

基于随机并行梯度下降算法的脉冲光纤放大器时域特性调控

蒋敏^{1,2,3}, 粟荣涛^{1,2,3*}, 王小林^{1,2,3}, 周朴^{1,2,3}

¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073;

²高功率光纤激光湖南省协同创新中心, 湖南长沙 410073;

³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410073

摘要 提出了一种调控脉冲光纤放大器时域特性的新方法。根据光纤放大器中脉冲时域波形畸变的基本原理以及实际应用中输出脉冲的具体要求,采用随机并行梯度下降(SPGD)算法获取生成目标输出脉冲所需要的最优输入脉冲。通过数值仿真,实现了多种指定脉冲的输出,证明了所提方法的有效性。利用SPGD算法可不断改变输入脉冲,使光纤放大器的真实输出逼近目标输出,该控制策略简单且输出脉冲收敛迅速。利用该方法获取直线边界脉冲(如矩形、M型和三角型脉冲)和曲线边界脉冲(如抛物线型和椭圆型脉冲)时均取得较好的效果,因此该方法适用于多种类型目标脉冲的生成。

关键词 光纤光学; 随机并行梯度下降算法; 光纤放大器; 脉冲整形; 时域特性调控; 增益饱和效应; 脉冲畸变

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.030604

Time-Domain Characteristic Regulation of Pulse Fiber Amplifier Based on Stochastic Parallel Gradient Descent Algorithm

Jiang Min^{1,2,3}, Su Rongtao^{1,2,3}, Wang Xiaolin^{1,2,3}, Zhou Pu^{1,2,3}

¹College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²Hunan Provincial Collaborative Innovation Center of High Power Fiber Laser, Changsha, Hunan 410073, China;

³Hunan Provincial Key Laboratory of High Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract A new method for regulating the time-domain characteristics of pulse fiber amplifier is proposed. According to the basic principle of pulse time-domain waveform distortion in fiber amplifier and the specific requirement in practical application of output pulse, the optimum input pulse required to generate target output pulse is obtained by the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm. Several particular output pulses can be generated in numerical simulation, which proves the effectiveness of the proposed method. The input pulse can be changed continually when we use the SPGD algorithm, so that the practical output of fiber amplifier comes close to the target output. The control strategy is easy and the output pulse converges rapidly. Good results can be achieved with the proposed method when we generate the pulses with linear boundaries such as rectangular, M-shaped and triangle pulses, or generate the pulses with curved boundaries such as parabola and ellipse pulses, and the proposed method can be widely applied to generating variety types of target pulses.

Key words fiber optics; stochastic parallel gradient descent algorithm; fiber amplifier; pulse shaping; time-domain characteristic regulation; gain saturation effect; pulse distortion

OCIS codes 060.2310; 320.5540; 140.3280; 140.3538

收稿日期: 2016-10-24; 收到修改稿日期: 2016-11-14

作者简介: 蒋敏(1994—),女,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光技术方面的研究。E-mail: jiangmin_oe@163.com

导师简介: 周朴(1984—),男,博士,研究员,主要从事高功率光纤激光与光束合成技术方面的研究。

E-mail: zhoupu203@163.com

* 通信联系人。E-mail: surongtao@126.com

1 引言

近年来,基于稀土掺杂光纤主振荡功率放大(MOPA)结构的脉冲光纤激光器在微加工、医疗和科学与工程等领域得到了广泛应用^[1-4]。MOPA结构由低功率的种子激光以及一级或多级级联功率放大器组成,可得到高脉冲能量的激光输出。但由于高功率放大器系统存在增益饱和效应,功率放大过程中的脉冲前沿增益大、后沿增益小,导致脉冲波形发生畸变。脉冲波形畸变会影响脉冲在某些领域的应用效果,特别是在材料加工等^[3-4]对脉冲波形有严格要求的领域。此外,脉冲形状的改变会使一些非线性现象变得更加严重,如受激拉曼散射(SRS)、自相位调制(SPM)等,从而导致输出光束质量变差、系统不稳定等问题^[5]。基于以上原因,本文针对脉冲放大器时域特性调控问题进行了研究。

为获得指定形状的脉冲输出,一般通过调整输入脉冲波形来预补偿由增益饱和效应导致的波形畸变。输入脉冲的控制方法一般有两种:1)通过控制半导体二极管的驱动电流来改变种子激光^[3-4,6];2)借助电光调制器(EOM)对连续种子激光施加外调制^[7-8]。通常使用任意波形发生器(AWG)来驱动激光二极管(LD)或外调制。预补偿所需要的脉冲可以由放大器解析模型 Frantz-Nodvick 方程的逆向计算直接得到^[3-4],或者基于优化算法的多次迭代来获取。通过不断改变输入脉冲,可使放大器的真实输出逼近目标输出^[6-8]。考虑到直接计算需要多个精确的放大器参数以及理论计算与实验结果之间存在误差,工程中应用更多的是优化迭代法。

Sobon 等^[4]通过直接计算法获取所需的输入脉冲,产生了矩形、三角型和 M 型等多种脉冲,但是根据实验结果,直接计算得到的输入脉冲经放大后所得的真实输出与目标输出存在一定差异,因此,需要对输入脉冲进行改进。自 2006 年以来, Vu 等^[6-8]提出的电流调制和 EOM 调制种子脉冲的方案均使用模拟退火(SA)算法对输入脉冲进行预补偿。采用优化迭代法时,需预先判断输入脉冲的形状,并利用具有少量未知参数的函数拟合输入脉冲,退火算法优化的对象即为这些参数。为达到更好的拟合效果,采用优化迭代法产生圆滑脉冲时使用分段函数表述目标脉冲。

在优化算法领域,随机并行梯度下降(SPGD)算法具有控制策略简单、收敛速度快的优点,近年来被广泛应用于光束合成、自适应光学和模式分解等领域^[9-12]。采用 SPGD 算法获取生成指定输出所需的输入脉冲,选择算法的控制对象为输入脉冲采样得到的向量,因此无需额外设计函数来拟合输入脉冲,操作较为方便。利用数值仿真产生了矩形、M 型和三角型 3 种直线边界脉冲,以及抛物线型和椭圆型两种曲线边界脉冲,仿真结果表明 SPGD 算法收敛迅速且具有较好的适应性,可被广泛应用于多种类型的目标脉冲获取。

2 脉冲时域特性调控原理

分析激光器的放大特性最常用的解析模型是 Frantz-Nodvick 方程^[3],该方程可用于计算放大后的光强,即

$$I_{\text{out}}(t) = \frac{I_{\text{in}}(t)}{1 - (1 - 1/G_0) \exp[-E_{\text{in}}(t)/E_{\text{sat}}]}, \quad (1)$$

式中 $I_{\text{in}}(t)$ 和 $I_{\text{out}}(t)$ 为输入和输出脉冲的光强; G_0 为小信号增益; $E_{\text{in}}(t)$ 为输入脉冲在 t 时刻前的能量, $E_{\text{in}}(t) = A_{\text{eff}} \int_{-\infty}^t I_{\text{in}}(t') dt'$, A_{eff} 为有效模场面积; E_{sat} 为光纤放大器的增益饱和能量。

根据(1)式对应的系统增益 $G(t) = 1 + (G_0 - 1) \exp[-E_{\text{out}}(t)/E_{\text{sat}}]$, 计算得到输出脉冲对应的输入脉冲光强为^[7]

$$I_{\text{in}}(t) = \frac{I_{\text{out}}(t)}{G(t)} = \frac{I_{\text{out}}(t)}{1 + (G_0 - 1) \exp[-E_{\text{out}}(t)/E_{\text{sat}}]}, \quad (2)$$

式中 $E_{\text{out}}(t)$ 为输出脉冲的能量, $E_{\text{out}}(t) = A_{\text{eff}} \int_{-\infty}^t I_{\text{out}}(t') dt'$ 。(2)式可看作逆向 Frantz-Nodvick 方程。

已知 G_0 和 E_{sat} 时,可以根据(2)式计算得到目标输出光强 I_{target} 对应的输入光强 I_{in} ,该方法即为直接计算法。基于(1)式,采用迭代算法不断调整输入脉冲,令输出脉冲逐步逼近目标输出,从而获得预补偿所需的输入脉冲。使用评价函数描述真实输出与目标输出之间的差异,通过优化算法得到评价函数的最小值。

评价函数决定了控制算法的计算量,从而影响控制算法的收敛速度和控制效果。因此,选择合适的评价函数是进行有效优化的重要前提。基于对输出脉冲波形的具体要求,定义评价函数为

$$J(I_{in}) = \int_0^{\tau} |I_{target}(t) - I_{out}(t)| dt, \quad (3)$$

式中 τ 为目标脉冲带宽。当放大器输出脉冲形状与所要求的脉冲形状完全相同时,评价函数将达到极小值 0。

具体计算时,脉冲光强由采样后的向量表示,即 $I(t) \Rightarrow \mathbf{I}_{in} = (I_1, I_2, \dots, I_n)$, n 为采样点数, $I_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为脉冲光强幅值。SPGD 算法根据评价函数并采用相应的策略改变输入脉冲数值,使得输出脉冲逼近目标。优化算法的控制对象 $\mathbf{u} = \mathbf{I}_{in}$, 优化的具体过程如下:

- 1) 生成控制变量随机扰动 $\delta \mathbf{u} = (\delta u_1, \delta u_1, \dots, \delta u_n)$ [$\delta u_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为 I_i 对应的随机扰动幅值], 满足均值为零、方差相等,即 $\langle \delta u_i \rangle = 0, \langle \delta u_i, \delta u_j \rangle = \sigma^2 \delta_{ij} (i = j \text{ 时}, \delta_{ij} = 1; i \neq j, \delta_{ij} = 0)$;
 - 2) 将随机扰动施加于控制变量上,计算 $\mathbf{u} + \delta \mathbf{u}$ 对应的评价函数值 $J^+ = J(\mathbf{u} + \delta \mathbf{u})$; 施加反向的扰动,计算 $\mathbf{u} - \delta \mathbf{u}$ 对应的评价函数值 $J^- = J(\mathbf{u} - \delta \mathbf{u})$;
 - 3) 计算评价函数变化量 $\delta J = J^+ - J^- = J(\mathbf{u} + \delta \mathbf{u}) - J(\mathbf{u} - \delta \mathbf{u})$;
 - 4) 更新控制参数, $\mathbf{u}^{i+1} = \mathbf{u}^i + \gamma \delta \mathbf{u}^i \delta J^i$, i 为迭代步数, γ 为迭代步长, $\gamma < 0$ 时利用 SPGD 算法求解 $J(\mathbf{u})$ 最小化的问题;
 - 5) 重复步骤 1)~4), 直至评价函数达到停止条件。
- 优化过程中可以根据需要改变迭代步长或者扰动方差。

3 数值仿真

图 1 为脉冲光纤放大器时域特性调控方案示意图,图中 CWS 为连续种子激光,CO 为准直器,PD 为光电二极管,图 1(a)通过引入 EOM 外调制来控制输入脉冲,图 1(b)通过控制半导体二极管的驱动电流来控制输入脉冲。将经过预补偿的种子激光作为放大器的输入脉冲,预补偿旨在改变输入脉冲的形状。将放大后的输出脉冲与目标脉冲进行比较,若二者存在差异,则按照算法策略改变 AWG 的输出信号,进而改变输入脉冲波形。

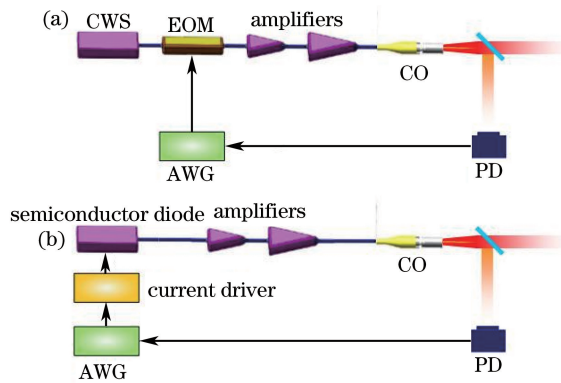


图 1 脉冲光纤放大器时域特性的调控方案示意图。(a)使用 EOM;(b)使用电流调制

Fig. 1 Diagrams of time-domain characteristic regulation scheme for pulse fiber amplifier.

(a) Using EOM; (b) using current modulation

为了验证 SPGD 算法生成指定任意输出的有效性,采用文献[8]中的数据进行数值仿真。种子激光为中心波长为 1950 nm、输入脉冲能量为 7 μJ 、脉宽为 100 ns 的矩形脉冲时,估算得到 $G_0 \approx 28$ dB, $E_{sat} \approx 0.15$ mJ。仿真时要求输出脉宽为 100 ns、脉冲能量为 0.5 mJ 的矩形脉冲。根据 G_0 和 E_{sat} ,目标脉冲输出及由于增益饱和导致的脉冲畸变输出如图 2 所示。

图 3 为利用 SPGD 算法生成矩形脉冲的仿真过程。图 3(a)为初始输入脉冲(矩形脉冲)和经过 SPGD 算法迭代计算 500, 5000, 1.6×10^4 次后的输入脉冲,图 3(b)为上述 4 种输入脉冲对应的输出脉冲以及目标脉冲(矩形脉冲)。可以看出,输出脉冲在迭代过程中不断向目标脉冲逼近,经过 1.6×10^4 次迭代计算后的图像为矩形脉冲。图 4 为迭代过程中评价函数的变化曲线。

图 5 为产生脉冲能量为 0.5 mJ 的 M 型脉冲的情况。与图 3 类似,图 5(a)为初始输入脉冲(矩形脉冲)和利用 SPGD 算法在不同迭代次数下计算得到的输入脉冲,图 5(b)为以上 4 种输入脉冲对应的输出脉冲以及目标脉冲(M 型脉冲)。

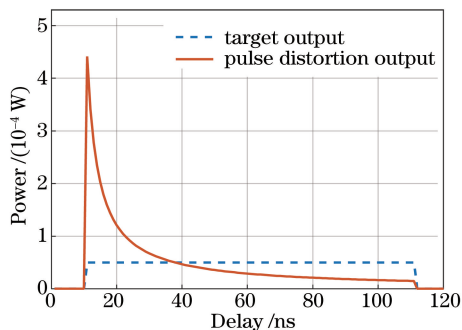


图 2 目标脉冲输出与增益饱和导致的脉冲畸变输出

Fig. 2 Target pulse output and pulse distortion output caused by gain saturation

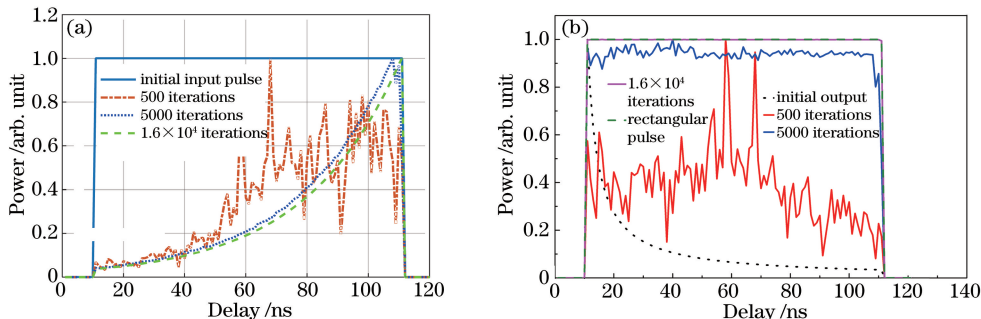


图 3 (a)初始输入脉冲和经过 SPGD 算法不同迭代次数后的输入脉冲;(b)矩形脉冲和图 3(a)中 4 种输入脉冲对应的输出脉冲

Fig. 3 (a) Initial input pulse and input pulses obtained by SPGD algorithm with different iterations.

(b) rectangular pulse and four output pulses corresponding to input pulses in Fig. 3(a)

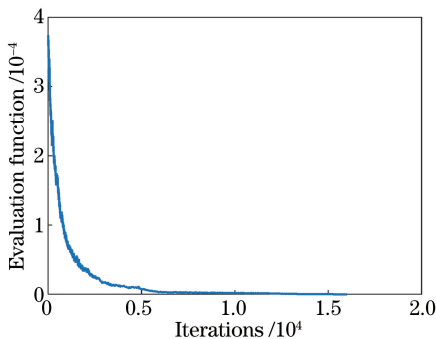


图 4 评价函数的变化曲线

Fig. 4 Changing curve of evaluation function

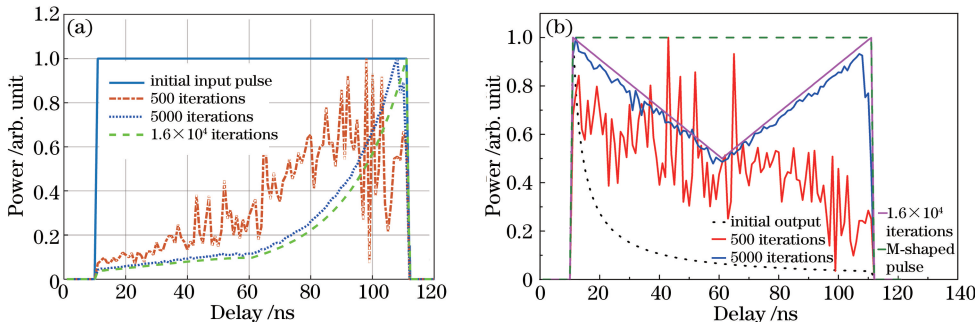


图 5 (a)初始输入脉冲和经过 SPGD 算法不同迭代次数后的输入脉冲;(b)M 型脉冲和图 4(a)中 4 种输入脉冲对应的输出脉冲

Fig. 5 (a) Initial input pulse and input pulses obtained by SPGD algorithm with different iterations

(b) M-shaped pulse and output pulses corresponding to input pulses in Fig. 4(a)

为了检验利用 SPGD 算法产生不同类型脉冲时的效果是否存在差异,分别采用直接计算法与利用 SPGD 算法(迭代次数为 1.6×10^4)计算获取 3 种直线边界脉冲(矩形、M 型和三角型脉冲)和两种曲线边界脉冲(抛物线型和椭圆型脉冲)需要的输入脉冲,得到的输入和输出脉冲如图 6 所示,具体数值如表 1 所示。

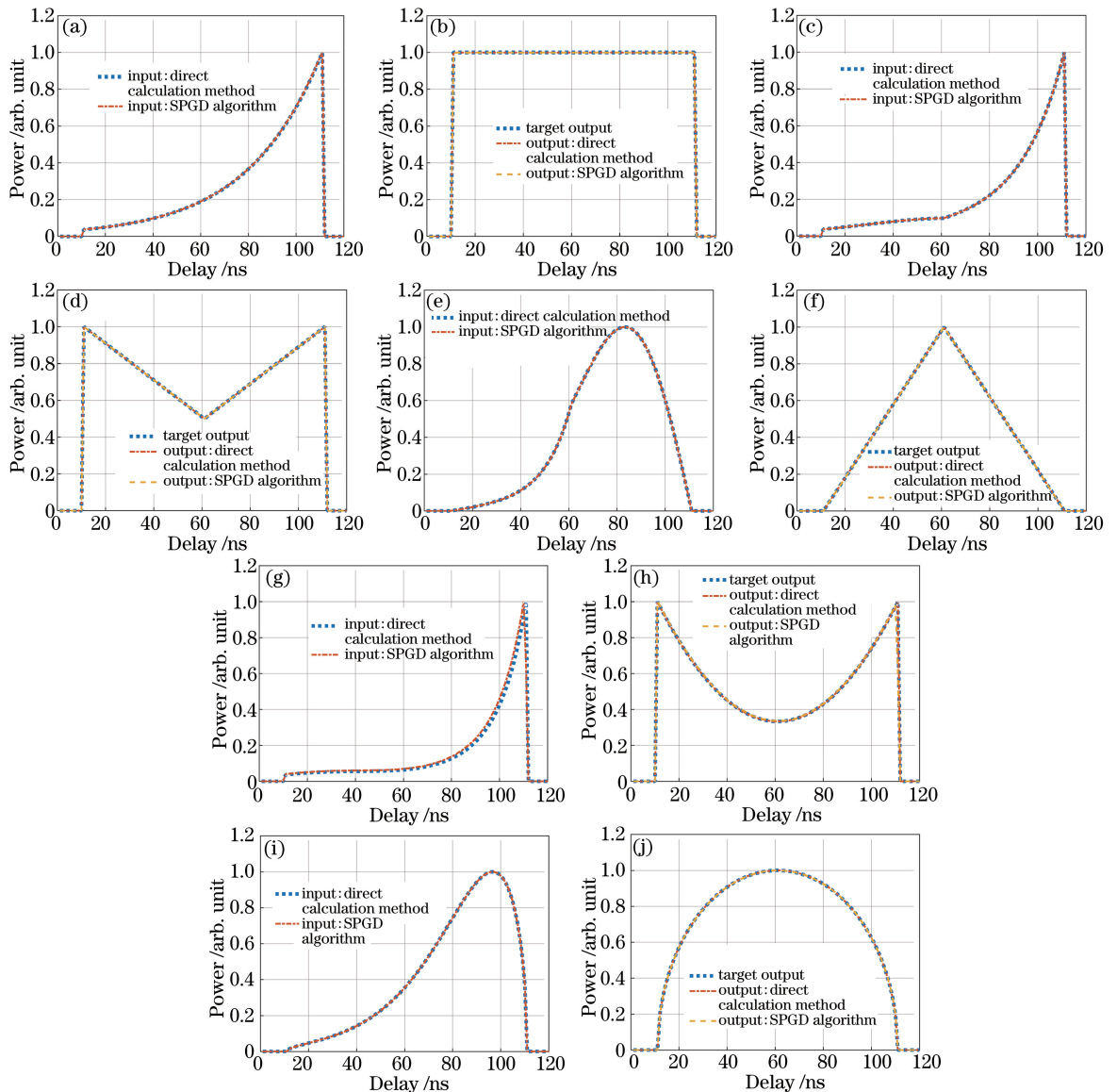


图 6 直接计算法和 SPGD 算法的结果比较。(a)(c)(e)(g)(i)产生矩形、M 型、三角型、抛物线型、椭圆型脉冲需要的输入脉冲;(b)(d)(f)(h)(j) Figs. 6(a)(c)(e)(g)(i)对应的输出脉冲与目标输出

Fig. 6 Results comparison between direct calculation method and SPGD algorithm. (a)(c)(e)(g)(i) Input pulses to produce rectangular, M-shaped, triangle, parabola and ellipse pulses; (b)(d)(f)(h)(j) output pulses corresponding to Figs. 6(a)(c)(e)(g)(i) and target outputs

表 1 直接计算法和 SPGD 算法的结果比较

Table 1 Results comparison of direct calculation method and SPGD algorithm

Target pulse	Energy of input pulse / (10^{-6} J)		Energy of output pulse / (10^{-4} J)	
	Direct calculation method	SPGD algorithm	Direct calculation method	SPGD algorithm
Rectangular	6.2930	6.2930	4.9997	5.1686
M-shaped	6.2934	6.2936	4.9997	4.9998
Triangle	6.2920	6.2917	4.9990	5.1686
Parabola	6.2947	6.2110	4.9999	5.1686
Ellipse	6.2922	6.2922	4.9994	5.1686

由图 6 和表 1 中可知,若使用向量表示脉冲,目标脉冲为直线边界脉冲或者曲线边界脉冲时,直接计算法和 SPGD 算法迭代计算得到的输入和输出脉冲波形重合度高,脉冲能量差异小。因此,基于向量表示脉冲,应用 SPGD 算法进行脉冲整形具有较为广泛的适用性。

4 结 论

基于 SPGD 算法,提出了一种脉冲光纤放大器时域特性调控的新方法。由于增益饱和和效应,高功率脉冲光纤放大器输出的脉冲时域波形会发生畸变。采用 SPGD 算法可不断优化输入脉冲,使得光纤放大器的输出逼近目标输出脉冲。数值仿真实现了指定的多种脉冲输出,基于 SPGD 算法的控制策略简单,收敛迅速,且对于直线边界和曲线边界脉冲均有较好的优化效果,具有较为广泛的适用性。

参 考 文 献

- [1] Dupriez P, Piper A, Malinowski A, *et al.* High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060 nm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(9): 1013-1015.
- [2] Dupriez P, Finot C, Malinowski A, *et al.* High-power, high repetition rate picosecond and femtosecond sources based on Yb-doped fiber amplification of VECSELs[J]. Optics Express, 2006, 14(21): 9611-9616.
- [3] Schimpf D N, Ruchert C, Nodop D, *et al.* Compensation of pulse-distortion in saturated laser amplifiers[J]. Optics Express, 2008, 16(22): 17637-17646.
- [4] Sobon G, Kaczmarek P, Antonczak A, *et al.* Pulsed dual-stage fiber MOPA source operating at 1550 nm with arbitrarily shaped output pulses[J]. Applied Physics B, 2011, 105(4): 721-727.
- [5] Lin D, Alam S U, Malinowski A, *et al.* Temporally and spatially shaped fully-fiberized ytterbium-doped pulsed MOPA[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(10): 747-753.
- [6] Vu K T, Malinowski A, Richardson D J, *et al.* Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond fiber MOPA system[J]. Optics Express, 2006, 14(23): 10996-11001.
- [7] Malinowski A, Vu K T, Chen K K, *et al.* High power pulsed fiber MOPA system incorporating electro-optic modulator based adaptive pulse shaping[J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20927-20937.
- [8] Li Z, Heidt A M, Teh P S, *et al.* High-energy diode-seeded nanosecond 2 μm fiber MOPA systems incorporating active pulse shaping[J]. Optics Letters, 2014, 39(6): 1569-1572.
- [9] Vorontsov M A, Sivokon V P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wave-front phase-distortion correction[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(10): 2745-2758.
- [10] Lü H, Zhou P, Wang X, *et al.* Fast and accurate modal decomposition of multimode fiber based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Applied Optics, 2013, 52(12): 2905-2908.
- [11] 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.
- [12] Zhou Pu, Liu Zejin, Wang Xiaolin, *et al.* Theoretical and experimental investigation on coherent beam combining of fiber lasers using SPGD algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2232-2237.
周 朴, 刘泽金, 王小林, 等. 随机并行梯度下降算法用于光纤激光相干合成的理论与实验研究[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2232-2237.