

# 自适应并行梯度随机下降算法及其在相干合成中的应用

罗 成 粟荣涛 王小林 周 朴

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 介绍了随机并行梯度下降(SPGD)算法用于相干合成(CBC)的基本理论,提出了一种自适应 SPGD 算法。从扰动方式和运行步骤两个方面进行自适应控制,提高了算法收敛速率。数值计算结果表明:对于 25 路、49 路和 100 路的激光阵列,采用自适应 SPGD 算法分别将收敛速率提高了 36.6%,59.8%和 80.2%,说明该方法在合成路数较大时优势更加明显,有望应用于大阵元激光相干合成系统中。

**关键词** 自适应光学;相干合成;随机并行梯度下降算法

**中图分类号** TN24 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.s101006

## Adaptive Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm and Its Application in Coherent Beam Combining

Luo Cheng Su Rongtao Wang Xiaolin Zhou Pu

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

**Abstract** The fundamental theory for coherent beam combining (CBC) via using stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is introduced and an adaptive SPGD algorithm is proposed. The convergence rate is increased by adaptively controlling the perturbations and stages of the SPGD algorithm. The results show that for CBC of laser arrays with 25 channels, 49 channels and 100 channels by using adaptive SPGD algorithm, the convergence rates are increased by 36.6%, 59.8% and 80.2%, respectively. This method has an advantage for CBC of laser arrays with large number of lasers.

**Key words** adaptive optics; coherent beam combining; stochastic parallel gradient descent algorithm

**OCIS codes** 140.3298; 110.1080; 120.5060

### 1 引 言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、散热性能优良、系统结构紧凑等优点。但是,由于受非线性效应、热损伤、抽运激光亮度等影响,单根光纤的输出功率受到限制。对多束激光进行相干合成输出是提高激光输出功率的有效手段,相干合成能够在获取高激光输出功率的同时保持良好的光束质量,实现近衍射极限的激光输出,因而受到广泛关注。按照相位控制的物理机制,相干放大阵列主要可以分为被动相位控制<sup>[1-5]</sup>和主动相位控制<sup>[6-11]</sup>。中国

科学院上海光学精密机械研究所实现了 8 路 1.09 kW 光纤激光被动相干合成输出<sup>[5]</sup>;在主动相位控制方面,国内外多家单位都实现了千瓦级光纤激光相干合成输出<sup>[12-14]</sup>。目前报道主动相位控制方法主要有外差法<sup>[6,8,15]</sup>、多抖动法<sup>[16-17]</sup>、单抖动法<sup>[13]</sup>和随机并行梯度下降法(SPGD)<sup>[10-11,18-19]</sup>等。国防科学技术大学和美国林肯实验室研究人员采用基于 SPGD 算法的主动相位控制方法分别实现了 16 路和 48 路光纤激光的相干合成<sup>[20-21]</sup>,证明该方案在合成路数方面具有很大潜力,有望成为将来高

收稿日期: 2014-01-15; 收到修改稿日期: 2014-04-08

作者简介: 罗 成(1973—),男,助理研究员,主要从事光束合成控制方面的研究。E-mail: chengluo@nudt.edu.cn  
本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

亮度光纤激光系统的实现方案。例如,国际相干放大网络工程(ICAN)计划对数以千记的飞秒脉冲光纤激光进行相干合成,作为下一代粒子加速器的驱动源<sup>[22]</sup>。SPGD算法的不足之处在于其控制的带宽随着相干合成激光路数的增加而存在较大幅度的下降,因此,改进SPGD算法以提升其在大阵元相干合成系统的相位控制带宽,具有重要的意义。本文以SPGD算法为研究对象,提出了一种自适应SPGD算法。数值模拟表明,该方法较传统的SPGD算法具有更快的收敛速度,有望应用于大阵元激光相干合成系统中。

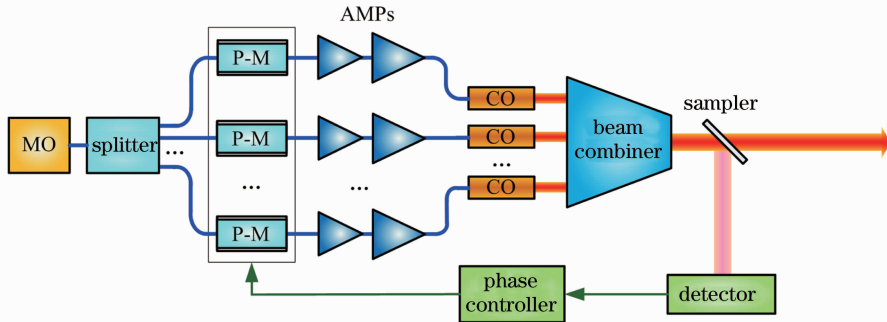


图1 基于SPGD算法的相干合成系统结构

Fig. 1 System setup for coherent beam combining of fiber amplifiers using SPGD algorithm

为了实现各路激光的相位控制,一般是用分光镜对阵列光束进行采样,探测器将采样光束的光信号转换成电信号并作为评价函数 $J$ 传递给相位控制器。相位控制器运行SPGD算法,通过相位调制器对各路激光的相位进行实时更新,最终实现激光阵列的同相输出。SPGD算法的运行步骤如下<sup>[18-19]</sup>:

- 1) 设置初始控制电压  $u^{(0)} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}^{(0)}$  并输出至相位控制器;
- 2) 获取评价函数  $J^{(m)}$ ;
- 3) 生成随机扰动电压  $\delta u^{(m)} = \{\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_N\}^{(m)}$  并保存;
- 4) 将随机扰动电压  $\delta u^{(m)}$  与控制电压  $u^{(m)}$  累加后输出至相位调制器;
- 5) 获取扰动后的评价函数  $J_+^{(m)}$ ;
- 6) 将随机扰动电压  $\delta u^{(m)}$  取反并与控制电压  $u^{(m)}$  累加后上输出至相位调制器;
- 7) 获取扰动后的评价函数  $J_-^{(m)}$ ;
- 8) 计算目标函数的变化量  $\Delta J^{(m)} = J_+^{(m)} - J_-^{(m)}$ ;
- 9) 按照公式  $u^{(m+1)} = u^{(m)} + \gamma \delta u^{(m)} \Delta J^{(m)}$  更新控制电压输出至相位调制器,进行第  $m+1$  次迭代;

## 2 基本原理

SPGD算法由美国陆军实验室Voronstov等<sup>[18]</sup>在1997年提出,近年来广泛应用于自适应光学和相干合成系统中。基于SPGD算法的光纤激光相干合成的系统结构如图1所示。主振荡器(MO)产生的种子激光经过分束器(splitter)分为 $N$ 路,每一路激光首先经过相位调制器(P-M)和放大器模块(AMP),然后由准直器(CO)准直,最后通过合束装置(combiner)形成阵列光束输出。

10) 转入第3)步,继续进行相位控制,直至算法结束。

其中,扰动方式和增益系数 $\gamma$ 对算法的收敛速度有很大的影响。研究表明<sup>[19]</sup>,采用伯努利分布进行扰动时算法的收敛速度较快; $\gamma$ 取值过小时算法收敛速度较慢,而 $\gamma$ 取值过大时,算法无法收敛至理想情形。为了提高SPGD算法的收敛速度,提出了一种自适应SPGD算法,主要从算法扰动方式和运行步骤两个方面进行自适应控制。

在扰动方式方面,在初期各路相位差异较大,采用伯努利分布的随机扰动;后期各路相位差异变小,仅随机选择部分(如1/3)施加扰动伯努利分布的随机扰动,其余部分扰动为0,即不施加扰动。

在运行步骤方面,在原步骤7)之后,对 $J_+^{(m)}$ 和 $J_-^{(m)}$ 进行简单判断,若 $[J_+^{(m)} - J_-^{(m)}]$ 乘以 $[J_-^{(m)} - J^{(m)}]$ 大于等于0,则跳过步骤8)、9),直接到步骤10)。即:若正向施加扰动电压 $\delta u^{(m)}$ 与反向施加 $\delta u^{(m)}$ 的结果都使得 $J^{(m)}$ 同步增加或减少,则不更新控制电压。这样,避免无益甚至有害的随机扰动导出的更新控制电压施加到相位调制器,能够提高算法的收敛速度。

### 3 数值仿真

为了验证该自适应 SPGD 算法的有效性,对算法执行过程进行数值仿真。分别考虑 25 路、49 路和 100 路光纤激光进行相干合成的情况。为简单起见,假设各路激光均为平面波。评价函数  $J$  取为远场桶中功率,桶的面积为阵列远场艾里斑面积的一半。设各路初始相位服从均值为 0、方差为  $\sigma_p = 3\pi$  的高斯分布,考虑按照以下条件运行 SPGD 算法时桶中功率的收敛情况:

1) 经典 SPGD 算法 1:  $\gamma = 180, \delta u^{(m)}$  为  $\pm 1$  伯努利分布;

2) 经典 SPGD 算法 2:  $\gamma = 500, \delta u^{(m)}$  为  $\pm 1$  伯努利分布;

3) 自适应 SPGD 算法 1:  $\gamma = 500, J \leq 0.3$  时  $\delta u^{(m)}$  为  $\pm 1$  伯努利分布,  $J > 0.3$  时  $\delta u^{(m)}$  为 0,  $\pm 1$  伯努利分布(0 占 2/3,  $\pm 1$  各占 1/6);

4) 自适应 SPGD 算法 2:  $\gamma = 500, J \leq 0.3$  时  $\delta u^{(m)}$  为  $\pm 1$  伯努利分布,  $J > 0.3$  时  $\delta u^{(m)}$  为 0,  $\pm 1$  伯努利分布(0 占 2/3,  $\pm 1$  各占 1/6), 在实际施加扰动时优化运行步骤。

根据以上条件,数值仿真 SPGD 算法的运行过程,并取 1000 次仿真结果的均值,如图 2 所示。

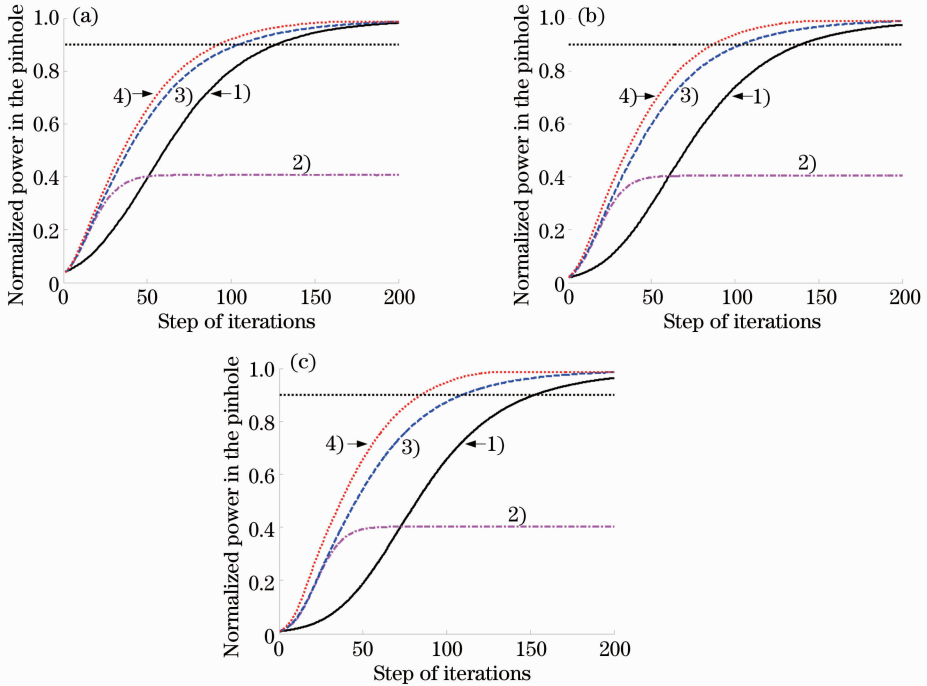


图 2 不同条件下运行 SPGD 算法校正激光阵列相差的收敛曲线。(a)25 路;(b)49 路;(c)100 路

Fig. 2 Convergence curves for phase aberrations correction in laser array using different SPGD algorithms.

(a) 25 channels; (b) 49 channels; (c) 100 channels

从图 2 可以看出,对于经典的 SPGD 算法,当  $\gamma$  较大(等于 500)时,虽然能够获得较快的收敛速度,但是归一化桶中功率不能收敛到最优值;相反,当  $\gamma$  较小(等于 180)时,虽然能够将归一化桶中功率收敛到最优值,但是收敛速度较慢。当采用自适应 SPGD 算法 1 进行计算时,由于在  $J$  大于 0.3 时改变了扰动方式,即使在  $\gamma$  较大(等于 500)的情况下能够将归一化桶中功

率收敛到最优值,且收敛速度更快,如图 2 中的曲线 3) 所示。进一步对运行步骤进行优化(自适应 SPGD 算法 2),由于在  $[J_+^{(m)} - J^{(m)}] \times [J^{(m)} - J_-^{(m)}] \geq 0$  时不更新控制电压,收敛速度得到进一步提高,如图 2 中的曲线 4) 所示。在不同情况下将归一化桶中功率校正到 0.9 需要的迭代步数如表 1 所示。

表 1 将归一化桶中功率校正到 0.9 需要的迭代步数

Table 1 Steps of iteration for making normalized power in the pinhole to be 0.9

	25 channels	49 channels	100 channels
Traditional SPGD algorithm 1	127	278	611
Adaptive SPGD algorithm 1	105	207	437
Adaptive SPGD algorithm 2	93	174	339

从表中可以看出,同时对扰动方式和运行步骤进行自适应控制时,归一化桶中功率校正到 0.9 需要的迭代步数分别为 93, 174, 339 步,相比经典的 SPGD 算法提高了 36.6%, 59.8%, 80.2%。由此可知,自适应 SPGD 算法对于大阵元相干合成系统的迭代速率提升效果更为明显。

## 4 结 论

提出了一种自适应 SPGD 算法:在扰动方式方面,在初期各路相位差异较大,对各路激光伯努利分布的随机扰动;后期各路相位差异变小,仅随机选择部分路数施加扰动伯努利分布的随机扰动。在运行步骤方面,若正向施加扰动电压与反向施加的结果都使得性能评价函数同步增加或减少,则不更新控制电压。数值计算了利用经典 SPGD 算法和自适应 SPGD 算法对 25 路、49 路和 100 路的激光阵列进行相位控制的情况。计算结果表明,自适应 SPGD 算法分别将收敛速率提高了 36.6%, 59.8%, 80.2%, 对于大数目相干合成系统能够明显地提高控制带宽。该方法有望应用于大阵元激光相干合成系统中,以弥补经典 SPGD 算法在控制带宽方面的不足。

## 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 Li Jianfeng, Duan Kailiang, Wang Jianming, *et al.*. Experiment of coherence-locking of two photonic 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 He Bing, Lou Qihong, Zhou Jun, *et al.*. Coherent output power of 60 W from two large-core double-cladding fiber lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(8): 1279–1280.  
何 兵, 楼祺洪, 周 军, 等. 两根大芯双包层光纤激光器获得 60 W 相干输出 [J]. *光学学报*, 2006, 26(8): 1279–1280.
- 4 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.
- 5 Zhou Jun, He Bing, Xue Yuhao, *et al.*. Study on passive coherent beam combination technology of high power fiber laser arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 251–259.  
周 军, 何 兵, 薛宇豪, 等. 高功率光纤激光阵列被动相干组束技术研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 251–259.
- 6 Huang Zhimeng, Luo Yongquan, Zhang Dayong, *et al.*. Active phase control in laser coherent combination based on liquid crystal optical modulator [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(7): 1713–1716.  
黄智蒙, 骆永全, 张大勇, 等. 基于液晶光调制器的激光相干合

- 成主动相位控制 [J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1713–1716.
- 7 Wang Detian, Zhou Weijun, Wen Weifeng, *et al.*. Coherent combination of fiber lasers using heterodyne method [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(5): 1125–1128.  
王德田, 周维军, 温伟峰, 等. 基于外差法的光纤激光器相干合成 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(5): 1125–1128.
- 8 Hou Jing, Xiao Rui, Jiang Zongfu, *et al.*. Coherent beam combination of three ytterbium fiber amplifiers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(10): 1585–1588.  
侯 静, 肖 瑞, 姜宗福, 等. 三路掺镱光纤放大器的相干合成实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(10): 1585–1588.
- 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 decent 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 Yang Huizhen, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent control algorithm for adaptive optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1355–1360.  
杨惠珍, 李新阳, 姜文汉. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法仿真与分析 [J]. *光学学报*, 2007, 27(8): 1355–1360.
- 11 Yang Ruofu, Yang Ping, Shen Feng. Experimental research on phase detection and correction of two fiber amplifier based on active segmented mirrors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(12): 8297–8301.  
杨若夫, 杨 平, 沈 锋. 基于能动分块反射镜的两路光纤放大器相位探测及其相干合成实验研究 [J]. *物理学报*, 2009, 58(12): 8297–8301.
- 12 C X Yu, S J Augst, S M Redmond, *et al.*. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(14): 2686–2688.
- 13 刘泽金, 王小林, 周 朴, 等. 9 路光纤激光相干合成实现 1.56 kW 高功率输出 [J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0705008.
- 14 A Flores, T M Shay, C A Lu, *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifiers in a kW regime [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2011, CFE31-2.
- 15 G D Goodno, H Komine, S J McNaught, *et al.*. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(9): 1247–1249.
- 16 Thomas M Shay. Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam [J]. *Opt Express*, 2006, 14(25): 12188–12195.
- 17 Ma Yanxing, Si Lei, Zhou Pu, *et al.*. Coherent beam combining of MOPA with multi-dithering technique [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1639–1644.  
马阎星, 司 磊, 周 朴, 等. 多抖动法主振荡功率放大器相干合成技术 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(11): 1639–1644.
- 18 Mikhail A Vorontsov, Thomas Weyrauch, Leonid 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.
- 19 Pu Zhou, Zejin Liu, Xiaolin 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.
- 20 C X Yu, J E Kinsky, S E J Shaw, *et al.*. Coherent beam combining of a large number of PM fibers in a 2-D fiber array [J]. *Electron Lett*, 2006, 42(18): 1024–1025.
- 21 Zhou Pu, Wang Xiaolin, Ma Yanxing, *et al.*. Phase locking of sixteen laser beams using stochastic parallel gradient descent algorithm [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(2): 367–369.  
周 朴, 王小林, 马阎星, 等. 随机并行梯度下降算法实现 16 路光纤激光相位锁定 [J]. *中国激光*, 2010, 37(2): 367–369.
- 22 Gerard Mourou, Bill Brocklesby, Toshiki Tajima, *et al.*. The future is fibre accelerators [J]. *Nat Photonics*, 2013, 7(4): 258–261.

栏目编辑: 王晓琰