

基于随机并行梯度下降算法光纤激光相干合成的高精度相位控制系统^{*}

王小林[†] 周 朴 马阎星 马浩统 许晓军 刘泽金 赵伊君

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

(2009 年 1 月 2 日收到; 2009 年 5 月 15 日收到修改稿)

随机并行梯度下降 (SPGD) 算法是实现大功率主振荡功率放大器相干合成的有效手段之一. 分析了 SPGD 算法用于相干合成的基本原理, 设计了基于 SPGD 算法的相位控制系统, 给出了基于该 SPGD 控制器的相干合成实验结果. 理论分析表明, SPGD 算法控制器的迭代速率为 200 kHz, 对于两路相干合成的平均控制带宽大于 12.5 kHz, 最优控制精度可达 1/179 个波长. 实验表明, SPGD 控制器能够实现高速的相位控制. 在相位噪声幅度大于 1/10 个波长、频率为 3 kHz 的情况下, 有效地实现了两路激光的相位锁定, 相位残差控制在 1/25 个波长内.

关键词: 光纤激光, 相干合成, 随机并行梯度下降算法, 随机并行梯度下降控制器

PACC: 4225K, 4255N, 4290

1. 引 言

随着双包层光纤的制作工艺和包层抽运技术的发展, 目前单根单模连续波光纤激光器输出功率已经突破 10 kW 量级^[1]. 但是由于受到掺杂光纤热损伤、非线性效应等物理机理的限制, 单根光纤激光器的输出功率有限. 相干合成作为提高输出功率的有效手段, 能够同时保证光束质量, 近年来受到人们的广泛关注, 连续激光相干合成技术已有相当的发展^[2-8]. 国内外研究人员提出了多种相干合成技术, 如主振荡功率放大器 (MOPA) 技术^[9,10]、外腔耦合相干合成技术^[11,12]、多芯光纤自组织技术^[13,14]、全光纤耦合自组织技术^[15-17]等. 其中, 基于 MOPA 结构的主动相位控制方案是目前获得大功率相干合成输出的最有效手段^[18,19]. 在该方案中, 常用的主动相位控制方法主要有外差法^[9,10,18-20]、多抖动法^[21-23]和随机并行梯度下降 (SPGD) 法^[24-26]等. 对于 N 路光束的相干合成, 外差法需要种子光与各路信号光进行外差相干以实现相位检测, 光路调节难度大; 同时, 外差法需要 N 路外差信号探测器和 N 路信号处理电路, 相位检测

和控制技术复杂, 系统结构庞大. 多抖动法、SPGD 算法利用单个探测器实现相位检测, 相位检测和控制技术较为简单. 但是多抖动法需要 N 路调制信号和 N 路信号处理电路进行相位解调, 以实现系统的闭环控制, 控制策略复杂. 而基于 SPGD 算法的相干合成方案根据优化控制算法原理进行相位控制, 不需要进行精确的相位探测和解调, 控制策略简单、系统结构紧凑, 有望成为实用的相干合成方案^[27]. 美国马里兰大学 Liu 等^[24,25]和麻省理工学院的 Kansky 等^[26]先后实现了基于 SPGD 算法的多路光束相干合成, 并设计了相应的 SPGD 控制器. 其中, 基于计算机的 SPGD 控制器的迭代速率为 16 kHz, 平均控制带宽为 310 Hz^[24]; 改进的基于微处理器的 SPGD 控制器迭代速率为 95 kHz, 对 2π 幅度相移的补偿控制带宽约为 100 Hz^[25]. 本文中, 我们提出了基于 DSP 处理器和高速 AD、DA 转换器的 SPGD 控制器. 理论上, 对于两路相干合成, SPGD 控制器的算法迭代速率为 200 kHz, 平均控制带宽大于 12.5 kHz, 最优控制精度可达 1/179 个波长. 实验表明, SPGD 控制器能够实现高速相位控制, 在相位噪声幅度大于 1/10 个波长, 频率为 3 kHz 的情况下, 能够将两路相干合成的相位残差控制在 1/25 个

^{*} 国防科技大学优秀研究生创新基金 (批准号: B080702) 资助的课题.

[†] E-mail: wxllin@nudt.edu.cn

波长内.

2. 基于 SPGD 算法相干合成的原理

基于 SPGD 算法 MOPA 结构相干合成的系统如图 1 所示. 主振荡激光器输出的光束通过分束器后被分为多路, 每一路先后经过 LiNbO_3 相位调制器和光纤激光放大器. 相位调制器和光纤激光放大器分别起到相位控制和功率放大的作用, 放大器的后端接隔离器加以保护. 各路光束经过准直器后构成阵列光束, 阵列光束经过分光镜后被分成两路, 一路通过透镜成像后用 CCD 或红外相机观察远场干涉图样; 另一路经透镜聚焦并通过小孔后进入光电探测器, 光电探测器探测到的光强作为系统评价函数 (又称为判据) J . 其中, 光电探测器放置于透镜的后焦平面上, 小孔光阑紧贴于探测器前端放置, 光阑半径小于或等于理想相干合成情形下合成光束的主瓣宽度为宜^[25]. 探测器探测到的光强信号分别送入示波器和 SPGD 控制器的 AD 转换器. 示波器监测系统评价函数的时域变化; SPGD 控制器利用 AD 采样的数据, 根据 SPGD 算法原理, 对相位调制

器施加相应的控制信号, 从而实现相干合成.

在相干合成中, SPGD 算法的具体实现过程如下:

- 1) SPGD 控制器对相位调制器施加初始扰动电压, 取得当前系统评价函数 J ;
- 2) SPGD 控制器生成随机扰动向量 $\delta u = \{\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_n\}$, 各个 δu_i 相互独立且同为伯努利分布, 各分量幅值相等, 取正负值的概率同为 50%;
- 3) 将生成的随机扰动向量转换为电压信号 δu 施加到各个相位调制器上, 取得评价函数的值 $J^+ = J(u + \delta u)$, 然后施加反相的扰动电压 $-\delta u$, 取得负向扰动的评价函数 $J^- = J(u - \delta u)$;
- 4) 计算评价函数的变化量 $\delta J = (J^+ - J^-)/2$;
- 5) 根据式 $u^{(k+1)} = u^{(k)} + \gamma \delta u^{(k)} \delta J^{(k)}$ (其中 k 为迭代次数), 更新控制参数.

重复步骤 2)–5), 直至评价函数 J 取全局极大值, 相干合成效果达到最优. 在步骤 3) 中进行了正负两次扰动, 这即是所谓的双边扰动 SPGD 算法.

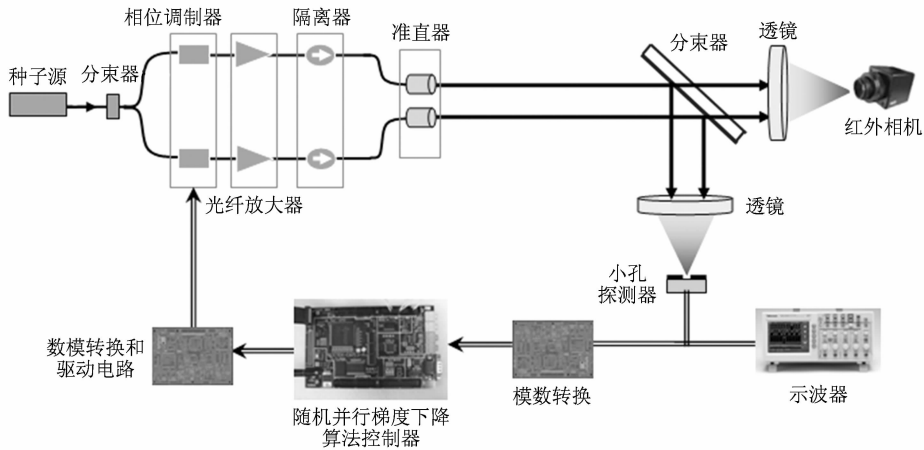


图 1 基于 SPGD 算法的 MOPA 结构相干合成

3. SPGD 控制器的设计与实现

3.1. SPGD 控制器的设计

在图 1 所示的相干合成中, 由于 SPGD 算法需要多次迭代才能得到最优值, SPGD 控制器的运算和处理速度决定了系统的控制带宽. 从某种意义上说, SPGD 控制器是基于 SPGD 算法相干合成的核心

和关键. 美国马里兰大学 Liu 等^[24,25]和麻省理工学院的 Kansky 等^[26]先后设计了基于计算机的 SPGD 控制器和基于 AVR 微处理器的 SPGD 控制器. 我们提出的用于光纤激光相干合成相位控制的 SPGD 控制器结构如图 2 所示, 系统由光电探测器、信号调理电路、高速 AD 转换器、DSP 控制器、多通道 DA 转换器、多通道电压放大器、相位调制器阵列等组成. 信号调理电路对光电探测器取得的光强信号进行放大、滤波等预处理; 高速 AD 转换器对调理后的光电

信号进行采样并送入 DSP 控制器; DSP 输出信号通过多路 DA 并经过电压放大器后施加到相位调制器上. DSP 作为 SPGD 算法控制器, 完成 SPGD 算法的主要工作: 产生随机扰动电压, 并通过 DA 转换器给相位调制器施加初始电压; 控制高速 AD 转换器对调理后的光电信号进行采样, 并将此信号作为 SPGD 算法的评价函数; 根据得到的评价函数和输出的扰动进行梯度估计, 更新扰动电压, 并通过 DA 控制相位调制器.

在图 2 所示的 SPGD 控制器中, 我们使用 TI 公司 32 位高速高精度浮点 DSP 芯片 TMS320C6713 作为 SPGD 算法控制器, TMS320C6713 的时钟主频为 200 MHz, 每秒可以执行 12 亿次浮点运算. AD 转换器使用 AD 公司的 8 位高速 AD 转换器 AD9283, 其采样率为 100 MSPS, 输入电压范围 0—1.25 V, 电压采样精度达 0.005 V. DA 转换器采用两片 AD 公司的 8 位 4 通道输出的 DA 转换器 AD7305, 单通道转换速率为 2 MHz, 不考虑其他延时, 系统对单个相位调制器的单次扰动时间约为 0.5 μ s; 两个 AD 芯片的 8 个独立 DA 转换输出能同时控制 8 路放大器的相位. 多路电压放大器采用 AD 公司的高速功率级放大器 OP37, 增益带宽积为 40 MHz, 输出电压范围为 -5—+5 V. 使用的 LiNbO₃ 相位调制器带宽大于 200 MHz, 半波电压为 3.5 V.

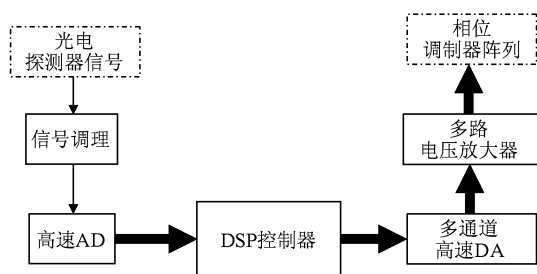


图 2 SPGD 控制结构

3. 2. SPGD 控制器的性能分析

首先讨论相位控制精度. 理论上, 系统的相位控制精度由 AD 转换器的采样精度、SPGD 算法的控制参数和 DA 转换器精度共同决定. 对于两路合成时, 假设单路激光光强转换得到的光电压为 0.3125 V. 那么在理想相干合成 (两路激光相位差为零) 时, 处于主瓣处的探测器电压为 AD 转换器最大输入电压 1.25 V; 当两路光相位差为 π 时, 处于主瓣处的探测器电压为零, 可知 AD 采样对相位响应精

度约为 $1/81.5$ 个波长. 采用的 8 位 DA 转换器输出电压范围为 -5—+5 V, 电压控制精度为 0.039 V, 由于相位调制器的半波电压为 3.5 V, 相位控制精度可达 $1/179$ 波长. 理论上, 8 位 AD 和 DA 的对相位的采样和控制精度已经足够高; 实际上, 系统控制精度还与 SPGD 算法的控制参数 (微扰电压 δu 、迭代步长 γ) 有关. 这是因为相邻两次控制中输出的电压并不是按照 DA 转换精度步进, 而是根据判断和扰动幅度计算得到的电压变化大小 $\Delta u = \gamma \delta u^{(k)} \delta J^{(k)}$ 步进, 如果控制电压步进值 Δu 大于 DA 转换的分辨率, 那么实际相位控制精度为 $\frac{\pi}{V_{\pi}} \Delta u$ (用波长计算可表示为 $d\varphi_c = \frac{\Delta u}{2V_{\pi}} \lambda$), 其中 V_{π} 为相位调制器的半波电压.

系统的有效控制带宽由 SPGD 控制器的处理速度、相干合成路数共同决定. 根据第 2 节 2) 讨论的 SPGD 算法执行流程, 我们将系统中可能存在的延时分为 3 个部分:

- 1) 数据采集延时 t_1 , 包括光电探测器、信号调理电路、AD 采样、数据缓冲器、电平转换电路的延时;
- 2) DSP 数据处理延时 t_2 , 包括读取 AD 采样数据并处理、生成扰动信号时间;
- 3) 单次施加相位扰动延时 t_3 , 包括数据缓冲器、电平转换电路、DA 转换器、电压放大器和相位调制器的延时.

对于基于双边扰动 SPGD 算法的 N 路相干合成, 由于对各个相位调制器的扰动本质上是串行的, 单次迭代需要的时间为

$$T_0 = t_1 + t_2 + 2Nt_3, \quad (1)$$

假设一次迭代需要的迭代步数为 k , 那么从开始运行到算法收敛需要时间为

$$T_0 = k(t_1 + t_2 + 2Nt_3), \quad (2)$$

系统控制带宽为

$$F_{CB} = \frac{1}{k(t_1 + t_2 + 2Nt_3)}. \quad (3)$$

在运用 SPGD 控制器进行两路相干合成时, 数据采集部分延时 $t_1 < 100$ ns, DSP 数据处理部分延时 $t_2 < 500$ ns, 单次施加相位扰动延时 t_3 约为 1 μ s. 完成一次迭代需要时间 $T_0 = t_1 + t_2 + 4t_3 < 4.6$ μ s, 取单次迭代时间为 5 μ s, 迭代速率为 200 kHz.

Vorontsov 等^[28] 分析表明, 通过优化参数, SPGD 算法平均迭代步数在相位控制路数的 5—8

倍左右. 在两路相干合成中,取平均迭代步数为合成路数的 8 倍,算法在 16 步迭代后收敛,大约需要时间 $T_0 = 80 \mu\text{s}$ 左右. 理论上,系统平均控制带宽约为 $F_{\text{CB}} = 12.5 \text{ kHz}$.

4. 基于 SPGD 控制器的相干合成实验

利用上述的 SPGD 控制器,我们先后进行了两路 1 W 量级、两路 10 W 量级、三路 1 W 量级无湍流短距离条件下的相干合成实验,两路 1 W 量级长距离湍流环境下的相干合成实验,并实现了 200 W 量级大抽运条件下光纤放大器与种子源的相位锁定.

下面给出两个典型的实验结果.

4.1. 三路瓦量级相干合成实验

三路相干合成实验原理与图 1 类似,实验中三个放大器的输出准直器成品字形排列. 图 3 给出了探测器探测到的小孔光强随时间变化和对应的长曝光干涉光斑图样. 其中,图 3(a)是开环时情形;图 3(b)是闭环时情形. 实验结果表明,在 SPGD 控制器闭环工作时,长曝光图样的条纹对比度从开环时接近于 0 提高到了闭环时的 0.85,小孔平均能量(已归一化)从开环时 3.09 增加到闭环时 8.10,提高了 2.62 倍,合成效率达 87%^[29].

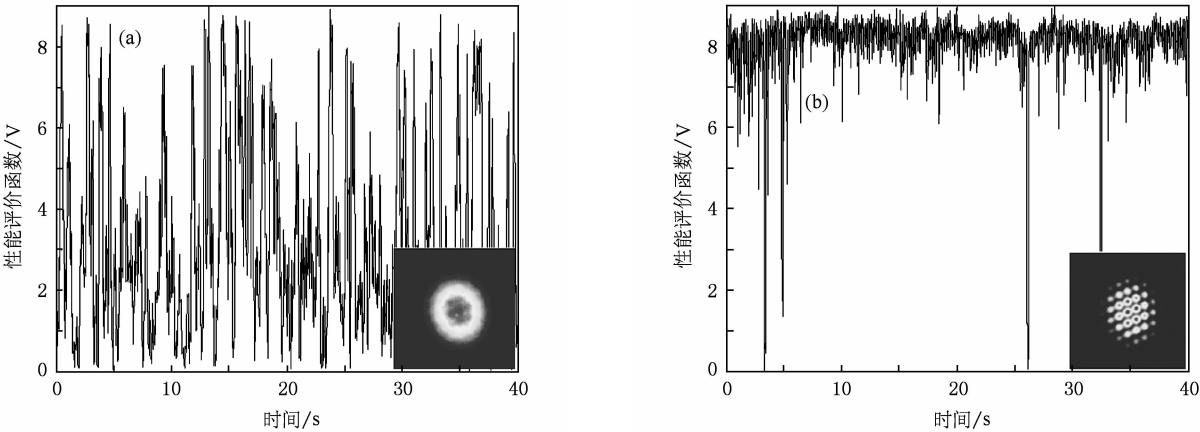


图 3 三路相干合成实验判据 J 的时域特性和对应的长曝光图 (a)开环, (b)闭环

4.2. 百瓦量级大抽运光纤放大器与种子源锁相

实验原理如图 4 所示,种子光分成两束,一束通

过相位调制器后利用多级放大器进行放大,另一束直接进入准直器. 耦合透镜将放大器输出光的一部分耦合到准直器中,与种子光分出的另一束进行干

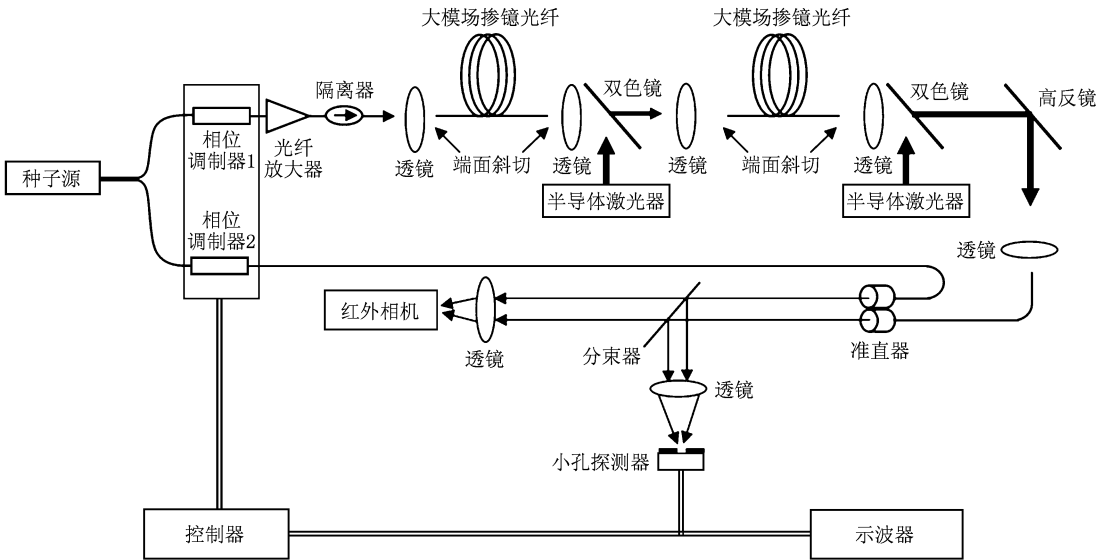


图 4 百瓦量级大抽运光纤放大器与种子源锁相

涉. 利用红外相机观察远场光斑图样,利用探测器测量得到的通过小孔后的主瓣能量作为评价函数.

实验中,我们首先利用多抖动法测量了多级放大器的相位噪声. 图 5 是抽运为 181 W 时的相位噪声特性,其中图 5 (a) 为相位噪声的时域特性,图 5 (b) 是相位噪声的频谱分布,图 5 (c) 是相位噪声的结构函数. 从测量结果来看,在抽运 181 W 时,大于

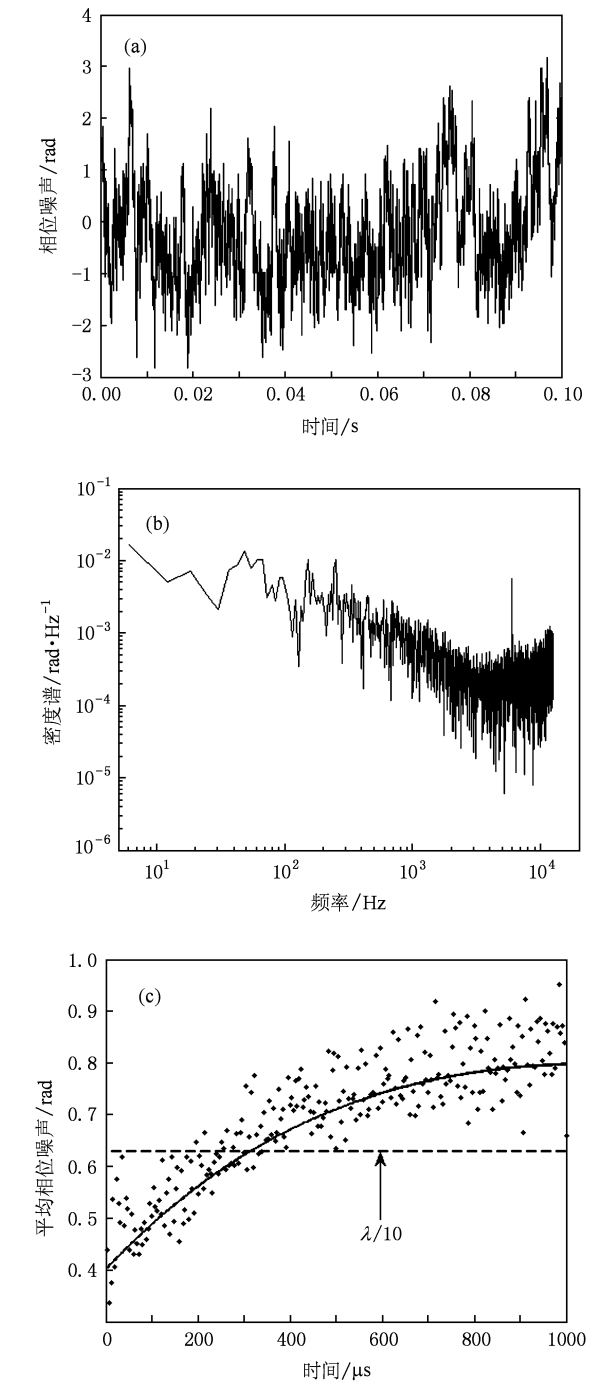


图 5 181 W 抽运时的相位噪声特性分析 (a) 相位噪声时域特性, (b) 相位噪声功率谱, (c) 相位噪声结构函数

1/10 个波长幅度的相位噪声频率为 3.1 kHz. 由于实验中力求在降低了激光输出(输出激光功率为小于 20 W)的同时增加抽运光功率,以使大部分抽运光以热量的形式转移到光纤中,因此相位噪声频率较高.

在抽运功率为 181 W 时,利用 SPGD 控制器有效地实现了放大器和种子源的相位锁定. 其中控制参数 $\gamma=0.25, \delta u_i=0.3$, 由于实验中 $\delta J^{(k)} < 1.25 \text{ V}$, $\Delta u = \gamma \delta u^{(k)} \delta J^{(k)} < 0.25 \times 0.3 \times 1.25 = 0.09375$, 根据 3.2 节分析, 相位控制精度约为 $d\varphi_c = \frac{\Delta u}{2V_\pi} \lambda < \frac{0.09375}{7} \lambda = \frac{1}{74.67} \lambda$, 即系统的理论相位控制精度小于 1/74.67 个波长. 实验得到锁相后测得的相位残差如图 6 所示. 由图可知, 实际相位残差控制精度小于 1/25 个波长. 图 7 给出了锁相前后干涉图样, 计算结果表明, 闭环情况下激光峰值功率提高了 1.57 倍, 条纹对比度达到了 0.56.

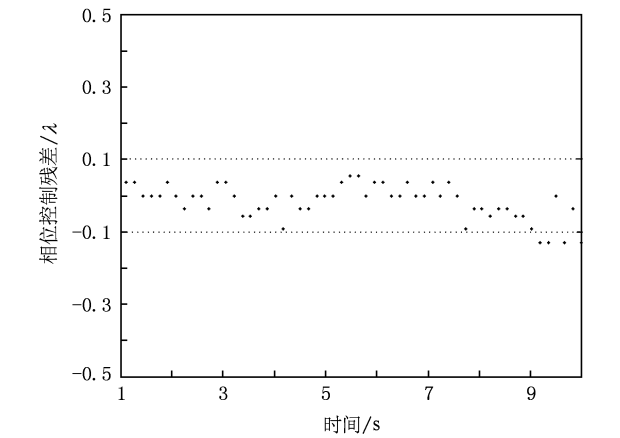


图 6 系统闭环时相位控制残差 时间尺度 10 s

5. 结 论

针对基于 MOPA 结构的大功率光纤激光/放大器相干合成, 分析了 SPGD 算法用于相干合成的基本原理, 设计了基于 SPGD 算法的控制电路, 并进行了基于该 SPGD 控制器的相干合成实验. 理论分析表明, SPGD 算法控制的迭代速率为 200 kHz, 平均控制带宽大于 12.5 kHz, 最优控制精度可达 1/179 个波长. 实验表明, SPGD 控制器能够实现高速的相位控制, 在相位噪声频率为 3 kHz 时, 能够将两路相干合成的相位残差控制在 1/25 个波长内. 由于

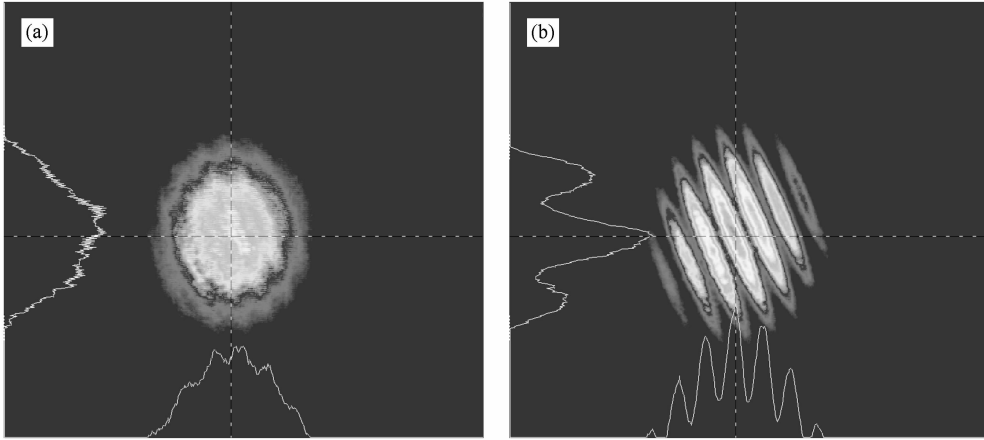


图7 锁相前后远场干涉图样 (a)开环, (b)闭环

SPGD 控制器的最初设计时更多考虑了结构简单, 采用了两片较低速的 DA 转换器 AD7305, 考虑辅助器件延时, 单路转换时间约为 $1\ \mu\text{s}$, 相对较慢; 随着合成路数的增加, 迭代步数逐渐增加, 系统控制带宽逐渐减小. 为了提高系统的控制带宽, 必须降低单次扰动时间, 具体来说, 可以采用以下改进措施: 1) 采用多路高速的 DA 转换器 (如 100 MHz 的 AD7805) 替代低速的 AD 转换器, 同时选择高速 (100 MHz 以上的) 的辅助器件, 减少系统单次迭代

的时间; 2) 采用多个 DSP 或者高密度 FPGA 进行并行处理, 对多个相位调制器同时进行相位扰动, 力争使得系统单次迭代的时间等于串行处理时对一个相位调制器的扰动时间, 即 $T_0 = t_1 + t_2 + 2t_3$, 这样有可能实现单次迭代的速率与相干合成路数无关. 相关的技术方案正在研究中.

感谢兵器装备研究院大功率光纤激光实验室主任李伟教授, 实验室工作人员陈曦、纪帆、杨宁、杨超等提供的大功率光纤激光平台和在实验中给予的大力支持和帮助.

- [1] http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR_Final_10 kW_SM_laser.pdf
- [2] Xiao R, Zhou P, Hou J, Jiang Z F, Liu M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 819 (in Chinese) [肖 瑞、周 朴、侯 静、姜宗福、刘 明 2007 物理学报 **56** 819]
- [3] Xiao R, Hou J, Jiang Z F, Liu M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6464 (in Chinese) [肖 瑞、侯 静、姜宗福、刘 明 2006 物理学报 **55** 6464]
- [4] Wang J M, Duan K L, Wang Y S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5627 (in Chinese) [王 建明、段开棕、王屹山 2008 物理学报 **57** 5627]
- [5] Augst S J, Ranka J K, Fan T Y, Sanchez A 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1707
- [6] Hans B, Cris J D, Mangir M S 2005 *Opt. Lett.* **30** 1339
- [7] Li L, Schülzgen A, Li H, Temyanko V L, Moloney J V, Peyghambarian N 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1721
- [8] He B, Lou Q H, Zhou J, Zheng Y H, Xue D, Dong J X, Wei Y R, Zhang F P, Qi Y F, Zhu J Q, Li J Y, Li S Y, Wang Z J 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 412
- [9] Anderegg J, Brosnan S, Cheung E, EPP P, Hammons D, Komine H, Weber M, Wickham M 2006 *Proc. SPIE* **6102** 61020U
- [10] Xiao R, Hou J, Liu M, Jiang Z F 2008 *Opt. Express* **16** 2015
- [11] Corcoarn C J, Durville F 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 201118
- [12] Liu L, Zhou Y, Kong K, Chen Y C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4837
- [13] Cheo P K, Liu A, King G G 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 439
- [14] Bochove E J, Cheo P K, King G G 2003 *Opt. Lett.* **28** 1200
- [15] Shirakawa A, Saitou T, Sekiguchi T, Ueda K 2002 *Opt. Express* **10** 1167
- [16] Pu Z, Cheng Z L, Wang X L, Li X, Liu Z J, Xu X J, Hou J, Jiang Z F 2008 *Chin. Opt. Lett.* **6** 523
- [17] Zhou P, Wang X L, Chen Z L, Li X, Liu Z J, Xu X J 2008 *Electron. Lett.* **6** 523
- [18] Shay T M, Benham V, Baker J T, Sanchez A D, Pilkington D, Lu C A 2007 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **13** 480
- [19] Goodno G D, Komine H, McNaught S J 2006 *Opt. Lett.* **31** 1247
- [20] Cheung E C, Ho J G, Goodno G D 2008 *Opt. Lett.* **33** 354
- [21] Augst S J, Fan T Y, Sanchez A 2004 *Opt. Lett.* **29** 474
- [22] Shay T M, Benham V, Baker J T 2006 *Opt. Express* **14** 12022
- [23] Shay T M, Benham V, Baker J T 2007 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **13** 480

[24]

Liu L, Vorontsov M A 2005 *Proc. SPIE* **5895** 58950P

[25]

Liu L, Vorontsov M A, Polnau E 2007 *Proc. SPIE* **6708** 67080K

[26]

Kansky J E, Yu C X, Murphy D V, Shaw S E J, Lawrence R C, Higgs C 2006 *Proc. SPIE* **6306** 63060G

[27]

Vorontsov M 2005 *Proc. SPIE* **5895** 589501

[28]

Vorontsov M A, Carhart W, Ricklin J C 1997 *Opt. Lett.* **22** 907

[29]

Zhou P, Liu Z J, Wang X L, Ma Y X, Li X, Xu X J, Guo S F 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 044202

High precision phase control system in coherent combining of fiber laser based on stochastic parallel gradient descent algorithm^{*}

Wang Xiao-Lin[†] Zhou Pu Ma Yan-Xing Ma Hao-Tong Xu Xiao-Jun Liu Ze-Jin Zhao Yi-Jun
(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)
(Received 2 January 2009; revised manuscript received 15 May 2009)

Abstract

Stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is one of the effective ways to realize high power fiber laser coherent combining of master oscillator power amplifier. The basic principle of the SPGD algorithm in the coherent combining is introduced, the SPGD phase controller has been designed and manufactured, and the representative experiment results are presented. Theoretical analysis shows that the iteration rate is 200000 per second, the average compensation bandwidth is about 12500 Hz, the minimal phase control error is 1/179 wavelength. Experiment shows that the SPGD controller can perform well in phase locking of two lasers, the average phase residual error is less than 1/25 wavelength when the amplitude of the phase noise is greater than $\lambda/10$, and the frequency is 3 kHz.

Keywords: fiber laser, coherent combining, stochastic parallel gradient descent algorithm, stochastic parallel gradient descent controller
PACC: 4225K, 4255N, 4290

^{*} Project supported by the Innovation Foundation for Graduates in National University of Defense Technology, China (Grant No. B080702).
[†] E-mail: wxllin@nudt.edu.cn