

文章编号: 0258-7025(2010)02-0367-03

随机并行梯度下降算法实现 16 路光纤 激光相位锁定

周 朴 王小林 马阎星 马浩统 许晓军 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 利用随机并行梯度下降(SPGD)算法实现 16 路光纤激光相位锁定。通过数字信号处理器(DSP)上执行随机并行梯度下降算法实现对各路激光相位的控制,系统闭环时的激光功率提高为开环时的近 12 倍。

关键词 光纤激光器;相干合成;随机并行梯度下降算法;激光相位锁定

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0367

Phase Locking of Sixteen Laser Beams Using Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Zhou Pu Wang Xiaolin Ma Yanxing Ma Haotong Xu Xiaojun Liu Zejin

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

Abstract Coherent beam combination of up to sixteen fiber laser beams using stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is demonstrated. The phase control is implemented by running SPGD algorithm on a digital signal processor (DSP). The combined laser power of the system in close-loop can be improved 12 times compared with the power in open-loop.

Key words fiber laser; coherent beam combining; stochastic parallel gradient descent algorithm; laser phase locking

1 引 言

光纤激光相干合成是激光技术领域的研究热点^[1,2]。迄今为止,最高相干合成功率及参与合成光束数目最多的实验均采用基于主振荡功率放大(MOPA)结构的主动相位控制方案^[3,4]。比较常用的主动相位控制方案有外差法^[3]、多抖动法^[4]和随机并行梯度下降(SPGD)算法^[5~9]。其中基于SPGD算法主动相位控制方案在扩展至更多路时不需要增加相应的功率探测和相位检测设备,简化了系统构成,已成为新型高能激光系统的重要支撑技术^[10]。理论分析表明,SPGD算法在对多路激光阵列进行相位控制时收敛速度变慢,控制带宽相应减少^[6,11],因此该算法能否适用于多单元激光相干合成成为亟待论证的问题。本文报道了 16 路光纤激

光相位锁定的实验结果,对 SPGD 算法相干合成拓展至大阵元情形时的可行性进行初步探讨。

2 实 验

实验系统结构如图 1 所示。主振荡激光器为 KEOSPSYS 公司的分布反馈式(DFB)单频光纤激光器,中心波长为 1083 nm,线宽小于 1 MHz,输出激光为线偏振光,最大输出功率为 200 mW。主振荡激光经保偏分束器后被分为 16 路,每路接相位调制器用于相位控制。其中 8 路熔接 LiNbO₃ 相位调制器,其半波电压约为 4 V,3 dB 带宽大于 500 MHz;另外 8 路为缠绕在压电陶瓷环上的全光纤相位调制器,其半波电压约为 10 V,相应带宽在 200 kHz 以内。各路光束在光纤中传输后利用保偏合束器并成

收稿日期:2009-08-09;收到修改稿日期:2009-10-16

作者简介:周 朴(1984—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器及光束合成等方面的研究。E-mail:jnck621@163.com

导师简介:刘泽金(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术等方面的研究。E-mail:zejinliu@vip.sina.com

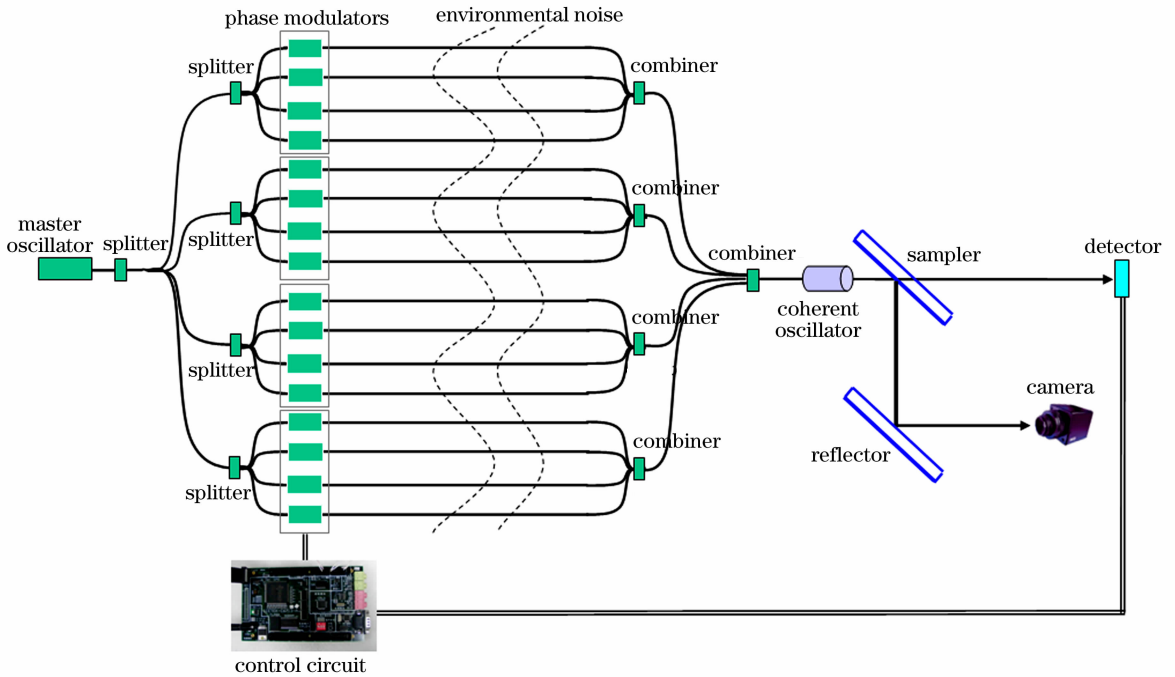


图1 随机并行梯度下降算法实现16路光纤激光相干合成系统示意图

Fig. 1 Experimental setup for coherent beam combining of sixteen fiber lasers using SPGD algorithm

1路激光,并经保偏准直器输出,其中每一路合束器的插入损耗约为2 dB。光电探测器(Throlabs PDA 36A-EC)用于探测合成后的激光功率,红外相机(Microviewer 7290A)用于观测光斑形态。探测器探测到的光强信号经过模数(AD)采样进入数字信号处理器(DSP),DSP以探测器探测到的激光功率为判据,以该功率最大化为目标函数执行SPGD算法^[5~9],经数模(DA)转换后对相位调制器施加相应的控制信号,实现相干合成。使用TI公司32位高速浮点DSP芯片TMS320C6713,主频为200 MHz,每秒可以执行 1.2×10^9 次浮点运算,用于16路激光相位控制,算法执行速度可达12.5 kHz/s。需要说明的是,本文报道的实验集中于验证SPGD算法主动相位控制扩展到多阵元时的可行性,每一激光链路中并没有加入放大器进行功率放大。

各路激光在光纤中传输时,实验室水箱、空调、风机等设备引起的环境噪声将不同程度地影响激光的相位场。在系统开环、未执行SPGD算法时,合成光束功率较低,并处于不断起伏状态,对应于非相干合成的情形。而在系统闭环、执行SPGD算法时,合成光束功率得到明显提高,实验结果如图2所示。在开环状态下,探测器平均输出电压为0.06 V,在闭环状态下,探测器平均输出电压为0.71 V。系统闭环时的激光功率提高为开环时的近12倍。需要说明的是,在系统处于闭环状态时,合成

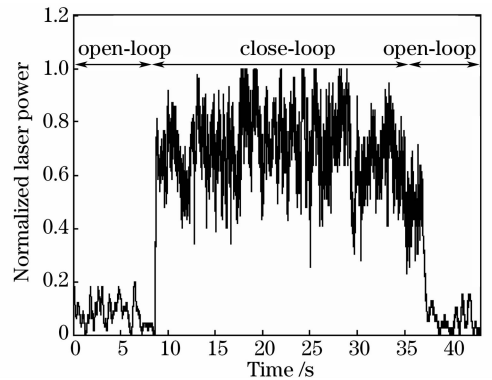


图2 系统开环、闭环状态下合成光束的功率

Fig. 2 Combined output power when the system is in open-loop and close-loop

激光功率值仍处于波动状态。这是由于系统不对光束的相位进行探测,而是利用算法产生相位控制信号,而DA芯片输出电压范围为 $-5 \sim +5$ V,当相位控制信号超出输出电压范围时,相位调制器将被重置,导致系统失锁。在实际操作过程中,如果外界不发生剧烈的振动等干扰因素,系统能够一直保持良好的闭环工作状态,直至手动向算法执行器件发送“停止”命令。

图3给出了相机在系统开环和闭环状态下采集的光斑。可以看出,在开环状态下,由于环境噪声引起的相位起伏使得输出功率较低并不断地变化,而在系统闭环时,输出光束功率得到明显提高,相机始终工作在饱和状态。

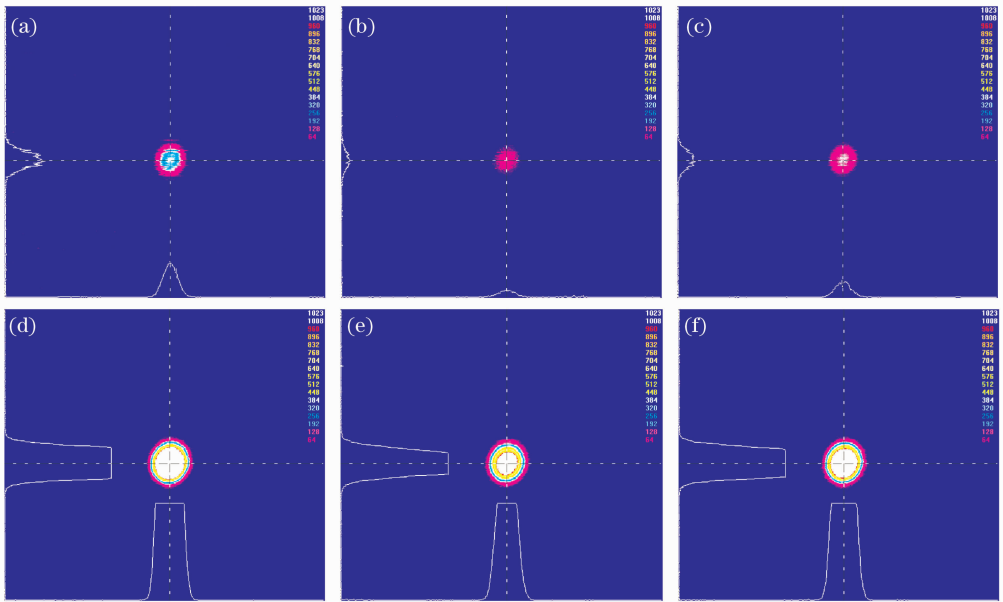


图 3 系统开环、闭环状态下光斑的变化情况。(a)~(c) 开环；(d)~(f) 闭环

Fig. 3 Intensity pattern of the combined beam. (a)~(c) open-loop; (d)~(f) close-loop

3 结 论

报道了利用 SPGD 算法实现 16 路光纤激光相位锁定的实验。结果表明,SPGD 算法可以用于多通道、大数目光纤激光的相位控制,系统闭环时合成激光功率比开环状态下提高近 12 倍,取得了较为理想的相位控制效果。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Li Jianfeng, Duan Kailiang, Wang Jianming *et al.*. Experiment on coherent-locking of two photonics crystal fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):923~926
李剑峰,段开棕,王建明等. 两光子晶体光纤激光器相干锁定的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5):923~926
- 3 J. Marmo, H. Injeyan, H. Komine *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman [C]. *SPIE*, 2009, **7195**:719507
- 4 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
- 5 M. A. Vorontsov, T. Weyrauch, L. A. Beresnev *et al.*.

- Adaptive array of phase-locked fiber collimators: analysis and experimental demonstration [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2):269~280
- 6 P. Zhou, Z. Liu, X. 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
- 7 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
- 8 L. Liu, M. A. Vorontsov. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller [C]. *SPIE*, 2005, **5895**:58950P
- 9 Zhou Pu, Liu Zejin, Ma Yanxing *et al.*. Simulation and experimental investigation on coherent beam combination of two fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2):431~436
周 朴,刘泽金,马阎星等. 随机并行梯度下降算法模拟两路光纤放大器相干合成与实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2):431~436
- 10 M. A. Vorontsov. Adaptive photonics phase-locked elements (APPLE): system architecture and wavefront control concept [C]. *SPIE*, 2005, **5895**:589501
- 11 M. A. Vorontsov, G. W. Carhart, M. Cohen *et al.*. Adaptive optics based on analog parallel stochastic optimization: analysis and experimental demonstration [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**:1440~1453