

基于 SPGD 算法的光纤激光偏振控制理论与实验研究

尹明^{**}, 粟荣涛^{***}, 王小林^{*}, 马阎星, 马鹏飞

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

摘要 对非保偏光纤放大器进行偏振控制是获得高功率线偏振光纤激光输出的有效途径。介绍了光纤放大器偏振控制的原理,对基于随机并行梯度下降(SPGD)算法的偏振控制进行了理论仿真,分析了算法性能评价函数、扰动电压分布类型、增益步进、扰动幅度等参数对偏振控制效果的影响。利用现场可编程门逻辑阵列(FPGA)执行SPGD算法,控制输出光的偏振态,获得了消光比大于11 dB的激光输出。

关键词 光纤光学; 偏振控制; 非保偏; 消光比; 随机并行梯度下降(SPGD)算法

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.090602

Theoretical and Experimental Research on Polarization Control of Fiber Laser Based on SPGD Algorithm

Yin Ming^{**}, Su Rongtao^{***}, Wang Xiaolin^{*}, Ma Yanxing, Ma Pengfei

Academy for Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The polarization control of non-polarization maintaining fiber amplifier is an effective way to obtain high power linear polarization fiber laser output. In this paper, we introduce the principle of optical fiber amplifier polarization control based on stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm, and also numerically analyze the effects of the parameters, such as algorithm performance evaluation function, influence of disturbance voltage distribution types, gain step and the disturbance amplitude on polarization control. Then we use field programmable gate logic array (FPGA) to perform SPGD algorithm, and control the polarization state of the output light. Finally, the obtained polarization extinction ratio of the output laser is greater than 11 dB.

Key words fiber optics; polarization control; non-polarization maintaining; extinction ratio; stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm

OCIS codes 060.2320; 060.2430; 060.2430

1 引言

高功率、高偏振消光比(PER, R_{PE})的线偏振光在很多领域有广泛应用,例如激光通信、高精度传感、引力波探测、光束合成等^[1-2]。目前,获得线偏振光的手段有:采用偏振抑制技术产生线偏振光^[3-4],其原理是利用布鲁斯特窗、起偏器、偏振光栅等偏振敏感器件选择特定的偏振模式^[5];基于保偏光纤以及偏振相关器件的保偏光纤激光器也是获得线偏光

的有效方法,但保偏器件价格昂贵、制作工艺复杂,而且保偏光纤的切割、熔接、热管理等处理工艺难度较大。因此,通过采用基于自适应控制技术的非保偏主振荡功率放大器(MOPA)获得高功率、高偏振消光比的线偏振光,是降低保偏光纤激光器的成本以及制作难度的有效手段^[2,6]。

目前,在高功率光纤激光领域,偏振控制技术已成功将非线偏的激光转换为线偏振激光输出,并将获得的偏振光用于光纤激光相干合成等领域。

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-03-22; 录用日期: 2018-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(61505260, 61735007, 61705265)

* E-mail: chinaphotonics@163.com; ** E-mail: yin930913ming@163.com; *** E-mail: surongtao@126.com

2010年,美国诺斯罗普·格鲁曼公司研究人员开展了光纤激光的自适应偏振控制实验,并将偏振控制获得的1.43 kW的线偏振激光用于相干合成^[6]。2011年,国防科技大学熊玉鹏等^[7]利用偏振控制在非保偏放大器中实现了线偏振激光输出,将消光比从2.28 dB提高到11.5 dB。2012年,诺斯罗普·格鲁曼公司又利用偏振控制技术进行了5路非保偏光纤放大器的偏振控制实验,偏振控制后单路激光的消光比可大于20 dB^[8]。2013年,诺斯罗普·格鲁曼公司又分别对相干合成用的3路放大器进行偏振控制,偏振控制后,3路放大器的输出功率分别为1.1,1.3,0.6 kW,消光比分别为12 dB、18 dB和15 dB^[9]。2015年,国防科技大学董苏惠等^[10-11]提出了基于非保偏种子的偏振控制方法,该方案对于种子激光的偏振特性没有要求,通过优化控制算法,将两级级联的全非保偏放大器输出激光的消光比提高到16.7 dB。2016年,美国空军研究实验室使用5台基于偏振控制的窄线宽放大器(单路输出功率约为1.2 kW),实现了5 kW级相干合成输出^[12]。2016年,中国工程物理研究院王岩山等^[13]利用类似的偏振控制方法,获得了输出功率为1 kW、消光比为14.5 dB的激光输出。2017年,国防科技大学Su等^[14]利用偏振控制方案,获得了输出功率为1.43 kW、消光比为13 dB的线偏振激光输出。同年,刘泽金等^[15]也利用偏振控制的方法,实现了4路高窄线宽、线偏振光纤放大器相干偏振合成,输出功率为5 kW级高亮度激光输出。

尽管国内外都对光纤激光的偏振控制进行了较多的实验研究,但截至目前,尚未见基于随机并行梯度下降(SPGD)算法的偏振控制的理论研究。因此,为了对实验提供较好的指导,本文对基于SPGD算法的偏振控制技术开展了详细的理论和实验研究,以优化偏振控制的性能评价函数和参数设置,对实验提供有效的理论指导。首先介绍了偏振控制的理论模型,然后通过数值仿真,较为全面地分析了随机SPGD算法中性能评价函数、随机扰动幅度、增益步进、扰动电压分布的选取对收敛速度以及收敛效果的影响。最后根据理论仿真的结果选择性能评价函数,开展了低功率的偏振控制实验研究,通过参数优化,分别将性能评价函数控制到最大和最小,获得了消光比为11.5 dB和10.8 dB的线偏振光输出。

2 偏振控制基本理论

2.1 偏振控制的基本理论

图1给出了基于SPGD算法偏振控制的实验原

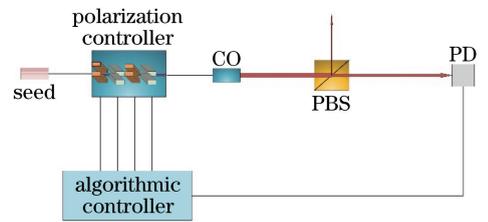


图1 基于SPGD算法偏振控制的原理图
Fig. 1 Schematic diagram of polarization control based on SPGD algorithm

理图。非线性偏振激光(seed)经过偏振控制器后,从准直器(CO)输出,输出激光经过偏振分束器(PBS)后,所需偏振方向的光入射到光电探测器(PD)上,PD将接收到的光信号转化为电信号输入算法控制器中。算法控制器将输入的电信号作为性能评价函数,通过执行SPGD算法,计算出相应的控制变量,再施加到偏振控制器上,在算法极值寻优的过程中,获得高消光比的线偏振激光输出。

假设激光沿 z 方向传播,光场可以分为相互垂直的 x 和 y 方向上的分量,可以描述为

$$\begin{cases} E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \\ E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: E_{0x} 和 E_{0y} 分别为 x 和 y 方向上的振幅; ω 为光频率; k 为波数; φ_x 和 φ_y 为 x 和 y 方向上光场的相位。(1)式消去 $\omega t - kz$ 得

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right) \cos \Delta\varphi = \sin \Delta\varphi, \quad (2)$$

式中: $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$,即两个方向上的相对相位延迟量。(2)式为椭圆方程,即电场矢量的端点所绘制的轨迹为椭圆,且 $\Delta\varphi$ 和 E_{0x}/E_{0y} 共同决定了该椭圆的形状,从而决定了光束的偏振态^[11]。

此光束也可以用琼斯矩阵表示,令输入光 x 和 y 方向上电场强度振幅之比为 η ,则有 $E_{0x} = \eta E_{0y}$, x 和 y 方向上电场的相位差为 $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ 。则经过归一化后,输入光的琼斯矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\eta}{\sqrt{\eta^2 + 1}} \\ 1 \\ \frac{1}{\sqrt{\eta^2 + 1}} \exp(i\Delta\varphi) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

因此,通过利用偏振控制器控制光束两个方向上的相位差 $\Delta\varphi$ 以及 E_{0x}/E_{0y} 的值,最终能够实现期望的偏振控制输出。

实验中采用的偏振控制器主要是General Photonics公司的POLARITETM II/III系列基于

压电驱动的偏振控制器,如图 2 所示。

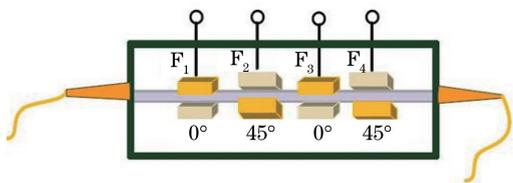


图 2 基于压电驱动的偏振控制器示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of polarization controller based on piezoelectric driving

该偏振控制器由 4 个压电陶瓷组成,其中第 2 和

第 4 个与主轴之间夹角为 0° ,第 1 和第 3 个压电陶瓷与主轴的夹角为 45° 。偏振控制器的原理是通过压电陶瓷挤压光纤,使光纤产生弹光效应,从而改变光纤中的双折射,且所施加的应力与光纤产生的相位延迟量成正比。为使理论仿真的结果能直接指导实验,本文不采用 X-Y 两个偏振态相位控制的模型,而是考虑偏振控制器的实际偏振演化模型。图 2 中 4 对压电陶瓷器分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 ,用琼斯矩阵模拟偏振控制器的控制原理,每对压电陶瓷相当于一个双折射延迟波片,理想的线性双折射波片的琼斯矩阵为

$$\mathbf{M}_{\text{Jones}} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi^2 + \sin \varphi^2 \exp(-i\theta) & \cos \varphi \sin \varphi [1 - \exp(-i\theta)] \\ \cos \varphi \sin \varphi [1 - \exp(-i\theta)] & \cos \varphi^2 + \sin \varphi^2 \exp(-i\theta) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: φ 为快轴与水平方向的夹角; θ 为压电陶瓷挤压光纤引起双折射产生的两个偏振方向上的相位延迟量,当 φ 取 0° 和 45° 时,所对应的琼斯矩阵分别为

$$\mathbf{M}_{\text{Jones}_0}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\theta) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_{\text{Jones}_{45}}(\theta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \exp(-i\theta) & 1 - \exp(-i\theta) \\ 1 - \exp(-i\theta) & 1 + \exp(-i\theta) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

假设 F_1 的延迟量为 θ_1 , F_2 的延迟量为 θ_2 , F_3 的延迟量为 θ_3 , F_4 的延迟量为 θ_4 ,则偏振控制器的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{M}_{\text{Jones}} = \mathbf{M}_{\text{Jones}_{45}} \mathbf{M}_{\text{Jones}_0} \mathbf{M}_{\text{Jones}_{45}} \mathbf{M}_{\text{Jones}_0} = \frac{1}{4} [1 + \exp(-i\theta_4) 1 - \exp(-i\theta_4) 1 - \exp(-i\theta_4) 1 + \exp(-i\theta_4)] \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\theta_3) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 + \exp(-i\theta_2) 1 - \exp(-i\theta_2) \\ 1 - \exp(-i\theta_2) 1 + \exp(-i\theta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-i\theta_1) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

那么输出光的琼斯矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{Jones}} \begin{bmatrix} \frac{\eta}{\sqrt{\eta^2 + 1}} \\ 1 \\ \frac{1}{\sqrt{\eta^2 + 1}} \exp(i\Delta\varphi) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

输出的消光比为

$$R_{\text{PE}} = 10 \lg(P_y/P_x), \quad (9)$$

式中: P_x 和 P_y 分别为 x 和 y 方向输出的光功率。通过控制 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$,可以控制输出光的功率 P_y ,使 R_{PE} 达到最大。在实验中通过控制施加到偏振控制器上的电压大小,从而控制相应的相位延迟量 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ 来获得期望的激光输出^[10]。

2.2 SPGD 算法简介

利用算法控制器上加载的 SPGD 优化算法,对偏振控制电压进行优化,进而控制延迟量的大小,以

实现线偏振激光稳定输出。在 SPGD 算法的执行过程中,首先定义性能评价函数 J , $J(u_1, u_2, \dots, u_N)$ 是施加在偏振控制器上信号 $u(u_1, u_2, \dots, u_N)$ 的函数。SPGD 算法利用性能指标测量的变化量 δJ 与其当前施加的扰动电压 δu 进行控制参量的梯度估计,以迭代方式在梯度下降方向上进行参量的搜索。SPGD 算法的迭代表达式为

$$u^{(n+1)} = u^{(n)} + \gamma \delta J \delta u^{(n)}, \quad (10)$$

式中: $u^{(n)}$ 为当前第 n 次偏振控制器的驱动电压; γ 为迭代增益; $\delta u^{(n)}$ 为当前施加的扰动电压; δJ 为能评价函数的梯度估计,则

$$\delta J^{(n)} = \{J[u^{(n)} + \delta u^{(n)}] - J[u^{(n)} - \delta u^{(n)}]\} / 2. \quad (11)$$

算法在迭代过程中采用双边 SPGD 扰动,即分别为 $u^{(n)} + \delta u^{(n)}$ 和 $u^{(n)} - \delta u^{(n)}$ 。综上,在实际系统中,

SPGD算法的工作流程如下(以双向扰动算法为例):

- 1) 设置初始控制电压 $u^{(0)}(u_1, u_2, \dots, u_N)$ 输出至偏振控制器;
- 2) 获取评价函数 $J^{(n)}$;
- 3) 生成随机扰动电压 $\delta u^{(n)}(\delta u_1, \delta u_2, \dots, \delta u_N)$ 并保存;
- 4) 将随机扰动电压 $\delta u^{(n)}$ 与控制电压 $u^{(n)}$ 累加后输出至偏振控制器;
- 5) 获取扰动后的评价函数 $J[u^{(n)} + \delta u^{(n)}]$;
- 6) 随机扰动电压 $\delta u^{(n)}$ 取反并与控制电压 $u^{(n)}$ 累加后输出至偏振控制器;
- 7) 获取扰动后的评价函数 $J[u^{(n)} - \delta u^{(n)}]$;
- 8) 计算目标函数的变化量 $\delta J^{(n)}$;
- 9) 按照公式 $u^{(n+1)} = u^{(n)} + \gamma \delta J \delta u^{(n)}$ 更新控制电压输出至偏振控制器, 进行 $n+1$ 次迭代;
- 10) 转入第 3) 步, 继续进行偏振控制, 直至算法结束。

由于算法需要实时控制各路光纤激光的动态偏振起伏, 因此上述过程一直保持运行状态直至手动发送“停止”命令。

3 数值仿真及结果分析

在基于 SPGD 算法的偏振控制仿真中, 影响算

法收敛速度和精度的主要因素有: 性能评价函数、扰动电压分布类型、扰动幅度和增益步进等。因此, 为了实现快速和优化的偏振控制, 分别对上述因素进行仿真研究。

3.1 性能评价函数

SPGD 算法的参数之一是性能评价函数。在仿真中, 选取的性能评价函数主要有以下 3 种形式:

$$J_1 = \frac{I_y - I_x}{I_y + I_x}, \quad (12)$$

$$J_2 = I_y, \quad (13)$$

$$J_3 = 10 \lg(I_y/I_x). \quad (14)$$

上述 3 种性能评价函数, J_1 为偏振度 (polarization), J_2 为 y 方向上的光强 (I_y), J_3 为输出光束的消光比。其中, I_x 和 I_y 分别表示 x 和 y 方向上的光强。首先仿真了不同性能评价函数收敛的情况。为了得到更合乎统计意义的评价结果, 将程序运行 1000 次然后取平均, 得出相应的结果。根据 2.2 节中, 当 $\gamma = 7.5$, $\delta u = 0.03$ 时, 随机扰动电压服从伯努利分布, 扰动方式为双边扰动, 3 种性能评价函数下的仿真结果如图 3(a)、(b) 所示。图中横坐标表示算法迭代步数 (steps)。

通过将性能评价函数收敛到光束的偏振度为 0.95 作为算法收敛性能的评价指标。3 种性能评价

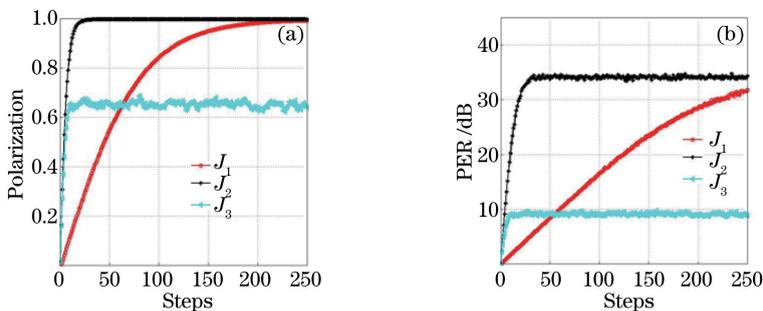


图 3 (a) 不同评价函数情形下的收敛曲线; (b) 不同评价函数情形下的消光比

Fig. 3 (a) Convergence curves for different evaluation functions; (b) PER curves for different evaluation functions

函数中, J_2 收敛效果最好, 收敛到 0.95 迭代了 15 步; J_1 用了 151 步; 使用 J_3 作为性能评价函数时, 偏振度难以收敛到 0.95。综上, 选取 I_y 作为算法的性能评价函数。

3.2 扰动电压函数类型

SPGD 算法的参数之二是随机扰动电压 $u = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ 的类型。一般符合均值为零、方差相等且概率密度分布关于均值对称的扰动电压分布, 主要有如图 4(a)、(b)、(c) 3 种, 分别为伯努利分布 (binornd)、均匀分布 (unifrnd) 和正态分布

(randn)^[16]。

利用 SPGD 算法对单路激光的偏振控制进行模拟, 除扰动电压的类型外, 计算参数与图 3 采用的参数一致。采用不同类型扰动电压时, 算法的收敛曲线如图 5(a)、(b) 所示。当扰动电压函数类型采用伯努利分布和正态分布时, 算法收敛的速度比均匀分布快, 当收敛到 0.95 时分别迭代了 16 步和 17 步, 均匀分布算法的收敛速度最慢, 为 42 步。用硬件生成服从伯努利分布的扰动电压十分容易, 因此在实际中一般可采用服从伯努利分布的随机扰动电压。

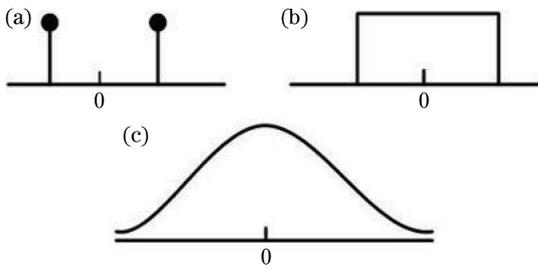


图4 不同概率密度分布的扰动电压类型

Fig. 4 Disturbance voltage types of different probability density distributions

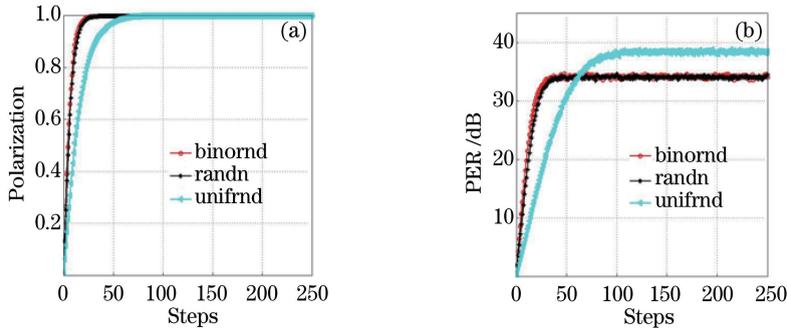


图5 (a)不同类型扰动电压情形下的收敛曲线;(b)不同类型扰动电压情形下的消光比

Fig. 5 (a) Convergence curves for different disturbance voltage types; (b) PER curves for different disturbance voltage types

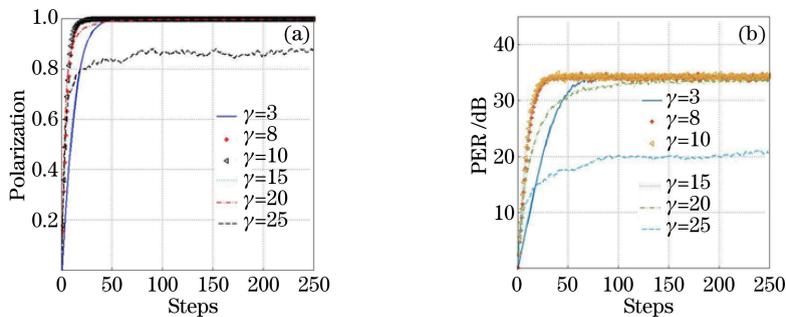


图6 (a)不同增益步进下算法的收敛曲线;(b)不同增益步进下算法的消光比

Fig. 6 (a) Convergence curves for different gain steps; (b) PER curves for different gain steps

当增益为25时算法将无法收敛到0.95,且收敛曲线波动很大。

3.4 扰动幅度

SPGD算法的参数之四是扰动电压幅度。增益步进 $\gamma=7.5$ 、扰动电压满足伯努利分布、扰动方式为双向扰动的情况下,不同扰动幅度 δu 的收敛情况如图7(a)、(b)所示。随着扰动幅值的增加,算法收敛的速度明显提高,但幅值增加过多、超过一定阈值的时候,收敛效果变差,其既不稳定,也无法达到很高的收敛值。当扰动幅度分别为0.01,0.02,0.03,0.04,0.05时,收敛到0.95时,算法的迭代步数分别为101,30,161,12,29,当增益为25时,算法将无法收敛到0.95,且收敛曲线波动很大。

3.3 增益步进

SPGD算法的参数之三是增益步进。在扰动电压幅度 $\delta u=0.03$ 、扰动电压满足伯努利分布、扰动方式为双向扰动的情况下,不同增益步进 γ 的收敛情况如图6(a)、(b)所示。

随着增益步进的增加,算法收敛的速度明显提高,但步进增加过多、超过一定阈值的时候,收敛效果变差,其既不稳定,也无法达到很高的收敛值。当增益步进 γ 为3,8,10,15,20时,收敛到0.95时,算法的迭代步数分别为32,15,13,12,21,

根据上述仿真的结果,扰动电压选取服从伯努利分布类型的电压、增益步进 $\gamma=15$ 、扰动电压幅度 $\delta u=0.04$ 、扰动方式为双向扰动的情况下,可获得很好的偏振控制效果,这也为实际控制电路的设计提供了理论依据。

由于SPGD算法是一种逐渐逼近的算法,算法的收敛速度决定了算法的性能。在参数固定的情况下,当增益步进和扰动幅值较大的时候,收敛速度较快,但后期振荡十分明显;当增益步进和扰动幅值较小的时候,振荡较小,但收敛速度也较慢。在具体实验中需要对参数进行多次实验,才能找到较优值,降低了该算法在实际应用中的收敛效果和实用性。

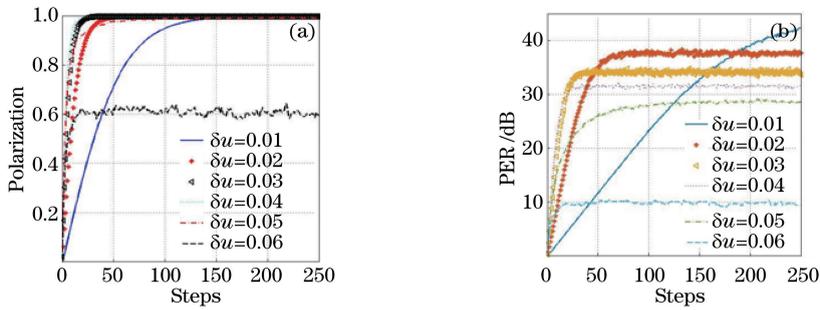


图 7 (a)不同扰动幅度下的收敛曲线;(b)不同扰动幅度下的消光比

Fig. 7 (a) Convergence curves of different disturbance amplitudes; (b) PER curves of different disturbance amplitudes

通过分析上述理论仿真的结果,当性能评价函数选取 I_y (即 y 方向上的光强)、扰动电压满足伯努利分布的函数形式、增益步进 $\gamma=15$ 、扰动电压 $\delta u=0.04$ 的情况下,系统的偏振控制效果最佳。

4 实验与结果分析

4.1 实验结构

根据理论仿真的结果选择性能评价函数,设计了如图 8 所示的实验结构。波长为 1064 nm 的非保偏种子源经过带尾纤的偏振控制器后,从准直器输出。准直器输出的光入射到 PBS 上,PBS 将输出的激光分成两束偏振方向相互垂直的线偏光,一路偏振光(S 光)用功率计(PM1)检测功率,另一个方向的偏振光(P光)

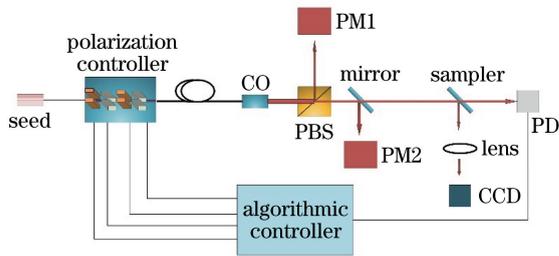


图 8 基于 SPGD 算法的非保偏光纤偏振控制系统装置图

Fig. 8 Setup of non-polarization maintaining fiber polarization control system based on SPGD algorithm

经过半透半反镜(mirror,透射率 $T=40\%$),用功率计 2 (PM2)检测反射光功率,最后由 PD 提取反馈信号。

根据前面的理论分析,选择 P 光的光强作为性能评价函数。探测器将 P 偏振态的光强转化为电压信号输入到算法控制器中,再由算法控制器上加载的 SPGD 优化算法对 P 光的光强进行优化,计算出偏振控制器所需的控制电压,并加载到偏振控制器上。系统在 SPGD 算法的优化过程中,使 P 光光强最大,S 光光强最小,从而获得高消光比的线偏振光输出。

4.2 实验结果与分析

使用优化的双边扰动 SPGD 算法、 I_y 作为性能评价函数、满足伯努利分布的电压作为扰动函数,通过对增益步进和扰动幅度的优化,实现了有效的偏振控制。

实验中采用波长为 1064 nm 的种子,经准直器输出功率为 5.1 mW。设置算法控制电路的参数为:扰动电压选取伯努利分布的电压,扰动方式为双向扰动,算法迭代速率为 100 kHz。通过现有的 SPGD 算法控制器,分别改变其增益步进和扰动幅度,从而验证仿真实理论的正确性。实验得到的偏振控制到最大和偏振控制最小远场光斑的图形,以及示波器上的波形分别如图 9(a)、(a)、(c) 所示。

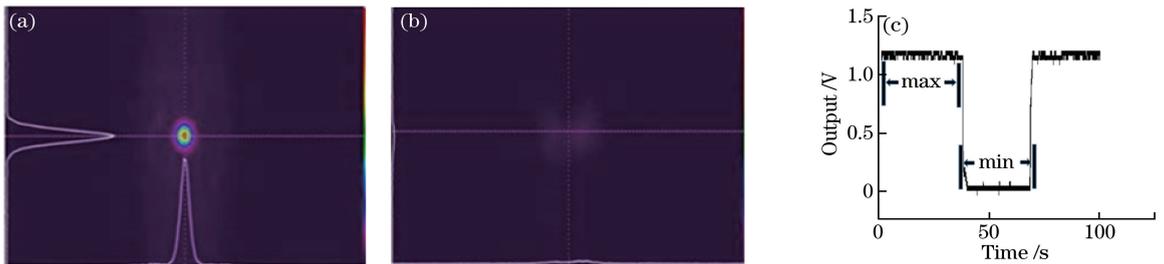


图 9 (a)最大值状态的光斑;(b)最小值状态的光斑;(c)最大值和最小值的波形图

Fig. 9 (a) Facula of the maximum state; (b) facula of the minimum state; (c) waveform of the maximum and the minimum states

偏振控制器控制到最大值和最小值时,输出信号波形如图 9(c)所示。系统开环时(未执行 SPGD 算法,没有进行偏振控制),S 光的平均功率为 0.62 mW,P 光的平均功率为 2.58 mW,此时消光比为 8.4 dB;系统闭环时,执行 SPGD 算法,偏振控制最大(max)时,S 光的平均功率为 0.35 mW,P 光的平均功率为 2.98 mW,此时消光比为 11.5 dB;系统闭环时,执行 SPGD 算法,偏振控制最小(min)时,S 光的平均功率为 4.8 mW,P 光的平均功率为 0.24 mW,此时消光比为 10.8 dB。

进行多组实验后,获得激光的平均消光比在 11 dB 左右。因输出功率较小,读数误差和系统的不稳定性都会带来误差,所以适当增大种子功率,使输出功率增加,系统的控制效果将会明显提高。

5 结 论

介绍了 SPGD 算法用于非保偏激光的偏振控制理论,利用数值模拟的方法优化选取算法有关参数,开展了单路低功率的偏振控制实验。数值分析结果表明,为了获得更好的偏振控制效果,性能评价函数应该选取 I_y (y 方向的光强),扰动电压应服从伯努利分布,扰动方式采用双向扰动。在算法改进方面,加上算法的自适应优化会大大提高系统的控制效果。实验结果表明,SPGD 算法能够有效地将非保偏光纤激光的偏振态控制为线偏振态,系统将消光比控制在 11 dB 左右。

致谢 感谢刘亚坤、任智磊、支冬和张坤在理论和实验上的帮助。

参 考 文 献

- [1] Kim R K, Park K N, Kim C S, *et al.* Highly linear-polarized external cavity laser with 45°-tilted waveguide grating[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6352: 63522S.
- [2] Ding Y Q, Qi Y F, Liu C, *et al.* High power single-frequency linear-polarized all fiber MOPA system for coherent detection[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8192: 81922O.
- [3] Shirakawa A, Kamijo M, Ota J, *et al.* Characteristics of linearly polarized Yb-doped fiber laser in an all-fiber configuration[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(20): 1664-1666.
- [4] Barannikov Y A, Oussov A I, Shcherbina F V, *et al.* 250 W, single-mode, CW, linearly-polarized fibre source in Yb wavelength range [C] // Conference on Laser and Electro-Optics, May 16-21, 2004, San Francisco, California, USA. Washington: Optical Society of America, 2004: CMS3.
- [5] Luis R C, Maria A Q, Jose M, *et al.* DBR fiber laser sensor with polarization mode suppression[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 551-554.
- [6] Goodno G D, McNaught S J, Rothenberg J E, *et al.* Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1542-1544.
- [7] Xiong Y P, Su R T, Li X, *et al.* Coherent beam combining based on adaptive polarization and active phase control technique[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(1): 5-6.
熊玉朋, 粟荣涛, 李霄, 等. 基于偏振自适应和主动相位控制的相干合成的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(1): 5-6.
- [8] Goodno G D, McNaught S J, Weber M E, *et al.* Multichannel polarization stabilization for coherently combined fiber laser arrays [J]. Optics Letters, 2012, 37(20): 4272-4274.
- [9] McNaught S J, Thielen P A, Adams L N, *et al.* Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kw beam[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 0901008.
- [10] Dong S H, Wang X L, Su R T, *et al.* Adaptive polarization conversion system of the non-polarization maintaining to polarization maintaining laser based on SPGD algorithm[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(5): 51011.
董苏惠, 王小林, 粟荣涛, 等. 基于 SPGD 算法的非保偏-保偏光自适应的偏振转换[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(5): 51011.
- [11] Dong S H, Wang X L, Su R T, *et al.* Research on adaptive polarization conversion of non-polarization maintaining fiber amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0202006.
董苏惠, 王小林, 粟荣涛, 等. 基于偏振锁相的非线偏-线偏光转换技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0202006.
- [12] Flores A, Ehrenreich T, Holten R, *et al.* Multi-kW coherent combining of fiber lasers seeded with pseudo random phase modulated light [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9728: 97281Y.
- [13] Wang Y S, Yan H, Peng W J, *et al.* Linear

polarized narrow linewidth fiber amplifier with 1 kW based on active polarization control [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0519001.

王岩山, 颜宏, 彭万敬, 等. 基于主动偏振控制的 1 kW 窄线宽偏振光纤激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0519001.

[14] Su R T, Liu Y K, Yang B L, *et al.* Active polarization control of a 1.43 kW narrow linewidth fiber amplifier based on SPGD algorithm[J]. Journal of Optics, 2017, 19(4): 045802.

[15] Liu Z J, Zhou P, Ma P F, *et al.* 4-channel polarize coherent combination of high-power narrow-linewidth

linear polarization fiber amplifiers with 5 kW high intensity laser output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0415004.

刘泽金, 周朴, 马鹏飞, 等. 4路高功率窄线宽、线偏振光纤放大器相干偏振合成实现 5 kW 级高亮度激光输出[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0415004.

[16] Cho K Y, Tanaka K, Sano T, *et al.* Self-polarization-stabilization technique for long-reach coherent WDM-PON [C] // Optical Fiber Communication Conference, March 21-25, 2010, San Diego, California, USA. Washington: Optical Society of America, 2010: PDPD7.