中出射光束也稳定在最强值, 该结果与图 4(a) 所示结果相对应。

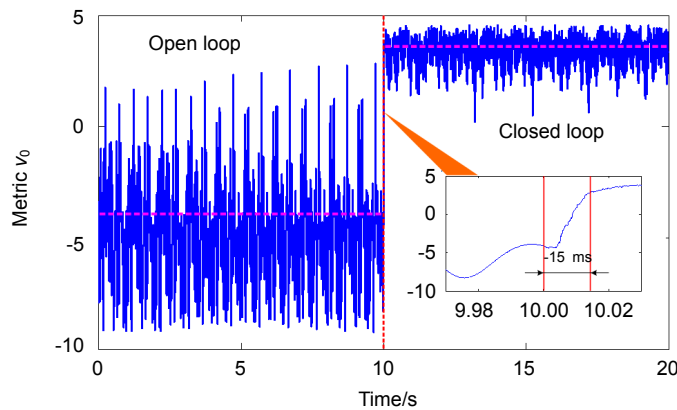


图 3 综合性能指标 v_0 在开闭环各 10 s 区间内的变化曲线。

Fig. 3 Ensemble metric v_0 as a function of time during 10 s under open loop and closed loop.

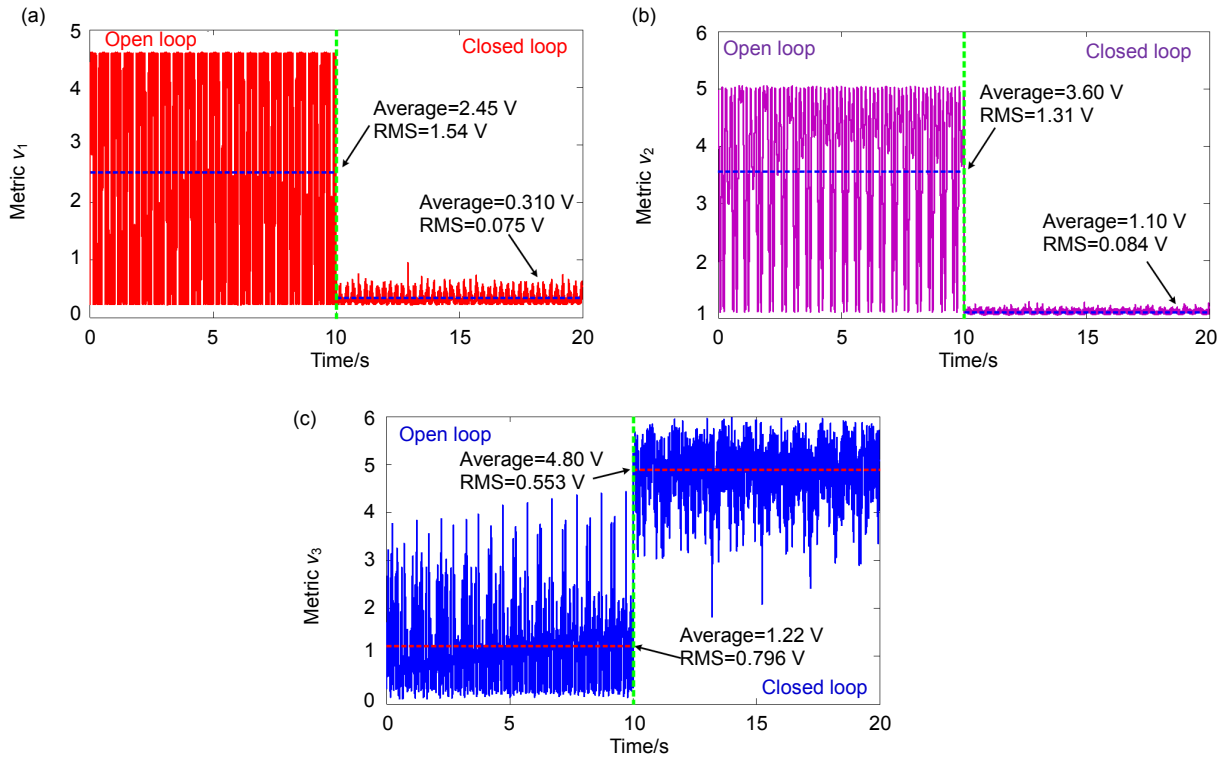


图4 开闭环各10s期间内 v_1 、 v_2 和 v_3 的变化曲线。(a) v_1 。(b) v_2 。(c) v_3 。

Fig. 4 v_1 , v_2 and v_3 as functions of time during 10 s under open loop and closed loop. (a) v_1 . (b) v_2 . (c) v_3 .

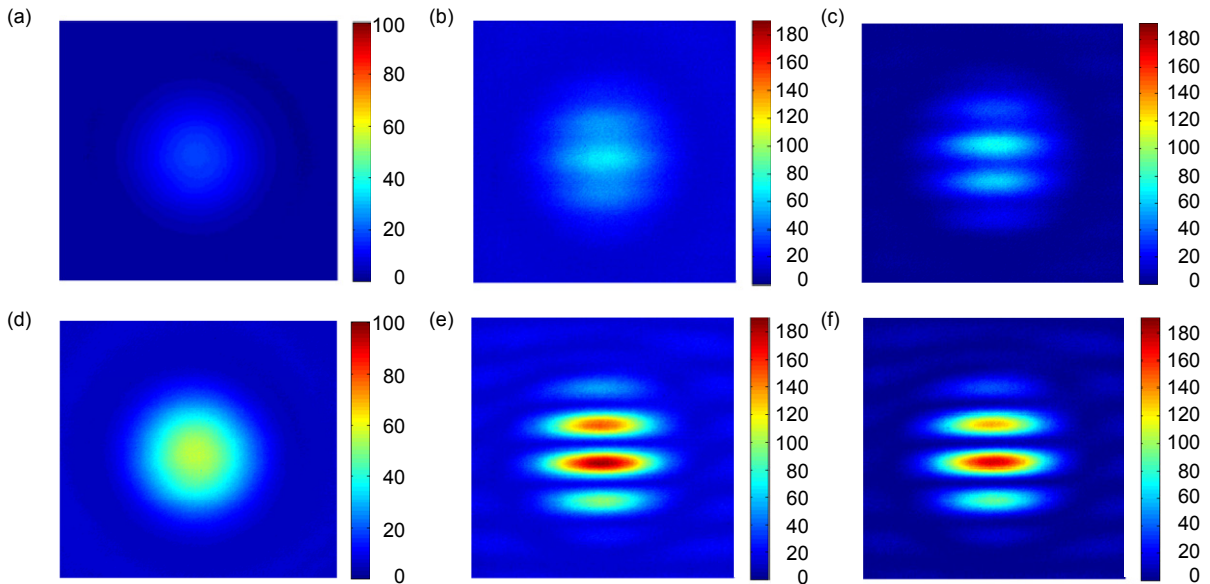


图5 远场光斑图像分布。(a) 开环AFOC1远场短曝光图。(b) 开环长曝光图。(c) 开环短曝光图。(d) 闭环AFOC1短曝光图。(e) 闭环长曝光图。(f) 闭环短曝光图。

Fig. 5 Far-field intensity distributions. (a) Long-exposure pattern under open loop for single aperture of AFOC1. (b) Long-exposure pattern under open loop. (c) Short-exposure pattern under open loop. (d) Short-exposure pattern under closed loop for single aperture of AFOC1. (e) Long-exposure pattern under closed loop. (f) Short-exposure pattern under closed loop.

同时可从图 5 中看出, 开环长曝光图像相较于闭环时条纹模糊、对比度很低且光强较弱, 短曝光图像也存在同样的现象。闭环后, 闭环长曝光图 5(e)对比度很高, 条纹清晰。闭环的短曝光图像 5(f)和长曝光的条纹分布基本相同, 这说明闭环后相位扰动被抑制。实验中两光束来自同一窄线宽光源, 线偏振方向一致, 出射光束方向平行且与光轴保持不变, 在闭环后, 两光束光强基本一致且相位差保持恒定, 这些条件构成了完全干涉的条件, 因此能够形成图 5(e)和 5(f)所示的稳定干涉条纹。

利用式(22)计算条纹对比度:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (22)$$

其中: I_{\max} 为条纹峰值处的图像灰度值, I_{\min} 为条纹谷值处对应的灰度值。计算得到开环长曝光的条纹对比度为 0.25, 闭环长曝光的条纹对比度为 0.82, 提升了 3.3 倍。开环短曝光的条纹对比度为 0.65, 闭环短曝光的条纹对比度为 0.98, 提升了 1.4 倍。

4 结 论

本研究首次提出了一种基于光纤耦合器的全光纤链路盲优化锁相方法, 建立其系统模型, 并进行了两单元锁相输出光束的实验验证。实验结果表明, 本文提出的控制系统能够很好地抑制动态相位扰动的影响。在引入动态扰动幅值 4 个波长、频率 2 Hz 情况下, 长曝光图像条纹对比度从开环时的 0.25 提升至闭环时的 0.82, 短曝光图像条纹对比度从开环时的 0.65 提升至闭环时的 0.98。实验结果验证了本文提出的全光纤链路锁相方法的有效性。

未来将扩展锁相输出的路数, 并结合光纤激光相干合成中的多光束主控震荡功率放大技术, 采用非对称的光纤耦合器的方法, 将该控制系统应用于更高功率的光纤激光相干合成应用领域中。

基金项目

中国科学院实验室创新基金(CXJJ-15S096); 国家自然科学基金资助项目(61675205)。

参考文献

- Mason J, Stupl J, Marshall W, et al. Orbital debris–debris collision avoidance[J]. *Advances in Space Research*, 2011, **48**(10): 1643–1655.
- Bruesselbach H, Wang Shuoqin, Minden M, et al. Power-scalable phase-compensating fiber-array transceiver for laser communications through the atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, **22**(2): 347–353.
- 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.
- Goodno G D, McNaught S J, Rothenberg J E, et al. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(10): 1542–1544.
- Jones D C, Turner A J, Scott A M, et al. A multi-channel phase locked fibre bundle laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7580**: 75801V-75801V-10.
- 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.
- Mcnaught S J, Thielen P A, Adams L N, et al. Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kW beam[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, **20**(5): 0901008.
- 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.
- 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 Letter*, 2011, **36**(16): 3121–2123
- Wang X, Leng J, Zhou P, et al. 1.8-kW simultaneous spectral and coherent combining of three-tone nine-channel all-fiber amplifier array[J]. *Applied Physics B*, 2012, **107**(3): 785–790
- Bowman D J, King M J, Sutton A J, et al. Internally sensed optical phased array[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(7): 1137–1139.
- Roberts L E, Ward R L, Sutton A J, et al. Coherent beam combining using a 2D internally sensed optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(22): 4881–4885.
- 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]. *Optics Express*, 2013, **21**(21): 25045–25055.
- Li Feng, Geng Chao, Li Xinyang, et al. Co-aperture transceiving of two combined beams based on adaptive fiber coupling control[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(17): 1787–1790.
- Roberts L E, Ward R L, Francis S P, et al. High power compatible internally sensed optical phased array[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(12): 13467–13479.