

变增益随机并行梯度下降算法及其在相干合成中的应用

黄智蒙^{1,3} 唐 选^{2,3} 刘仓理^{1,3} 李剑峰^{1,3} 张大勇^{1,3} 王小军^{2,3} 韩 梅¹

¹中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

²北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094

³中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 将一种改进的变增益系数自适应随机并行梯度下降(SPGD)控制算法应用到大阵列光纤激光相干合成中, 计算不同增益系数对算法收敛速度的影响程度, 分析判断该方法的控制带宽、控制时间与合成光束质量、合成路数的关系以及其应用于大规模阵列相干合成的可行性。计算结果显示, 在7束光纤激光相干合成中, 该方法由于采用了变增益系数的控制策略, 相比于传统的固定增益系数SPGD算法, 具有收敛速度快、控制带宽高、适用于多组束光纤激光相干合成等优点。将该方法应用在37束、91束和100束光纤激光阵列锁相中, 也得到了快速的收敛效果, 采用自适应SPGD算法分别将收敛速率提高了37.8%、63.8%和75.0%, 说明该方法在合成路数较大时优势更加明显, 进一步表明其具备向大阵列光束相干合成扩展的潜力。

关键词 相干光学; 光纤激光器; 光束合成; 激光阵列

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0402004

Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm with a Variable Gain Coefficient and Its Application in Coherent Beam Combining

Huang Zhimeng^{1,3} Tang Xuan^{2,3} Liu Cangli^{1,3} Li Jianfeng^{1,3} Zhang Dayong^{1,3}
Wang Xiaojun^{2,3} Han Mei¹

¹*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

²*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*

³*Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*

Abstract An adaptive stochastic parallel gradient descent (SPGD) control algorithm with a variable gain coefficient is applied in coherent beam combining (CBC) of a large scale fiber laser array. The influence of different gain coefficients on convergence speed of the control algorithm is computed. The relationship between control bandwidth, iteration rates, beam quality of combination, laser numbers and the feasibility of a large scale coherent beam combining based on this adaptive algorithm is analyzed. The results show that in CBC of 7 fiber lasers, this adaptive SPGD algorithm using a variable gain coefficient control strategy holds advantage of high iteration rates, high control bandwidth and good applicability to coherent beam combining of fiber laser array. The fast convergence speed can also be obtained and the convergence speed is increased by 37.8%, 63.8% and 75.0% respectively, when this algorithm is applied in CBC of 37, 91 and 100 fiber lasers. We believe the proposed adaptive SPGD technique has the potential to be scaled to a large-scale array with high output power.

Key words coherence optics; fiber lasers; laser beam combining; laser arrays

OCIS codes 140.3510; 140.3298; 140.3290

收稿日期: 2014-10-29; 收到修改稿日期: 2014-12-01

基金项目: 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室基金(HEL2014-07)、中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金(SFZ20130302)

作者简介: 黄智蒙(1982—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光纤激光器与光束合成等方面的研究。

E-mail: zhimenghuang@126.com

1 引 言

高光束质量(BQ)、高功率激光在材料处理、远程遥控监测、目标定位、工业加工等方面具有广泛的应用。由于热效应和非线性效应的限制,单台激光器无法在达到很高的输出能量或功率的同时保持高的光束质量,而多台激光器阵列的相干合成技术,能够实现高功率、高光束质量激光输出,因此成为国际上研究的热点^[1-13]。

在固体激光及光纤激光相干合成(CBC)中,并联主振荡-功率放大(MOPA)方案由于其相位控制的精确性和主动性,适用于大阵列的激光相干合成,该方案最关键的是对光路相位进行探测与控制。适用于光纤阵列相干合成的主动相位控制方法主要有外差法^[14-19]、随机并行梯度下降(SPGD)算法^[20-29]、频域多抖动法(MFD)^[30-33]、时域单抖动法(SFD)^[34-35]和多相位扰动法(MPD)^[36-37]等。其中,SPGD方法不需要探测子光束的相移,而只需要使用一个光电探测器获得远场的强度特征如环围功率[也称桶中功率(PIB)]作为目标评价函数即可,结构简单,增加合成光束路数且不会提高系统的复杂度,其典型代表为美国雷神公司的“自适应光相控阵锁定单元(APPLE)”系统,该系统利用液晶调制器阵列和SPGD算法控制光束阵列相位,实现光纤激光阵列的全电组合输出^[38]。

本文将一种改进的变增益系数自适应SPGD控制算法应用到大阵列光纤激光相干合成中,计算了不同增益系数对算法收敛速度的影响程度。在7束光纤激光相干合成中,该方法由于采用了变增益系数的控制策略,相比于传统的固定增益系数SPGD算法,拥有收敛速度快、控制带宽高、适用于多组束光纤激光相干合成等优点,将该方法应用在37束、91束和100束光纤激光阵列锁相中,也得到了快速的收敛效果,并且该方法在合成路数较大时优势更加明显,具备向大阵列光束相干合成扩展的潜力。

2 理论模型

对于本文所涉及的问题,可以理解为在发射面对光束进行调制后,光束在自由空间进行傍轴传播,因此其传播过程可以由菲涅耳衍射积分描述为

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \iint dx' dy' \mathbf{E}(x', y', 0, t) \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{E} 为电场强度, λ 为波长, ω 为角频率, $k=2\pi/\lambda$ 为波数。对于本文所考虑的对象,可以有以下假设:1)忽略子光束的纵向极化;2)子光束都是无色散的,即 ω/k 等于常数;3)子光束的谱宽足够窄,因此其不同频率分量具有相同的空间分布。那么对于多光束而言,发射面的场可以表示为

$$\mathbf{E}(x', y', 0, t) = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{e}}_j \psi_{ij}(x', y', t; x'_i, y'_i) = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N \hat{\mathbf{e}}_j u_{ij}(x', y'; x'_i, y'_i) \int d\omega \exp(i\omega t) g_j(\omega), \quad (2)$$

式中 $\hat{\mathbf{e}}_j$ 表示第*i*束光的第*j*个偏振方向单位矢量, ψ_{ij} 表示第*i*束光第*j*个偏振分量的光场, u_{ij} 表示第*i*束光第*j*个偏振分量的光场复振幅, N 为光束数目, (x'_i, y'_i) 为第*i*束光的质心位置, g_j 为第*i*束光第*j*个偏振分量的光谱线形函数。因为自由空间传播不改变光束的偏振,总可以将每束光的偏振分解到两个正交方向上分布描述其传播过程。因此由(1)式可得角频率为 ω 的光场为

$$u(x, y, z, \omega) = \frac{\exp[ik(\omega)z]}{i\lambda z} \iint dx' dy' \exp\left\{\frac{ik(\omega)}{2z}[(x-x')^2 + (y-y')^2]\right\} \sum_{i=1}^N g_i(\omega) u_i(x, y; x'_i, y'_i). \quad (3)$$

实现相干合成主动控制的最简单的方法是直接探测两光束间的相对相移,并加以共轭补偿。但当阵列规模较大时,这需要庞大的探测-控制系统,大大增加了系统的复杂性,而对大规模阵列进行串行或者部分并行的探测-控制,由于其延迟较长很容易使系统的锁相失效。

为解决上述问题,可以考虑使用梯度下降方法:设目标函数 J 是控制矢量 $\mathbf{u}=(u_1, \dots, u_j, \dots, u_N)$ 的函数。为确定 $J(\mathbf{u})$ 达到极小/极大值的控制矢量 \mathbf{u}^* ,数值逼近的思想是从一个初始值 $\mathbf{u}(0)$ 出发,沿着减小/增大的方向逐步修正 \mathbf{u} 值。可以证明如下的修正方法可以使得 $J(\mathbf{u})$ 单向减小/增大:

$$\mathbf{u}^{(n+1)} = \mathbf{u}^{(n)} - \gamma_n \left. \frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}^{(n)}}, \quad (4)$$

式中 n 表征迭代步数, $\mathbf{u}^{(n)}$ 为第*n*步的控制矢量,增益系数或松弛因子 γ_n 的正负决定了下一步的 $J(\mathbf{u})$ 是减小还是增大。在相干合成中使用此方法的最大优点是不需要探测子光束的相移。

原则上可以对各控制通道逐一施加小扰动(串行扰动方法),但这样的控制过程其带宽是非常窄的,完全不能达到相干合成等要求快速控制领域的要求。因此就有了SPGD方法:通过对所有控制变量同时施加随机扰动来提高控制带宽。施加随机扰动后目标函数 J 的改变量 δJ 可写为

$$\delta J = \sum_{j=1}^N \frac{\partial J}{\partial u_j} \delta u_j + \sum_{i,j} \frac{\partial^2 J}{\partial u_i \partial u_j} \delta u_i \delta u_j + \dots \quad (5)$$

假设各控制变量 δu_i 为统计独立的随机变量,并且方差相等,均值为零,概率密度关于均值对称,即 $\langle \delta u_i \rangle = 0$, $\langle \delta u_i \delta u_j \rangle = \sigma^2 \delta_{ij}$, 那么可以得到:

$$\langle \delta J \delta u_i \rangle = \sigma^2 \frac{\partial J}{\partial u_i} + O(\sigma^4). \quad (6)$$

将(6)式代入(4)式,则在统计学意义上得到SPGD算法:

$$u_j^{(n+1)} = u_j^{(n)} - \xi \delta J^{(n)} \delta u_j^{(n)}, \quad (7)$$

式中 $\xi = \frac{\gamma_n}{\sigma^2}$, γ_n 为第 n 步的松弛因子(增益系数), $u_j^{(n)}$ 为第 n 步施加在第 j 路上的控制变量, $J^{(n)}$ 为第 n 步的评价函数。

在实际应用中,还常使用到双向扰动技巧来加速收敛,即在每个迭代步对一组随机变量 $\{\delta u_i\}$ 分别施加正向和负向扰动,并定义

$$\delta J^{(n)} = J[u_j^{(n-1)} + \delta u_j^{(n)}] - J[u_j^{(n-1)} - \delta u_j^{(n)}]. \quad (8)$$

图1为SPGD算法扰动示意图,相位扰动的序列 Δu_i 正负号随机或指定,幅度为 σ 。对于SPGD算法,各路相位扰动的序列 Δu_i 为统计独立的随机变量,各通道随机序列均值为零,即

$$\frac{1}{T} \int_T \delta u_k(t) dt = 0, \quad \frac{1}{T} \int_T \delta u_i(t) \delta u_j(t) dt = \sigma^2 \delta_{ij}. \quad (9)$$

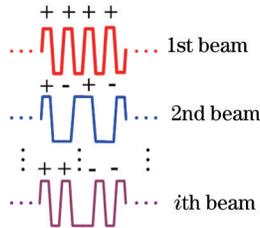


图1 SPGD算法示意图

Fig.1 Sketch map of SPGD algorithm

图2为SPGD算法控制流程图,对于变增益系数的设定,其表达式为 $\gamma = C_1/J^{C_2}$ 。一般情况下,取 $C_1 > 0, C_2 >$

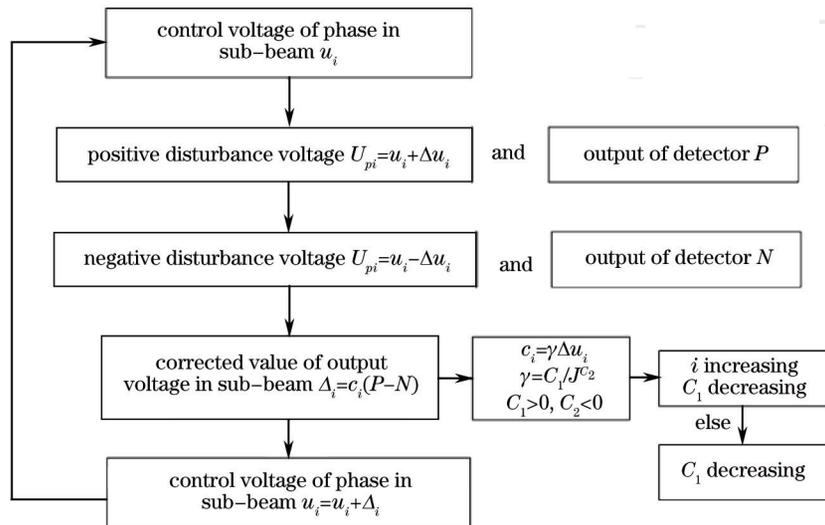


图2 SPGD算法控制流程图

Fig. 2 Flow chart of SPGD control algorithm

0, 对应于向特征函数 J 增大方向的收敛, 并且增益系数随着特征函数 J 的增大而减小, 以获得较快的收敛速度和逼近目标值时较好的收敛稳定性。若 $C_1 < 0$, 对应于向特征函数 J 减小的方向收敛, 无实用意义; 若 $C_2 < 0$, 增益系数随着特征函数 J 的增大而增大, 易导致收敛过程的不稳定; 若 $C_2 = 0$, 则退化为固定增益系数的形式。

在变增益系数 SPGD 算法中, C_2 一般设为 1, 当 J 变化时, 调节 C_1 的大小来控制各子束相位。当光束数目增加时, 收敛所需迭代步数增加, 评价函数 J 增长相对越慢, 这时 C_1 的选取就应适当减小, 否则增益系数过大会导致振荡不收敛或收敛所需步数大大增加。

3 计算条件设置

利用数值模拟探讨 SPGD 方法在多光束相干合成中的一般性问题。将各子束简化为同偏振的高斯光束。7 路、37 路、91 路子光束按照图 3~5 中的六角方式排列, 100 路子光束按照图 6 中的矩形方式排列。子束半径 r 变化时改变了子光束的空间占空比(设子光束外半径 r 与子光束发射孔径外半径 r_0 相等, 子光束外沿相切, 具有最大的占空比, 设 $r=r_0=2$ cm, 高斯光束束腰半径为 1.8 cm)。

在 SPGD 方法的模拟中, 取控制矢量 \mathbf{u} 分别为 7 束、37 束、91 束和 100 束子光束相位构成的矢量, 并采用

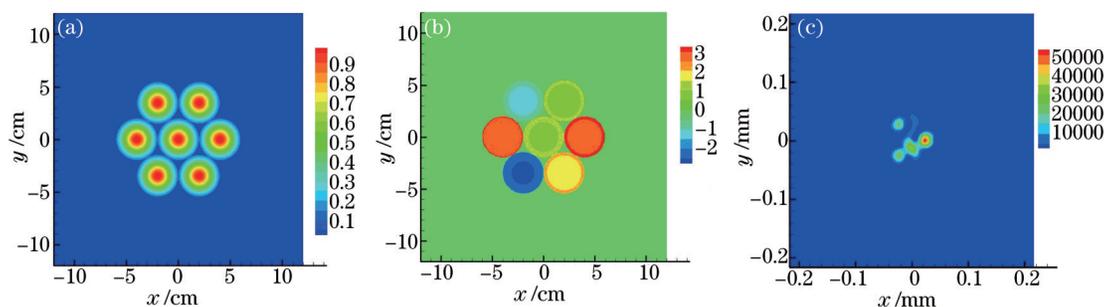


图 3 $r/r_0=1.0$ (占空比为 0.777778)时, 7 子束有相差排布方式。(a) 近场幅值; (b) 子束相位分布; (c) 远场幅值
Fig.3 Distribution of 7 beams with phase diversity when $r/r_0=1.0$ (filling ratio is 0.55102). (a) Near field amplitude; (b) phase distribution of beams; (c) far field amplitude

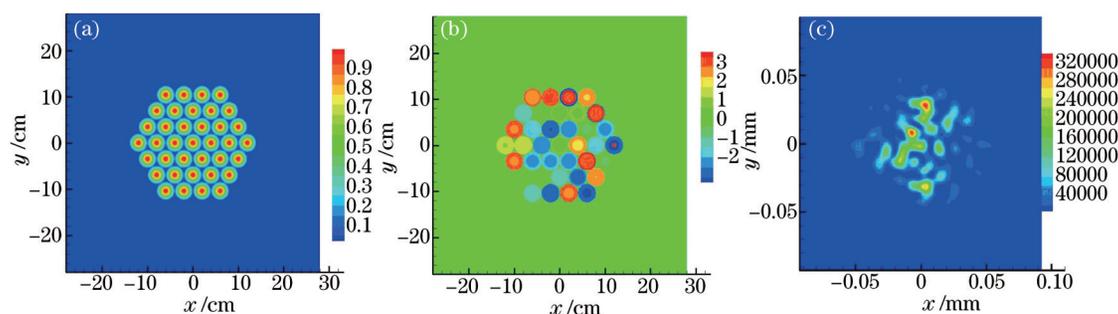


图 4 $r/r_0=1.0$ (占空比为 0.755102)时, 37 子束有相差排布方式。(a) 近场幅值; (b) 子束相位分布; (c) 远场幅值
Fig.4 Distribution of 37 beams with phase diversity with $r/r_0=1.0$ (filling ratio is 0.755102). (a) Near field amplitude; (b) phase distribution of beams; (c) far field amplitude

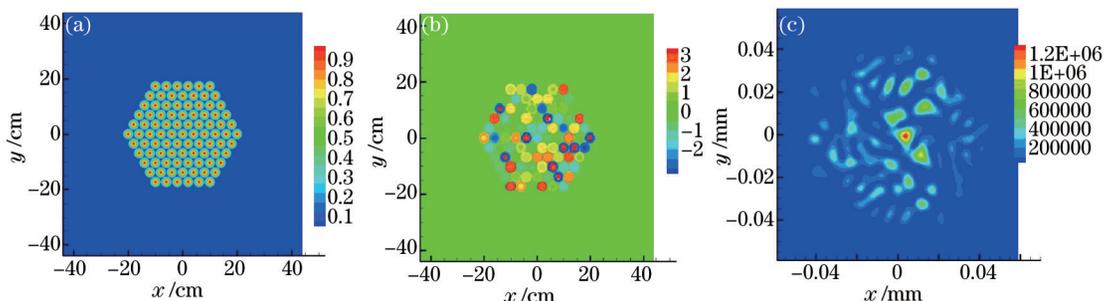


图 5 $r/r_0=1.0$ (占空比为 0.752066)时, 91 子束有相差排布方式。(a) 近场幅值; (b) 子束相位分布; (c) 远场幅值
Fig.5 Distribution of 91 beams with phase diversity when $r/r_0=1.0$ (filling ratio is 0.752066). (a) Near field amplitude; (b) phase distribution of beams; (c) far field amplitude

双向扰动,扰动量为伯努利分布,方差为0.1rad。目标特征函数为以远场原点为中心,环围能量与理想无相差情况下的环围能量之比,即 J 为相对PIB(RPIB),取值区间为(0, 1.0)。各子光束的相移由一组均匀分布的随机数描述,本文中随机输入各子光束相位序列 $\{\phi_i\}$ 所对应的初始随机相位均方根(RMS)的大小为 $0.50 p$ 。

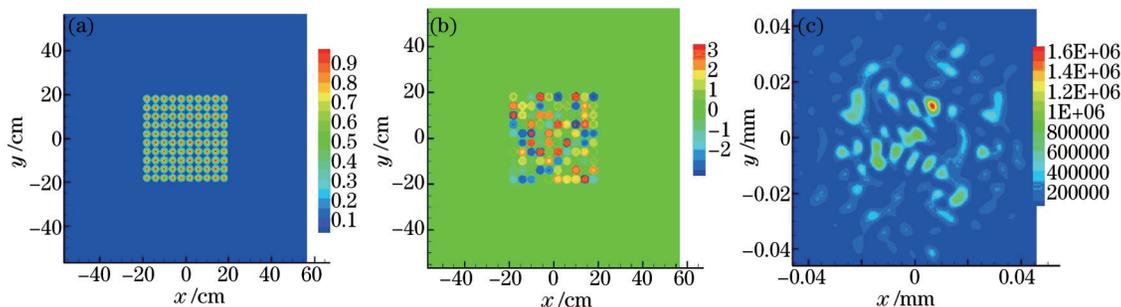


图6 $r/r_0=1.0$ (占空比为0.499974)时,100子束有相差排布方式。(a)近场幅值;(b)子束相位分布;(c)远场幅值
Fig.6 Distribution of 100 beams with phase diversity when $r/r_0=1.0$ (filling ratio is 0.499974). (a) Near field amplitude; (b) phase distribution of beams; (c) far field amplitude

4 模拟结果与分析

4.1 7束光纤激光相干合成算法控制中增益系数 γ 的选取

SPGD算法的收敛速度和校正效果主要取决于随机扰动幅度 δu 和增益系数 γ 。对于固定的 δu ,存在着最佳 γ 取值范围: γ 太小,收敛速度较慢; γ 太大,会出现评价函数 J 随迭代步数剧烈振荡的现象,导致收敛缓慢甚至不收敛。以7路合成为例,如图7(a)所示, $\gamma=0.1$ 时,收敛速度明显慢于 $\gamma=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 的结果;而 $\gamma=1.0, 1.2$ 时,当 J 超过一定值后,曲线发生明显抖动,无法达到全局最优。如图7(b)所示,对比每步迭代的相位改变量 $u_i^{(n+1)} - u_i^{(n)}$ ($i=1, 2, \dots, 7$)随迭代步数的变化曲线,稳定的收敛过程对应于该改变量幅度的稳定减小,结合(7)式可知,对于固定的 γ ,改变量幅度的减小是由 $\delta J^{(n)}$ 的下降贡献的。

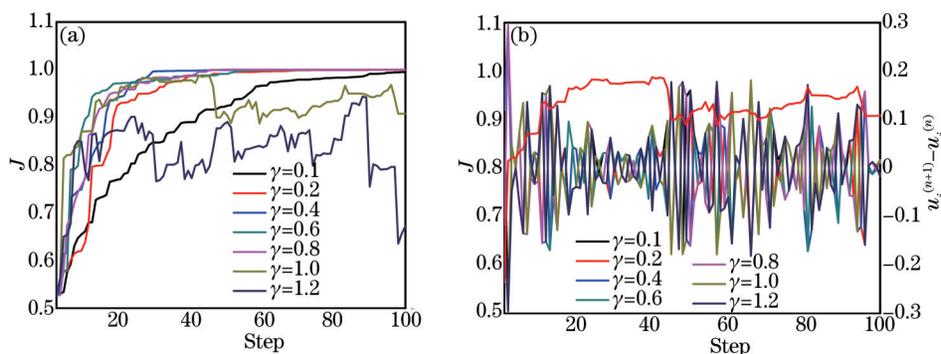


图7 7束合成,增益因子 γ 对收敛特性的影响。(a) $\gamma=0.1\sim 1.2$; (b) $\gamma=1.0$

Fig.7 Impact of gain coefficient γ on convergence characteristic in CBC of 7 beams. (a) $\gamma=0.1\sim 1.2$; (b) $\gamma=1.0$

γ 除取固定值外,还可随 J 的变化。在实际应用中希望在较短的迭代步数内将评价函数 J 的值提高到较高水平,如此可在 J 较小时 γ 取较大的值,并随着 J 的增大减小 γ ,以避免剧烈振荡导致的收敛缓慢或不收敛。在7束合成变增益系数 $\gamma=C_1/J^{C_2}$ 中,取 $C_2=1, C_1=0.5$,对于 $\gamma=0.5/(J+\varepsilon)$ (取 $\varepsilon=0.001$ 以避免 $J\rightarrow 0$ 时的奇异性)和 $\gamma=0.5$ 两种情况,分析了50组具有不同初始位相光场的7束合成SPGD控制过程,其中每组光场都进行了50次统计独立的SPGD控制过程。

图8给出了7束合成时,对于每组光场的迭代步数(以 $J>0.95$ 作为收敛判据)的统计结果,即平均迭代步数 M 以及 $M\pm\sigma$ (σ 为标准差)的值(图中绿色、红色、蓝色柱子的高度分别为 M 以及 $M\pm\sigma$ 的值)。由此图可以看出变增益系数 $\gamma=0.5/(J+\varepsilon)$ 有明显的优势。因此在后面的计算中,均采用 $\gamma=0.5/(J+\varepsilon)$ 的函数形式进行SPGD控制过程的研究。

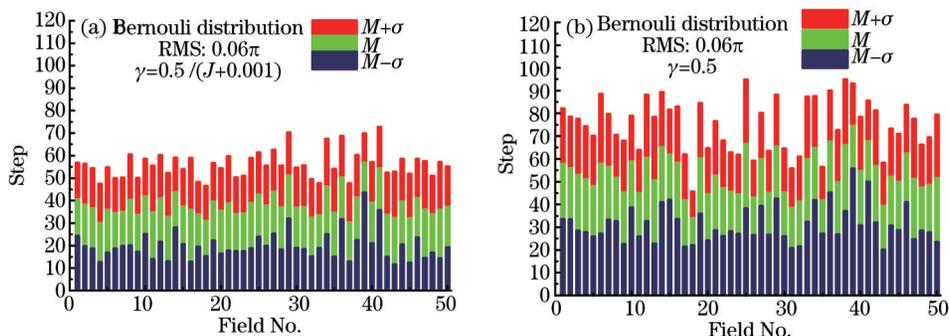


图8 迭代步数对比。(a) 变增益系数; (b) 固定增益系数

Fig.8 Contrast of iteration step. (a) Variable gain coefficient; (b) fixed gain coefficient

4.2 变增益系数控制方法在37束光纤激光相干合成中的应用

在固定增益($\gamma=0.5$)时,如图9所示,37束光纤激光相干合成中,迭代步数(以 $J>0.95$ 作为收敛判据)为310步,收敛较慢。

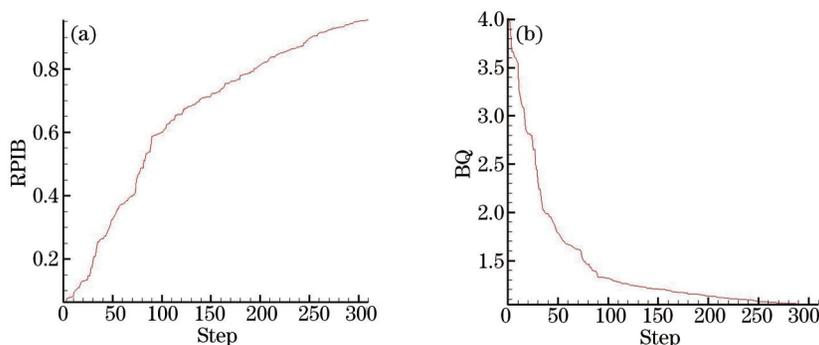


图9 固定增益系数($\gamma=0.5$)时,SPGD算法在37束光纤相干合成中的控制结果。(a) RPIB曲线; (b) BQ曲线

Fig.9 Result of phase control in CBC of 37 fiber lasers based on SPGD algorithm with a fixed gain coefficient ($\gamma=0.5$).

(a) Curve of RPIB; (b) curve of BQ

将变增益系数 $\gamma=0.5/(J+\epsilon)$ 的控制方法应用于37束光纤相干合成中,数值模拟结果显示,得到了较快的

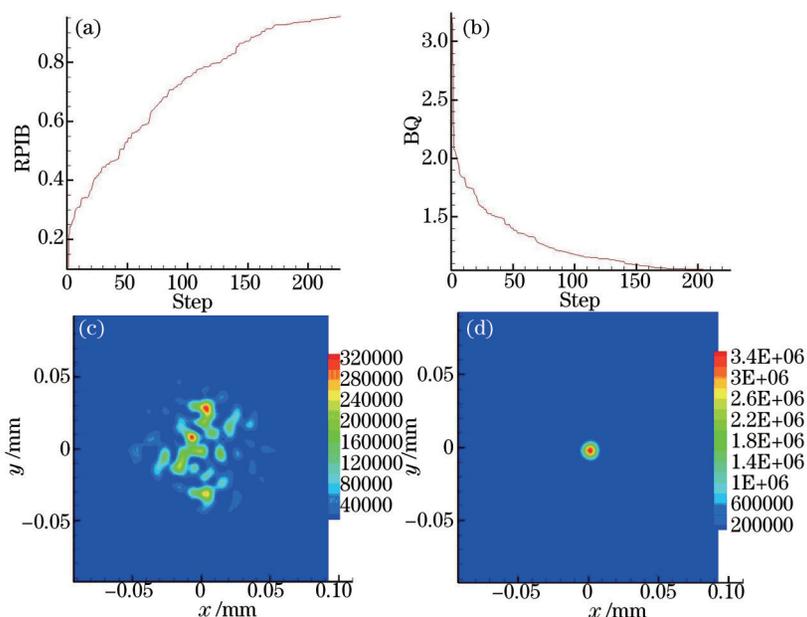


图10 变增益系数时,SPGD算法在37束光纤相干合成中的控制结果。(a) RPIB曲线; (b) BQ曲线;

(c) 迭代前的远场强度; (d) 迭代后的远场强度

Fig.10 Result of phase control in CBC of 37 fiber lasers based on SPGD algorithm with a variable gain coefficient.

(a) Curve of RPIB; (b) curve of BQ; (c) far field before iteration; (d) far field after iteration

收敛效果和较好的光束质量。图 10 为变增益系数 SPGD 算法在 37 束光纤相干合成中的控制结果,迭代步数(以 $J>0.95$ 作为收敛判据, $J=0.951751$)为 225 步,相比于固定增益系数节省了 85 步,光束质量由开环时的 BQ 值 3.15237 提高到闭环时的 BQ 值 1.04581。

4.3 变增益系数控制方法在 91 束光纤相干合成中的应用

在固定增益($\gamma=0.3$)时,如图 11 所示,91 束光纤激光相干合成中,迭代步数(以 $J>0.95$ 作为收敛判据)为 565 步。表 1 为固定增益系数分别选取 0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 时计算所得的迭代步数。增益系数较小($\gamma=0.2$)时,收敛较慢,迭代步数为 990 步;增益系数较大($\gamma=0.6$)时,收敛较慢或振荡不收敛;增益系数 $\gamma=0.3、0.4、0.5$ 时,迭代步数较为接近,为 565~505 步。

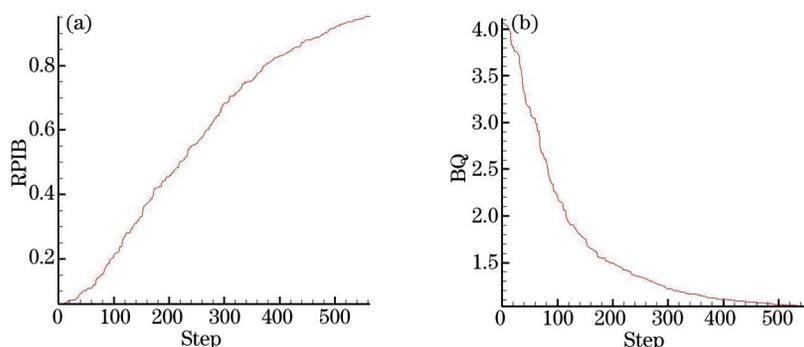


图 11 固定增益系数($\gamma=0.3$)时,SPGD 算法在 91 束相干合成中的控制结果。(a) RPIB 曲线; (b) BQ 曲线

Fig.11 Result of phase control in CBC of 91 fiber lasers based on SPGD algorithm with a fixed gain coefficient ($\gamma=0.3$).

(a) Curve of RPIB; (b) curve of BQ

表 1 91 束光纤相干合成中,固定增益系数 γ 与迭代步数的关系

Table 1 Relations between fixed gain coefficient γ and iteration step in CBC of 91 fiber lasers

γ	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Step	990	565	550	505	1000

图 12 为变增益系数 SPGD 算法(取 $C_2=1, C_1=0.3$)在 91 束光纤相干合成中的控制结果,迭代步数(以 $J>0.95$

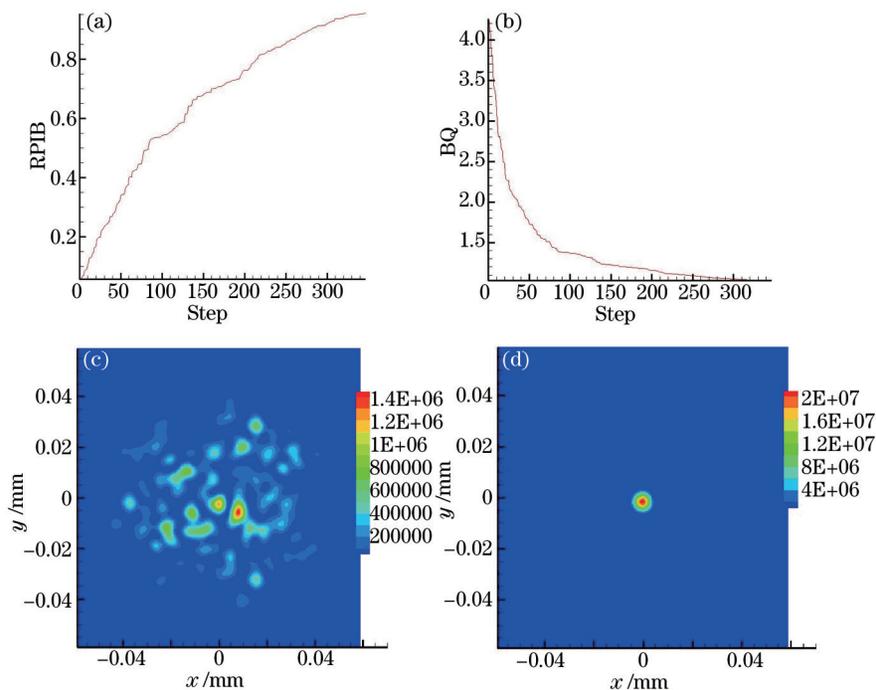


图 12 变增益系数时,SPGD 算法在 91 束光纤相干合成中的控制结果。(a) RPIB 曲线; (b) BQ 曲线;

(c) 迭代前的远场强度; (d) 迭代后的远场强度

Fig.12 Result of phase control in CBC of 91 fiber lasers based on SPGD algorithm with a variable gain coefficient.

(a) Curve of RPIB; (b) curve of BQ; (c) far field before iteration; (d) far field after iteration

作为收敛判据, $J=0.95029$)为 345 步, 光束质量由开环时的 BQ 为 4.43672 提高到闭环时的 BQ 为 1.05224。

表 2 所列变增益系数中 C_1 分别选取 0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 时计算所得迭代步数。增益系数较小($C_1=0.2$)时, 收敛较慢, 迭代步数为 610 步; 增益系数较大($\gamma=0.6$)时, 振荡不收敛; 增益系数 $C_1=0.3$ 时, 迭代步数最少, 为 345 步。对比表 1 和表 2, 变增益系数(取 $C_2=1, C_1=0.3$)的迭代步数比固定增益系数 $\gamma=0.3$ 节省了 220 步, 收敛速率提高了 63.8%。

表 2 91 束光纤相干合成中, 变增益系数 γ 与迭代步数的关系

Table 2 Relations between variable gain coefficient γ and iteration step in CBC of 91 fiber lasers

C_1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
C_2	1	1	1	1	1
Step	610	345	425	690	Oscillation

当光束数目增加时, 收敛所需迭代步数增加, 评价函数 J 增长相对越慢, 这时 C_1 的选取就应适当减小, 如 C_1 从 7 束和 37 束时的 0.5 变为 91 束时的 0.3, 否则增益系数过大会导致振荡不收敛或收敛所需步数大大增加。

4.4 变增益系数控制方法在 100 束光纤相干合成中的应用

在固定增益($\gamma=0.3$)时, 如图 13 所示, 100 束光纤激光相干合成中, 迭代步数(以 $J>0.95$ 作为收敛判据)为 665 步。表 3 为固定增益系数分别选取 0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 时计算所得迭代步数。增益系数较小($\gamma=0.2$)时, 收敛较慢, 迭代步数为 875 步; 增益系数较大($\gamma=0.6$)时, 振荡不收敛; 增益系数 $\gamma=0.3、0.4、0.5$ 时, 迭代步数分别为 665、580 和 710 步。

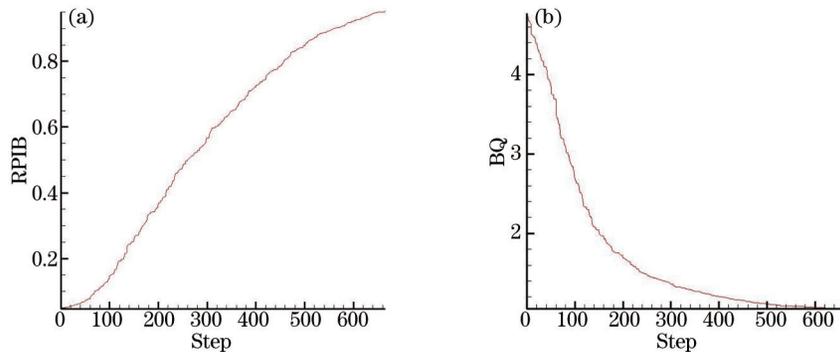


图 13 固定增益系数($\gamma=0.3$)时, SPGD 算法在 100 束相干合成中的控制结果。(a) RPIB 曲线; (b) BQ 曲线

Fig.13 Result of phase control in CBC of 100 fiber lasers based on SPGD algorithm with a fixed gain coefficient ($\gamma=0.3$).

(a) Curve of RPIB; (b) curve of BQ

表 3 100 束光纤相干合成中, 固定增益系数 γ 与迭代步数的关系

Table 3 Relations between fixed gain coefficient γ and iteration step in CBC of 100 fiber lasers

γ	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Step	875	665	580	710	Oscillation

图 14 为变增益系数 SPGD 算法取($C_2=1, C_1=0.3$)在 100 束光纤相干合成中的控制结果, 迭代步数(以 $J>0.95$ 作为收敛判据, $J=0.950469$)为 380 步, 光束质量由开环时的 BQ 为 4.93891 提高到闭环时的 BQ 为 1.05214。

表 4 为变增益系数中 C_1 分别选取 0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 时计算所得迭代步数。增益系数较小($C_1=0.2$)时, 收敛较慢, 迭代步数为 530 步; 增益系数较大($\gamma=0.6$)时, 振荡不收敛; 增益系数 $C_1=0.3$ 时, 迭代步数最少, 为 380 步。对比表 3 和表 4, 变增益系数(取 $C_2=1, C_1=0.3$)的迭代步数比固定增益系数 $\gamma=0.3$ 分别节省了 285 步, 收敛速率提高了 75.0%。

和 91 束相干合成类似, 当光束数目增加时, 收敛所需迭代步数增加, 评价函数 J 增长相对越慢, 这时 C_1 的选取就应适当减小, 如 C_1 从 7 束和 37 束时的 0.5 变为 100 束时的 0.3, 否则增益系数过大会导致振荡不收敛或收敛所需步数大大增加。

以控制上述 100 束光纤激光的相位为例, 假设控制带宽(即单纤的相位噪声功率谱频率特征值)为 4 kHz, 最大幅度为 ± 0.1 rad, 目标函数 $J>0.95$ 以 380 步达到收敛, 考虑到 SPGD 选择双向扰动, 则需要相位控制器的

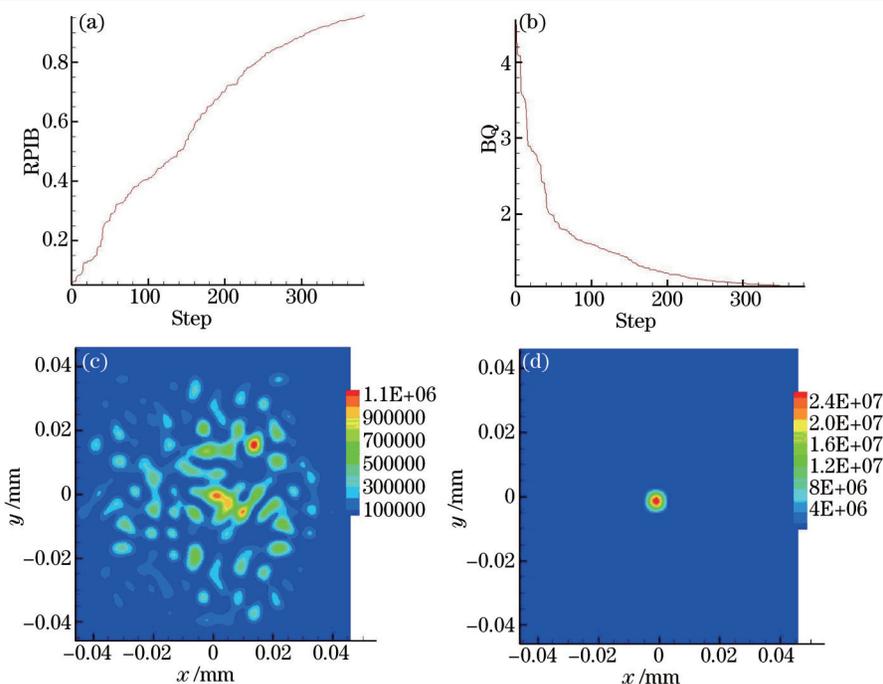


图 14 变增益系数 SPGD 时,算法在 100 束光纤相干合成中的控制结果。(a) RPIB 曲线; (b) BQ 曲线; (c) 迭代前的远场强度; (d) 迭代后的远场强度

Fig.14 Result of phase control in CBC of 100 fiber lasers based on SPGD algorithm with a variable gain coefficient.

(a) Curve of RPIB; (b) curve of BQ; (c) far field before iteration; (d) far field after iteration

表 4 100 束光纤相干合成中,变增益系数 γ 与迭代步数的关系

Table 4 Relations between variable gain coefficient γ and iteration step in CBC of 100 fiber lasers

	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
C_1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
C_2	1	1	1	1	1
Step	530	380	540	700	Oscillation

单次迭代速率(算法执行速度)为 2.969 MHz。

随着光纤放大器功率的增加,相位噪声功率谱的特征频率和幅值都会上升。假定控制带宽分别为 4 kHz 和 10 kHz,最大幅度为 ± 1.0 rad,如表 5 所示,对于 7 束光纤激光相干合成,使得评价函数 $J > 0.95$,则算法单次迭代速率分别须达到 288 kHz 和 720 kHz。考虑到控制带宽大小与算法执行速度成线性关系^[39-40],对于 100 束光纤激光的相位控制,使目标函数 $J > 0.95$,则需要相位控制器的单次迭代速率(算法执行速度)分别为 2.969 MHz 和 7.423 MHz。在实际情况下,往往伴随着环境噪声、风扇、机械振动引起的相位扰动,按照所需控制带宽为 100 kHz 估算,若使用改进的变增益系数 SPGD 算法控制 100 束,则算法的有效执行速度至少应为 74.230 MHz。

表 5 算法控制带宽与迭代速率的关系

Table 5 Relations between control bandwidth and iteration rates

Control band width	Iteration rate			
	7 beams	37 beams	91 beams	100 beams
4 kHz	288 kHz	1.758 MHz	2.696 MHz	2.969 MHz
10 kHz	720 kHz	4.395 MHz	6.740 MHz	7.423 MHz
100 kHz	7.012MHz	43.950 MHz	67.400MHz	74.230 MHz

5 结 论

将一种改进的变增益系数自适应 SPGD 控制方法应用到大阵列光纤激光相干合成中,计算了不同增益系数对算法收敛速度的影响程度。计算结果表明,在 7 束、37 束、91 束和 100 束光纤激光相干合成中,由于采

用了变增益系数的控制策略,相比于传统的固定增益系数SPGD算法,拥有收敛速度快、控制带宽高、适用于多光束光纤激光相干合成等优点,自适应SPGD算法相比于经典SPGD算法分别将收敛速度提高了约33.3%、37.8%、63.8%和75.0%,对于大阵列相干合成系统能够明显地提高控制带宽,并且阵列规模越大,这种优势越大。对于100束光纤激光相干合成,在算法单次迭代速率为74.230 MHz和相位噪声幅度为1.0 rad的情况下,控制带宽可达100 kHz量级,因此这种变增益系数的自适应SPGD算法具备向大阵列光束相干合成扩展的潜力。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 T Y Fan. Laser beam combining for high-power, high radiance sources[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2005, 11(3): 567-577.
- 3 J Marmo, H Injeyan, H Komine, *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements at Northrop Grumman[C]. *SPIE*, 2009: 719507.
- 4 J Anderegg, S Brosnan, E Cheung, *et al.*. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *SPIE*, 2006: 61020U.
- 5 S J Augst, J K Ranka, T Y Fan, *et al.*. Beam combining of ytterbium fiber amplifiers[J]. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24(8): 1707-1715.
- 6 T M Shay, V Benham, J T Baker, *et al.*. First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array[J]. *Optics Express*, 2006, 14(25): 12015-12021.
- 7 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.
- 8 He Bing, Lou Qihong, Wang Wei, *et al.*. Experimental demonstration of phase locking of a two-dimensional fiber laser array using a self-imaging resonator[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(25): 251115.
- 9 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,段开栉,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.
- 10 Zhou Pu, Wang Xiaolin, Ma Yanxing, *et al.*. Aperture filling—an important technique in coherent beam combining of fiber laser array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(2): 021401.
周 朴,王小林,马阎星,等.孔径填充—光纤激光阵列相干合成中的关键技术[J].*激光与光电子学进展*, 2010, 47(2): 021401.
- 11 He Bing, Zhou Jun, Liu Houkang, *et al.*. Study on characteristics of passive coherent beam combination with all-optical feedback loop[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0601001.
何 兵,周 军,刘厚康,等.复合环形腔被动相干合成技术重要特性研究[J].*中国激光*, 2013, 40(6): 0601001.
- 12 Mu Jie, Jing Feng, Wang Xiao, *et al.*. Error control of piston and tilt based on SPGD in coherent beam combination[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0602002.
母 杰,景 峰,王 逍,等.相干合成中基于SPGD算法的平移误差和倾斜误差控制[J].*中国激光*, 2014, 41(6): 0602002.
- 13 Su Rongtao, Zhou Pu, Ma Yanxing, *et al.*. Coherent beam combining of two nanosecond fiber pulse lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0102004.
粟荣涛,周 朴,马阎星,等.两路纳秒脉冲光纤激光相干合成的实验研究[J].*中国激光*, 2012, 39(1): 0102004.
- 14 S J Augst, T Y Fan, A Sanchez. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(5): 474-476.
- 15 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.
- 16 Huang Zhimeng, Zhang Dayong, Luo Yongquan, *et al.*. A new configuration for phase control in laser coherent combination utilizing liquid crystal optical modulator[J]. *Appl Phys B*, 2010, 101(3): 559-563.
- 17 Huang Zhimeng, Liu Cangli, Li Jianfeng, *et al.*. Numerical analysis of coherent combination for fiber lasers and application to beam steering[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(8): 1347-1352.
- 18 Huang Zhimeng, Luo Yongquan, Zhang Dayong, *et al.*. Transformation characteristic of phase and polarization in laser coherent combination[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(s1): 172-176.
黄智蒙,骆永全,张大勇,等.激光相干合成中的相位与偏振态变化特性[J].*中国激光*, 2010, 37(s1): 172-176.
- 19 Huang Zhimeng, Wang Haifeng, Ding Mingjun, *et al.*. Coherent combining of fiber laser and application to laser beam propagation through turbulence atmosphere[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(S7): 50-54.

- 黄智蒙, 王海峰, 丁明军, 等. 光纤激光相干合成及其在大气传输中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(S)7: 50-54.
- 20 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]. Opt Lett, 2011, 36(16): 3121-3123.
- 21 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.
- 22 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]. Opt Express, 2013, 21(21): 25045-25055.
- 23 Zheng Yi, Shen Feng. Research on phase-locking technique for 2-channels fiber laser coherent beam combination based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 631-635.
郑 轶, 沈 锋. 基于随机并行梯度下降算法的两路光纤激光相干合成锁相控制技术研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 631-635.
- 24 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.
- 25 G Mourou, B Brocklesby, T Tajima, *et al.*. The future is fibre accelerators[J]. Nat Photonics, 2013, 7(4): 258-261.
- 26 Huang Zhimeng, Liu Cangli, Li Jianfeng, *et al.*. A high-speed high-efficiency phase controller for coherent beam combining based on SPGD algorithm[J]. Quantum Electronics, 2014, 44(4): 301-305.
- 27 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.
- 28 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.
- 29 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.
- 30 A Flores, T M Shay, C A Lu, *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifiers in a kW regime[C]. CLEO, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper CFE3.
- 31 L Liu, D N Loizos, M A Vorontsov, *et al.*. Coherent combining of multiple beams with multi-dithering technique: 100 kHz closed-loop compensation demonstration[C]. SPIE, 2007, 6708: 67080D.
- 32 P Bourdon, V Jolivet, B Bennai, *et al.*. Coherent beam combining of fiber amplifier arrays and application to laser beam propagation through turbulent atmosphere[C]. SPIE, 2008, 6873: 687316.
- 33 V Jolivet, P Bourdon, B Bennai, *et al.*. Beam shaping of single-mode and multimode fiber amplifier arrays for propagation through atmospheric turbulence[J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 2009, 15(2): 257-268.
- 34 Ma Yanxing, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. Coherent beam combination with single frequency dithering technique [J]. Opt Lett, 2010, 35(9): 1308-1310.
- 35 Ma Yanxing, Wang Xiaolin, Leng Jinyong, *et al.*. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J]. Opt Lett, 2011, 36(6): 951-953.
- 36 Tang Xuan, Huang Zhimeng, Zhang Dayong, *et al.*. An active phase locking of multiple fiber channels via square wave dithering algorithm[J]. Opt Commun, 2014, 321: 198-204.
- 37 Huang Zhimeng, Tang Xuan, Wang Xiaojun, *et al.*. Phase locking of slab laser amplifiers via square wave dithering algorithm[J]. Appl Opt, 2014, 53(10): 2163-2169.
- 38 J Harriman, S Serati, J Stockley. Comparison of transmissive and reflective spatial light modulators for optical manipulation[C]. SPIE, 2005, 5930: 605-614.
- 39 Zhou Pu, Ma Yanxing, Wang Xiaolin, *et al.*. Dynamical simulation and control bandwidth analysis on coherent beam combining of fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2972-2977.
周 朴, 马 阎 星, 王 小 林, 等. 基于随机并行梯度下降算法光纤放大器相干合成的动态模拟与控制带宽分析[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2972-2977.
- 40 Luo Cheng, Su Rongtao, Wang Xiaolin, *et al.*. Adaptive stochastic parallel gradient descent algorithm and its application in coherent beam combining[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s101006.
罗 成, 粟 荣 涛, 王 小 林, 等. 自适应并行梯度随机下降算法及其在相干合成中的应用[J]. 光学学报, 2014, 34 (s1): s101006.