

基于随机并行梯度下降算法的相干合成 动态相差控制与带宽分析

张森^{1,2}, 张军伟², 母杰², 周忆¹, 王逍², 粟敬钦², 胡东霞²

¹重庆大学机械工程学院, 重庆 400030;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 分析随机并行梯度下降 (SPGD) 算法用于多路大型固体激光装置相干合成中校正动态相差的能力。首先介绍了 SPGD 算法实现相干合成的基本理论, 利用数值模拟方法对算法进行了优化, 实现了两路基于 SPGD 算法的波长为 800 nm、带宽为 30 fs 光束的相干合成实验, 验证了在外加 10, 15, 20, 25 Hz 动态相差条件下算法的特性, 并进一步模拟了动态活塞相差和指向性相差的校正过程, 分析了不同相位噪声强度和频率对校正能力的影响, 计算了控制带宽与光束路数、算法执行速度之间的关系。结果表明: 远场强度分布的平方和是高能短脉冲激光相干合成的最佳性能评价函数; 采用自适应增益的方式时, 在保证算法稳定性的前提下, 提高了算法的收敛速度; 随着相位噪声强度和频率的提高, 算法的有效控制带宽减小; 算法执行速度越快, 光束路数越少, 则算法控制带宽越大; 受限于器件性能, SPGD 算法不适用于 4 路以上带宽为 30 fs 激光阵列的相干合成。

关键词 激光光学; 相干合成; 随机并行梯度下降算法; 动态分析; 控制带宽

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0514003

Dynamical Phase Error Control and Bandwidth Analysis for Coherent Beam Combination Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Zhang Sen^{1,2}, Zhang Junwei², Mu Jie², Zhou Yi¹, Wang Xiao², Su Jingqin², Hu Dongxia²

¹College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The correction ability of dynamic phase error in coherent beam combination for multi-channel large solid laser device is analyzed by stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm. The fundamental theory of coherent beam combination by SPGD algorithm is introduced. The algorithm is optimized by numerical simulation method. Coherent beam combination of two beams with the wavelength of 800 nm and the bandwidth of 30 fs is experimentally achieved and the performances of SPGD algorithm under the 10, 15, 20, 25 Hz dynamic phase error conditions are tested. Moreover, the processes of dynamic piston and point phase error correction are simulated. The influence of phase noises with different intensities and frequencies on the correction ability is analyzed. The relationships among the control bandwidth, number of beams and iteration rate are computed. The results show that the quadratic sum of far-field intensity is the optimal performance evaluation function of coherent beam combination for high-power short-pulse laser. The adaptive gain can guarantee the stability and improve the convergence speed of the algorithm. The effective control bandwidth decreases with increasing intensity or frequency of phase noise, and increases with increasing iteration rate and decreasing of beam number. Limited by the performance of device, SPGD algorithm cannot be applied to the coherent beam combination for more than four beams laser array with the bandwidth of 30 fs.

Key words laser optics; coherent beam combination; stochastic parallel gradient descent algorithm; dynamic analysis; control bandwidth

OCIS codes 140.3298; 220.1000; 120.5050

收稿日期: 2017-11-13; 收到修改稿日期: 2017-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(61308040)

作者简介: 张森(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事光机电系统设计分析方面的研究。E-mail: zs2009071621@163.com

导师简介: 周忆(1957—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事精密机电系统设计与分析方面的研究。

E-mail: cdzy@cqu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

激光的相干合成是获取高功率、高质量光束的重要技术手段,通过控制激光束的相位使之相干增强叠加,从而获得极高的输出功率密度^[1-3]。目前国内外许多大型固体激光装置都规划实现多束激光的相干合成(如美国的 ARC(Advanced Radiographic Capability)计划^[4]、日本的激光快速点火实验(LFEX)^[5]、欧洲的高功率激光能量研究装置(HIPER)等^[6]),但是现在仍有许多难题限制着相干合成技术的发展^[2-3]。

光束相位的控制是相干合成中最重要且难度最大的一个技术环节,光束间的相位不一致将会严重影响相干合成的效果^[1-2,7]。按照相位控制方式,相干合成可分为主动相干合成^[7-10]和被动相干合成^[11-13]。在光纤相干合成中,常采用外差法^[7]、多抖动法^[10]和随机优化算法^[8-9]等主动相位控制方式来实现相干合成,其中随机并行梯度算法(SPGD)^[9,14-15]应用广泛并取得了良好的合成效果。Yang等^[16]提出了将SPGD算法应用于大型固体短脉冲激光装置相干合成的设想,母杰等^[17]对静态相差的校正和算法增益系数的优化进行了模拟,验证了其用于4路短脉冲激光相干合成的可行性。但是大型固体激光装置系统庞大、结构复杂,受真空机组、空调等振动源的影响,光路中的光学元件的位置和姿态会发生变化,所以算法需要校正的误差是动态的^[18]。此外,与只校正活塞相差的光纤激光相干合成不同,大型固体激光装置光束在传输过程中还会产生指向性误差,使激光束在空间上不能会聚到一点,需要同时控制活塞相差和指向性相差才能实现相干合成^[2]。随着光束路数和误差的增多,基于SPGD算法收敛至理想情形所需的迭代步数也越多。在大型固体激光装置中常采用高频运动的快速反射镜对相位误差进行校正,受器件的限制,SPGD算法的极限执行速度只有几百到几千赫兹。因此,SPGD算法用于多路大型固体激光装置光束动态相差控制的特性仍需探究。

对于SPGD算法,性能评价函数的选取也非常重要^[19-21],一些常用的SPGD性能评价函数对相干合成的影响也许并不相同,选取时也需要优化。因此,本文首先介绍了SPGD算法用于大型固体激光装置相干合成的基本原理,通过数值模拟对实际相干合成中的性能评价函数、增益系数等进行优化选取,然后进行了两路飞秒光束的相干合成实验,并在动态相差条件下进行了进一步实验探究,最后模拟

了动态相位噪声的校正过程,分析合成效果、控制带宽与相位噪声强度、频率之间的关系,分析算法的控制带宽与光束数目、算法执行速度之间的关系,以探讨SPGD算法用于多路大型固体激光装置相干合成的适用条件。

2 基本原理

2.1 相干合成

高功率激光装置中光束通常被整形为方形口径,在如图1所示的激光阵列中,在 x 方向两相邻光束的中心距为 d_x ,在 y 方向两相邻光束的中心距为 d_y ,其中一路脉冲的电场形式为

$$E(x, y, \omega) = \text{rect}\left(\frac{x}{D}, \frac{y}{D}\right) A(x, y) \times \exp[j\omega t - j\varphi(x, y, \omega)], \quad (1)$$

式中: $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数; $A(x, y)$ 和 $\varphi(x, y, \omega)$ 分别为激光束近场的振幅分布和相位分布; (x, y) 为空间坐标 D 为光束的口径; ω 为光谱的圆频率。根据夫琅禾费远场衍射理论,计算得到光束阵列相干合成后的远场复振幅分布为

$$E(u, v, t) = C \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{pq}(x - x_p, y - y_q, \omega) \times \exp\left\{-j \frac{\omega}{cf} [u(x - x_p) + v(y - y_q)]\right\} \times \exp(j\omega t) dx dy, \quad (2)$$

式中: $C = \frac{1}{j\lambda f} \exp\left(\frac{j\omega}{cf}\right) \exp\left[\frac{j\omega}{2cf}(u^2 + v^2)\right]$ 为系数因子, (u, v) 为远场的空间坐标; p 和 q 表示第 p 行、第 q 列的光束; (x_p, y_q) 为其中心坐标; P 和 Q 表示总共 $P \times Q$ 路光束; f 为焦距; c 为光速。相干合成后远场的光强分布为

$$I(u, v) = |E(u, v, t)|^2. \quad (3)$$

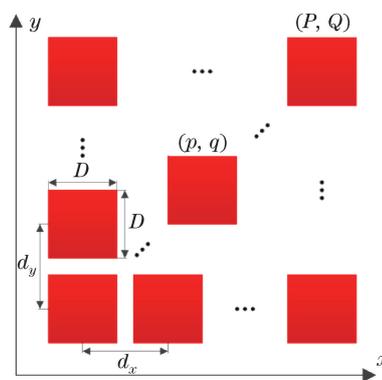


图1 阵列激光束示意图

Fig. 1 Schematic of laser beam array

2.2 SPGD 算法实现相干合成的原理

SPGD 算法是 Voronstov 等^[22] 在同时扰动随机近似 (SPSA) 算法的基础上提出的一种自适应光学技术, 近年来在自适应光学系统中得到了广泛应用。SPGD 算法是一种多维无约束最优化问题的数值计算方法, 也是一种盲优化方法, 它利用系统性能 (光束质量) 评价函数 J 的变化量和控制变量 u 的变化量进行控制参数的梯度估计, 最终使 J 达到唯一极值。利用 SPGD 算法实现多路短脉冲激光相干合成的原理如图 2 所示。将前端系统产生的整形脉冲输入到预放大系统, 脉冲经过预放大器提取能量后被分束元件分为多路脉冲。各路脉冲经过活塞误差和指向性误差调整镜后进入主放大器系统, 再次提取能量后输出千焦级的纳秒脉冲。放大后的脉冲通过共轭色散补偿元件将脉冲重新压缩回展宽前的脉冲宽度, 最终形成阵列光束。每束光束经过分光镜后被分成两部分: 一部分光束经聚焦系统聚焦, 实现相干合成输出; 另一部分光进入监测系统, 对相干合成的效果进行实时监测。探测器探测到的信号经模数 (A/D) 转换后输入到计算机中, 计算机上执行 SPGD 算法并将控制信号经数模 (D/A) 转换后施加给相差调整镜, 实现对活塞相差和指向性相差的动态控制。受限于器件的性能, 相差的极限校正频率为几百到几千赫兹。

差和指向性误差调整镜后进入主放大器系统, 再次提取能量后输出千焦级的纳秒脉冲。放大后的脉冲通过共轭色散补偿元件将脉冲重新压缩回展宽前的脉冲宽度, 最终形成阵列光束。每束光束经过分光镜后被分成两部分: 一部分光束经聚焦系统聚焦, 实现相干合成输出; 另一部分光进入监测系统, 对相干合成的效果进行实时监测。探测器探测到的信号经模数 (A/D) 转换后输入到计算机中, 计算机上执行 SPGD 算法并将控制信号经数模 (D/A) 转换后施加给相差调整镜, 实现对活塞相差和指向性相差的动态控制。受限于器件的性能, 相差的极限校正频率为几百到几千赫兹。

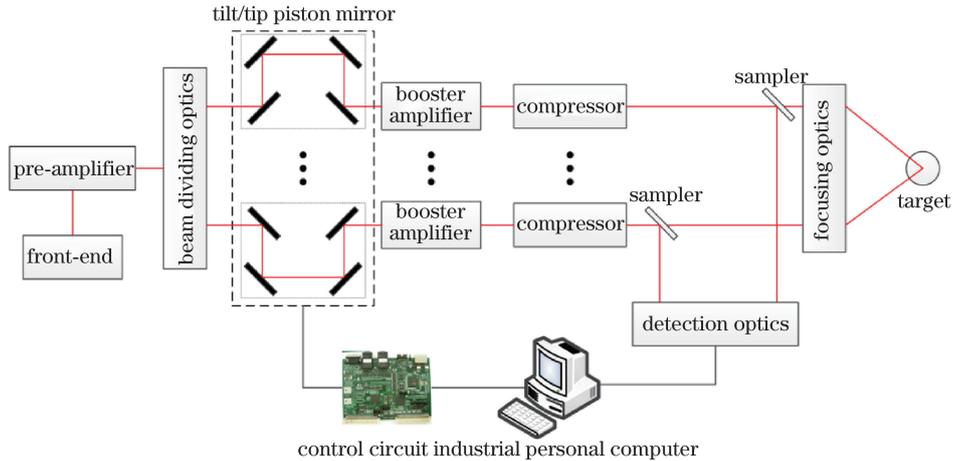


图 2 基于 SPGD 算法实现多路高能短脉冲激光相干合成的原理图

Fig. 2 Schematic for coherent beam combination of high-energy short-pulse laser based on SPGD algorithm

SPGD 算法实现的原理为: J 是 N 维控制变量 u 的函数, 即 $J = J[u_1, u_2, \dots, u_N]$, 第 k 次迭代时同时对所有控制变量施加正微扰电压 $\delta u^{(k)} = \{\delta u_j^{(k)}\}$ ($j=1, 2, \dots, N$), 各 $\delta u_j^{(k)}$ 相互独立且满足伯努利分布, 各分量幅值相等, $|\delta u_j^{(k)}| = \Delta$ (Δ 为扰动电压), 取正、负值的概率同为 50%, 则性能评价函数的变化量为

$$\delta J_+^{(k)} = J[u_1^{(k)} + \delta u_1^{(k)}, u_2^{(k)} + \delta u_2^{(k)}, \dots, u_N^{(k)} + \delta u_N^{(k)}] - J[u_1^{(k)}, u_2^{(k)}, \dots, u_N^{(k)}], \quad (4)$$

实际使用过程中, 采用施加双向扰动的方式以获得更精确的梯度估计值, 当施加负微扰电压时, 性能评价函数的变化量为

$$\delta J_-^{(k)} = J[u_1^{(k)} - \delta u_1^{(k)}, u_2^{(k)} - \delta u_2^{(k)}, \dots, u_N^{(k)} - \delta u_N^{(k)}] - J[u_1^{(k)}, u_2^{(k)}, \dots, u_N^{(k)}], \quad (5)$$

则最终得到第 k 次迭代得到的性能评价函数 J 的变化量为

$$\delta J^{(k)} = \delta J_+^{(k)} - \delta J_-^{(k)}. \quad (6)$$

控制变量的梯度估计为 $\delta J^{(k)} / \delta u^{(k)}$, 利用梯度下

降进行迭代, 则第 $k+1$ 次迭代时施加的电压信号为

$$u^{(k+1)} = u^{(k)} + \gamma \delta J^{(k)} / \delta u^{(k)}, \quad (7)$$

式中 γ 为增益系数。在实际应用中, 当 J 向极大方向优化时, γ 取正值; 反之, γ 取负值。SPGD 算法的计算过程如下 (第 k 次迭代时): 1) 生成随机扰动向量 $\delta u^{(k)}$; 2) 计算施加正微扰电压时性能评价函数的变化量 $\delta J_+^{(k)}$, 计算施加负微扰电压时性能评价函数的变化量 $\delta J_-^{(k)}$, 得到目标函数的变化量 $\delta J^{(k)}$; 3) 更新控制参数, 若性能评价函数不满足结束条件, 进行 $k+1$ 次迭代, 直到满足系统要求。通过 SPGD 算法施加扰动电压对活塞相差和指向性相差进行控制, 并计算相干合成性能评价函数 J 的变化量, 不断优化各路光束的相位条件, 直到 J 取得最优值。当 N 路激光相位一致时, 就能实现光束的相干合成输出。

3 参数的优化选取

SPGD 算法参数的选取决定了算法的收敛特性。不失一般性, 以两路成 1×2 排布的激光束为例说明

J 、 Δ 和 γ 对算法的影响。光束口径为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, $d_x=10\text{ mm}$, $d_y=0\text{ mm}$, 中心波长为 800 nm , 脉宽为 30 fs , 振幅分布均匀, 光束的初始活塞相差 $E_{\text{piston}}=[1.7403, -1.2232]$, x 方向上的指向性相差 $E_{\text{tilt}}=[-1.8126, 2.1693]$, y 方向上的指向性相差 $E_{\text{tip}}=[2.3816, -1.5230]$, 单位分别为 rad 、 μrad 和 μrad 。

3.1 性能评价函数

SPGD 算法中性能评价函数的选取是影响算法收敛速度和稳定性的重要因素之一。SPGD 算法主要采用的性能评价函数为

$$\begin{cases} J_1 = \iint I^2(x, y) dx dy \\ J_2 = \max[I(x, y)] / \max[I_0(x, y)] \\ J_3 = \iint I_0(x, y) I(x, y) dx dy \\ J_4 = \iint I^n(x, y) dx dy, n > 2 \\ J_5 = \iint_R I(x, y) dx dy \\ J_6 = \iint |I(x, y) - I_0(x, y)|^2 dx dy \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $I(x, y)$ 和 $I_0(x, y)$ 分别为实际光强分布和理想光强分布; R 表示积分圆的半径。以斯特列尔比 (SR, 即 J_2) 为标准, 评价 SPGD 算法使用不同性能评价函数时的相干合成的效果。对 1×2 排布的激光束相干合成的过程进行模拟, 暂定 $\Delta=0.3$, 固定增益, $n=3$, J_5 取一倍衍射极限内光强的分布。为了得到更合乎统计意义的结果, 将程序运行 200 次后取平均, 得到的不同性能评价函数下算法的收敛曲线如图 3 所示, 收敛后光束的相位分布和对应的远场分布分别如图 3 中 I 和 II 所示。从图中可以看出, 当使用 J_6 作为性能评价函数时, 不能使算法稳定收敛至理想状态, 因此 J_6 不宜作为 SPGD 算法实

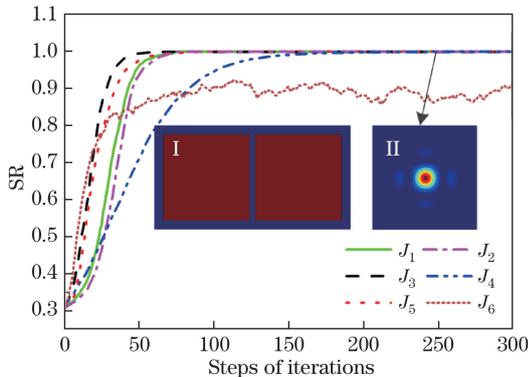


图 3 不同性能评价函数下算法的收敛曲线
Fig. 3 Convergence curves for different performance evaluation functions

现高能短脉冲激光相干合成的评价函数。为了定量分析, 以 SR 值为理想值的 80% 所需的迭代步数来衡量算法的收敛速度, 采用 $J_1 \sim J_5$ 算法的迭代步数分别为 37, 23, 27, 41, 63, 则 J_4 、 J_5 使算法的收敛速度相对较慢, 在实际应用中会影响相干合成的效果。而 $J_1 \sim J_3$ 均能使算法快速收敛到理想状态, 但是由于 $I_0(x, y)$ 在实际系统中不易得到, 所以 J_2 和 J_3 不实用, 通常只作为理论分析时的性能评价函数, 只有 J_1 可以作为实际实验中的性能评价函数。为了更符合实际, 本文采用 J_1 作为性能评价函数。

3.2 增益系数和扰动电压

在 SPGD 算法中, 扰动电压和增益系数的大小也是决定算法收敛速度和稳定性的重要因素。在实际情况下, 扰动电压不能太大也不能太小, 视具体使用条件而定。当扰动电压固定时, 增益系数越大, 算法收敛得越快, 但是容易收敛于局部极值; 而当增益系数越小, 算法收敛速度越慢。针对这一特性, Weyrauch 等^[23] 提出了一种增益系数的自适应更新方法, 以提高 SPGD 算法的收敛速度, 其表达式为

$$\begin{cases} \gamma^{(k+1)} = \gamma^{(k)} + \alpha[\gamma_0 - \gamma^{(k)}] + \epsilon \overline{H}_1^{(k)} \overline{H}_2^{(k)} \overline{H}_3^{(k)} \\ \overline{H}_1^{(k)} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^M |\text{sign}(\delta J_+^{(k-m)}) - \text{sign}(\delta J_+^{(k-m)})| \\ \overline{H}_2^{(k)} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^M |\delta J^{(k-m)}| \\ \overline{H}_3^{(k)} = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^M \sum_{l=1}^L |J^{(k-m)} - J^{(k-m-l)}| \end{cases}. \quad (9)$$

式中: $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数; α 和 ϵ 为常量; M 和 L 为计算时所取的步数。仍对 1×2 排布的激光束相干合成进行模拟, 仿真中各参量分别取值如下: $\alpha=0.5$, $\epsilon=6$, $\gamma_0=5$, $L=M=5$ 。取自适应增益与固定增益进行比较。将程序运行 200 次后取平均, 得到的结果如图 4 所示。自适应增益与固定增益时, 算法的迭代次数分别为 30 和 34。与固定增益相比, 自适应增益算法的收敛速度明显提高, 提高了 11.76%。图 4(b) 给出了自适应增益的前 75 次迭代增益的变化曲线, 自适应增益实现了初始迭代大增益、收敛时小增益的条件, 从而在保证算法稳定性的前提下提高了算法的收敛速度。

4 基于 SPGD 算法的两路合成实验

搭建了两路飞秒脉冲阵列光束相干合成的实验平台, 实验光路如图 5 所示, 实验中使用的光束中心波长为 800 nm , 脉宽为 30 fs 。光束 B1 通过分光镜

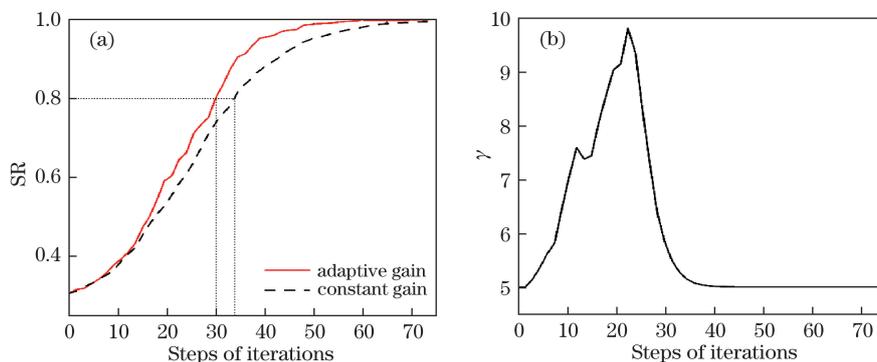


图 4 自适应增益与固定增益的比较。(a)算法收敛曲线;(b)自适应增益变化曲线

Fig. 4 Comparison of adaptive gain and constant gain. (a) Algorithm convergence curves; (b) adaptive gain variation curve

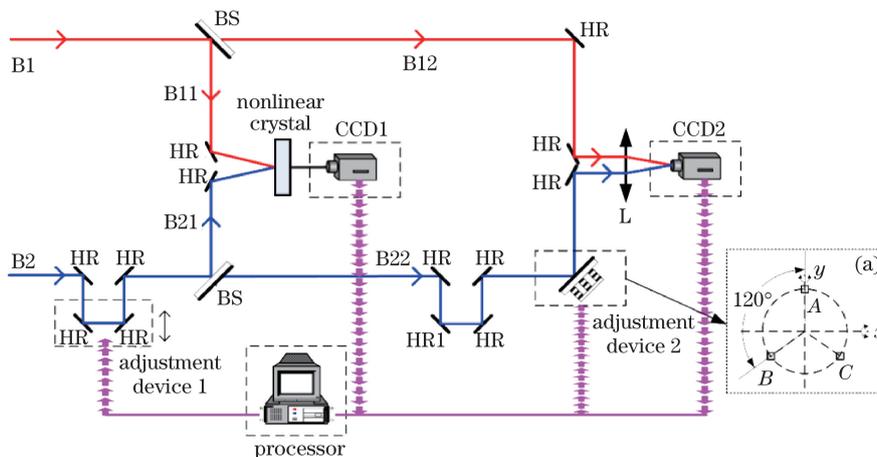


图 5 两路短脉冲激光相干合成实验光路图

Fig. 5 Schematic of coherent beam combination for two short laser pulses

BS后分为光束 B11 和光束 B12, 光束 B2 依次经过调整机构 1 和分光镜后分为光束 B21 和光束 B22。光束 B11 和光束 B21 组合为一组, 进入非线性晶体后产生时域互相关信号(非本文研究内容, 在这里不对其进行阐述), CCD1 采集到信号后通过调整机构 1 实现活塞相差的大动态范围探测与控制。光束 B21 和光束 B22 组合为一组, 光束 B22 通过调整机构 2 后与光束 B12 经过透镜 L 聚焦, 并进行相干合成。CCD2 采集到远场干涉焦斑, 并将其输入到信号处理单元, 信号处理单元提取到性能评价函数再将其输入到处理机中, 在处理机上执行 SPGD 算法并生成控制信号, 将控制信号施加到调整机构 2 上, 以对活塞相差和指向性相差进行补偿, 从而实现相干合成。调整机构 2 由 3 个呈 120° 分布的纳米驱动器支撑, 如图 5(a) 所示, 以同时实现活塞相差和指向性相差的调整。

图 6 给出了远场焦斑峰值光强在调整机构 2 闭环运行条件下的变化曲线。从图中可以看出, 开环时, 由于两光束在空间上并没有聚焦于同一目标点, 此时的远场峰值强度为其中一路光束的峰值强

度。闭环控制开启后, 两光束之间的活塞相差和指向性相差逐渐被补偿, 远场焦斑的峰值光强也逐渐增加。当算法收敛以后, 峰值光强逐渐稳定, 但是由于两光束间的活塞相差和指向性相差仍然在变化, 峰值强度存在一定的起伏。控制闭环关闭后, 两光束再次回到分开状态。图 6 表明采用 SPGD 算法实现两路短脉冲激光相干合成是可行的。

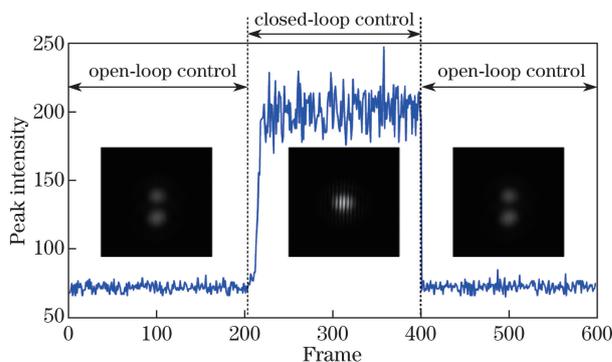


图 6 系统开闭环运行条件下远场焦斑峰值光强的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of peak intensity of far-field focal spot for open-loop and closed-loop states

为了进一步测试 SPGD 算法的控制性能,在 B2 光路中高反镜 HR1 处加入外加振动源,图 7 给出了施加 10,15,20,25 Hz 正弦扰动信号下系统开闭环运行的远场焦斑峰值光强的变化。从图中可以看出,系统闭环控制开启以后,远场焦斑的峰值光强较

系统开环状态下明显增加。随着外加扰动振动频率的增加,远场焦斑的峰值光强减弱,系统对活塞相差和指向性相差的控制效果下降,因此,为了提高系统控制动态误差的能力,当动态相差频率增大时,需要更进一步提高系统的控制带宽。

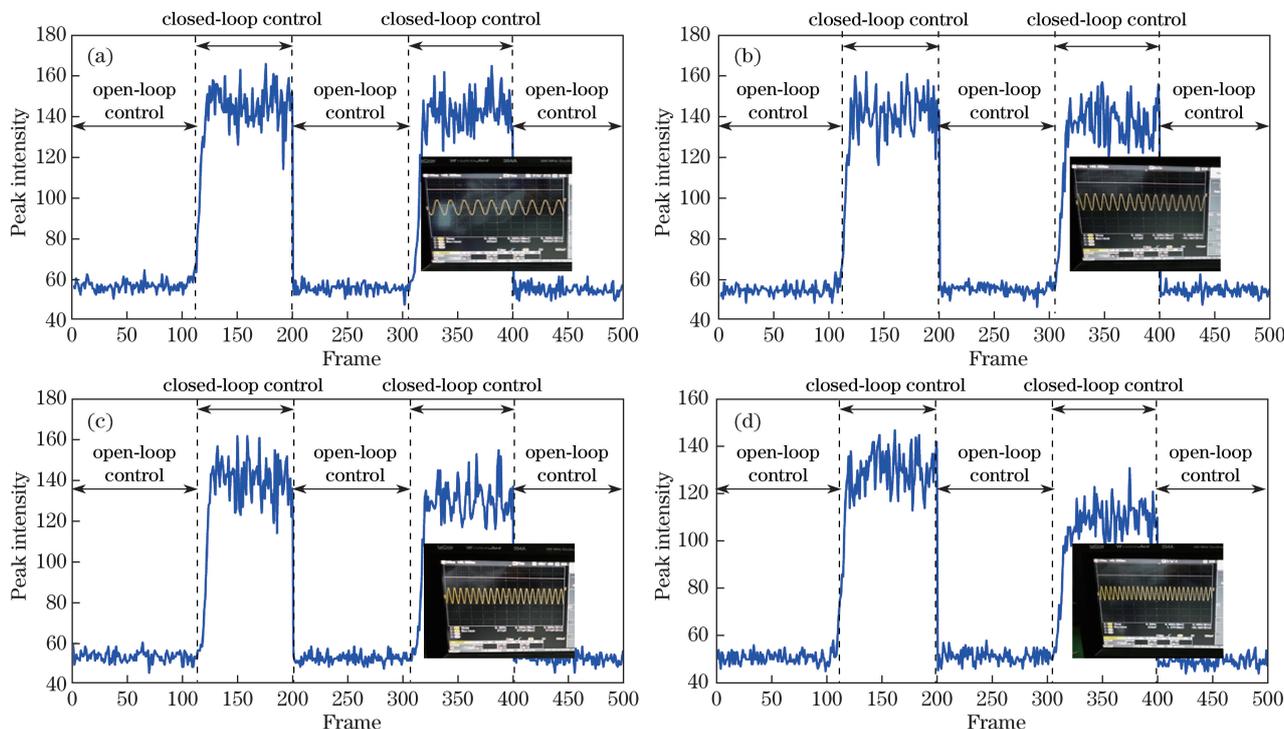


图 7 外加振动条件下的相干光束合成。(a) 10 Hz; (b) 15 Hz; (c) 20 Hz; (d) 25 Hz

Fig. 7 Coherent beam combination with external vibration conditions. (a) 10 Hz; (b) 15 Hz; (c) 20 Hz; (d) 25 Hz

5 控制特性仿真

5.1 动态相差的模拟校正

为了验证 SPGD 算法用于多路大型固体激光装置相干合成的有效性,对多路激光相干合成静态相差的校正过程进行了模拟。为不失一般性,模拟了 2,4,9 路阵列激光的相干合成。光束的参数与第 3 节中的参数一致, $d_x = d_y = 10$ mm。不同激光阵列的算法收敛曲线如图 8 所示。从图中可以看出,SPGD 算法能够有效地控制各路光束的静态相差,经多次迭代后实现了多路激光束的相干合成;随着合成路数的增加,算法的收敛速度降低;SPGD 算法校正 9 路激光阵列静态相差是渐进收敛的,收敛至理想状态的迭代次数大于 500 次。

在高功率固体激光装置中,光束会受到环境振动和温度变化等因素的影响,光束之间会产生动态相差,SPGD 算法能否在动态相差条件下实现相干合成是算法实现的关键。通过构造差分值服从高斯分布的随机序列来模拟动态相位噪声,动态相位噪

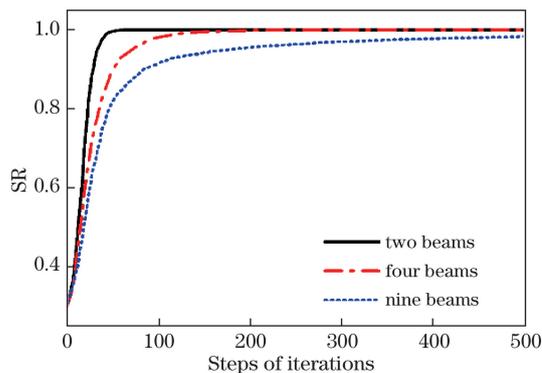


图 8 SPGD 算法校正不同激光阵列静态相差的收敛曲线
Fig. 8 Convergence curves for static phase error correction in different laser arrays by SPGD algorithm

声在 $\pm\delta$ 间随机取值(各单位与第 3 节中相同)。为不失一般性,假设算法的执行速度为 2 kHz,噪声频率为 100 Hz,模拟了 4 路、9 路阵列在动态相差条件下 SPGD 算法实现相干合成的过程。图 9(a)~(c) 分别为 δ 为 0.2,0.4,0.8 时 1 s 内算法的收敛曲线,得到的 4 路阵列 SR 的平均值分别为 0.9858, 0.9673,0.8895,9 路阵列 SR 的平均值分别为 0.9447,

0.8647, 0.4634。由图 9 可知, 当 $\delta=0.8$ 时, 9 路阵列不再收敛, δ 越小, 算法的收敛效果越好, 随着 δ 的

增大, 曲线的收敛性越来越差, 说明含有更多路数的激光阵列更易受到相位噪声的影响。

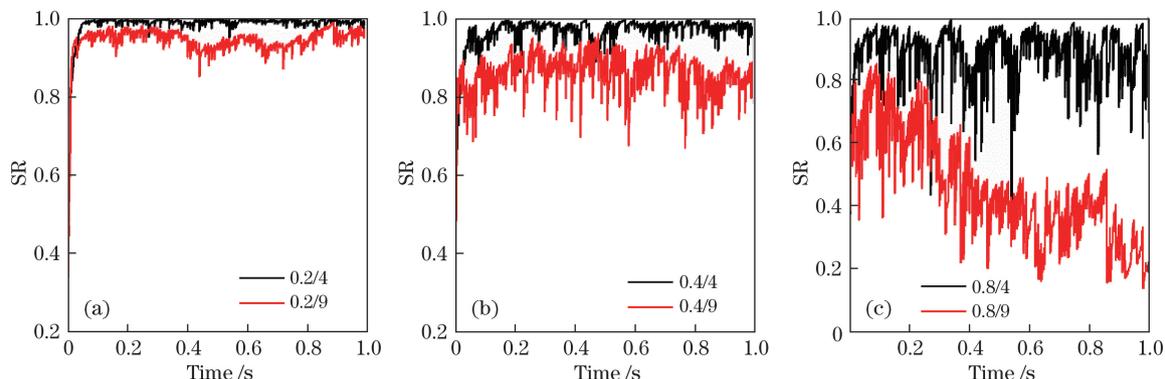


图 9 1 s 内 SPGD 算法校正 4 路、9 路激光阵列间动态相差的收敛曲线。(a) $\delta=0.2$; (b) $\delta=0.4$; (c) $\delta=0.8$
 Fig. 9 Convergence curves for dynamic phase error correction in four-beam and nine-beam laser arrays by SPGD algorithm for 1 s. (a) $\delta=0.2$; (b) $\delta=0.4$; (c) $\delta=0.8$

5.2 控制带宽与算法执行速度的关系

不同的执行速度对 SPGD 算法的收敛特性影响也较大, 图 10 给出了执行速度分别为 2 kHz 和 5 kHz 情况下, 采用 SPGD 算法校正动态相同时 4 路阵列光束的相干合成效果与噪声强度、频率之间的关系曲线。从图中可以看出, 随着噪声强度和频率的增加, SR 下降, 相干合成效果变差; 算法的执行速度越大, 相干合成效果就越好。为了便于定量分析, 对于特定的噪声强度, 取平均 SR 下降到理想值的 80% 时对应的噪声频率作为算法的有效控制带宽, 表 1 列出了算法对不同噪声强度的相位噪声在两种执行速度下的有效控制带宽。可以看出, 控制带宽与算法执行速度近似呈线性关系。

表 1 SPGD 算法控制带宽与执行速度之间的关系
 Table 1 Relationship between control bandwidth and iteration rate for SPGD algorithm

Iteration rate /kHz	Effective control bandwidth /Hz			
	$\delta=0.4$	$\delta=0.6$	$\delta=0.8$	$\delta=1.0$
2	584	313	193	88
5	1697	862	482	280

5.3 控制带宽与激光路数的关系

SPGD 算法的控制变量与激光路数呈线性关系, 激光路数越多, 算法收敛的速度越慢。图 11 给出了执行速度为 2 kHz 时, SPGD 算法校正动态相同时 2 路和 9 路阵列光束相干合成效果与噪声强度、频率之间的关系曲线。通过比较图 10 和图 11 可以看出, 在相同执行速度和噪声特性条件下, 激光路数越多, 相干合成的效果越差; 对于不同的噪声强度, 激光路数越多, 算法的有效控制带宽越

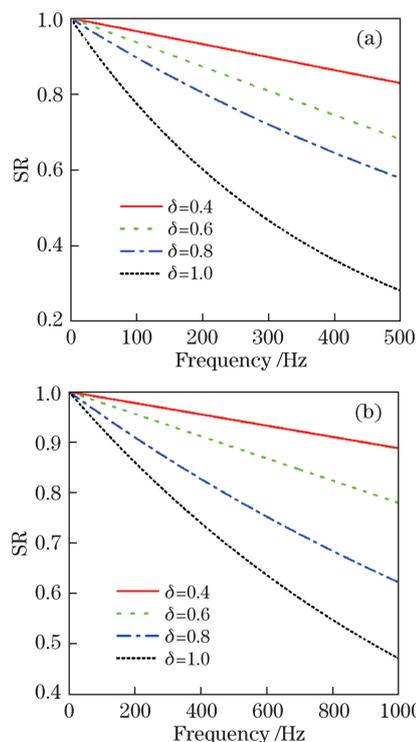


图 10 不同算法执行速度下相干合成效果与动态噪声特性的关系。
 (a) 执行速度为 2 kHz; (b) 执行速度为 5 kHz
 Fig. 10 Relationship between coherent combining effect and dynamic phase noise performance under different algorithm iteration rates. (a) Iteration rate is 2 kHz; (b) iteration rate is 5 kHz

小。对于 9 路阵列光束相干合成, 在动态噪声条件下 SPGD 算法的性能急剧下降。

6 结 论

光束间的动态活塞和指向性相差的有效校正是实现高能短脉冲激光相干合成的关键。探讨了

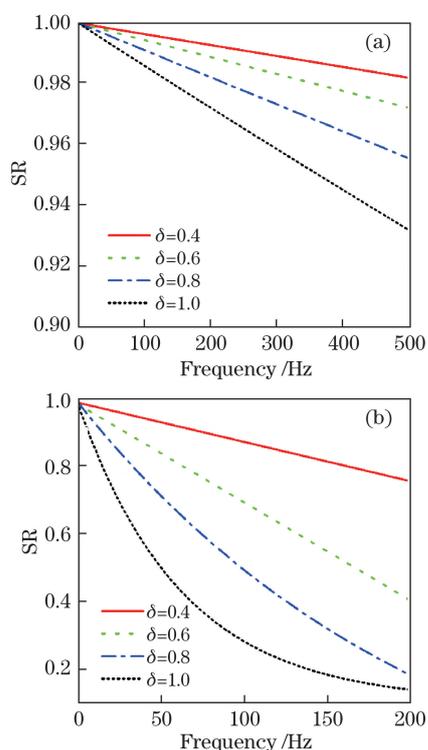


图 11 2 路和 9 路阵列光束相干合成效果与动态噪声特性的关系。(a) 2 路；(b) 9 路

Fig. 11 Relationship between coherent combining effect and dynamic phase noise for two beams and nine beams.

(a) Two beams; (b) nine beams

SPGD 算法用于多路飞秒激光相干合成的有效性。介绍了基于 SPGD 算法实现相干合成的原理,确定了算法用于相干合成时的最优性能评价函数和自适应增益系数,进行了两路脉宽为 30 fs 的光束在动态相差条件下的相干合成实验,分析了不同强度和频率的相位噪声对有效控制带宽的影响,以及激光路数、算法执行速度与控制带宽之间的关系。结果表明,SPGD 算法实现了两路 30 fs 激光阵列的相干合成;当相位噪声的强度和频率越大,算法执行速度越小,合成的路数越大,算法的有效控制带宽越小。对于 9 路阵列光束的相干合成,在算法执行速度为 2 kHz(现有条件很难实现)、噪声强度为 1 rad 或 1 μ rad 的情形下,算法的控制带宽在 14 Hz 左右;而对于大型激光装置,在环境振动等影响下,相位变化的频率在 25 Hz 左右^[24]。因此,要利用 SPGD 算法实现 4 路以上 30 fs 大型固体短脉冲激光装置中光束阵列的相干合成,需要进一步提高算法的执行速度。

参 考 文 献

[1] Zhao Z X, Gao Y Q, Cui Y, *et al.* Investigation of

phase effects of coherent beam combining for large-aperture ultrashort ultrahigh intensity laser systems[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(33): 9939-9948.

- [2] Leshchenko V E. Coherent combining efficiency in tiled and filled aperture approaches[J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15944-15970.
- [3] Leshchenko V E, Trunov V I, Frolov S A, *et al.* Coherent combining of multimillijoule parametric-amplified femtosecond pulses[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(9): 095301.
- [4] Homoelle D, Utterback E, Baker K L, *et al.* Phasing rectangular apertures[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19551.
- [5] Miyanaga N, Azechi H, Tanaka K A, *et al.* Technological challenge and activation of high-energy PW laser LFEX[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics-Pacific Rim*, 2007: 10020671.
- [6] Garrec B J L, Hernandez-Gomez C, Winstone T, *et al.* HiPER laser architecture principles[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 244: 032020.
- [7] Augst S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(5): 474-476.
- [8] Liu L, Vorontsov M A, Polnau E, *et al.* Adaptive phase-locked fiber array with wavefront phase tip-tilt compensation using piezoelectric fiber positioners[C]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6708: 6708OK.
- [9] Liu L, Vorontsov M A. Phase-locking of tiled fiber array using SPGD feedback controller[C]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5895: 138-146.
- [10] Shay T M, Benham V, Baker J T, *et al.* Self-synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 480-486.
- [11] Michaille L, Taylor D M, Bennett C R, *et al.* Characteristics of a Q-switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(1): 71-73.
- [12] Corcoran C J, Durville F. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(20): 201118.
- [13] Kong F, Liu L, Sanders C, *et al.* Phase locking of nanosecond pulses in a passively Q-switched two-element fiber laser array[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(15): 151110.
- [14] Zhou P, Liu Z, Wang X, *et al.* Coherent beam combining of two fiber amplifiers using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Optics and Laser Technology*, 2009, 41(7): 853-856.

- [15] Zhou P, Wang X, Ma Y, *et al.* Generation of a hollow beam by active phasing of a laser array using a stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Journal of Optics, 2010, 12(1): 015401.
- [16] Yang Y C, Luo H, Li F Q, *et al.* Coherent beam combination simulation of high-power solid state lasers using stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4): 875-880.
- [17] Mu J, Jing F, Wang X, *et al.* Error control of piston and tilt based on SPGD in coherent beam combination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0602002.
母杰, 景峰, 王道, 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.
- [18] Zhang J, Zhang S, Lin D, *et al.* Study on control strategy of structure stability for the Shenguang-III laser facility[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 120: 27-33.
- [19] Zhou P, Ma Y X, Wang X L, *et al.* Dynamical simulation and control bandwidth analysis on coherent beam combination of fiber amplifiers based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Chinese Journal of 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.
- [20] Chen B, Yang H Z, Zhang J B, *et al.* Performances index and convergence speed of parallel gradient descent algorithm in adaptive optics of point source[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1143-1148.
陈波, 杨慧珍, 张金宝, 等. 点目标成像自适应光学随机并行梯度下降算法性能指标与收敛速度 [J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1143-1148.
- [21] Yang H Z, Chen B, Li X Y, *et al.* Simulation and analysis of stochastic parallel gradient descent algorithm for adaptive optics system[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 28(8): 205-210.
杨慧珍, 陈波, 李新阳, 等. 自适应光学系统随机并行梯度下降控制算法实验研究 [J]. 光学学报, 2007, 28(8): 205-210.
- [22] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization[J]. Optics Letters, 1997, 22(12): 907-909.
- [23] Weyrauch T, Vorontsov M A, Bifano T G, *et al.* Microscale adaptive optics: wave-front control with a mu-mirror array and a vlsi stochastic gradient descent controller[J]. Applied Optics, 2001, 40(24): 4243-4253.
- [24] Li Z L, Wang X, Mu J, *et al.* High precision time jitter measurement for large multi-beam laser facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(11): 111001.
李志林, 王道, 母杰, 等. 大型激光装置束间同步抖动的高精度测量 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(11): 111001.