

基于遗传退火算法的光纤激光主动偏振控制技术研究

尤阳^{1,2}, 漆云凤^{1*}, 沈辉¹, 邹星星¹, 何兵^{1,3**}, 周军^{1,3***}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³南京先进激光技术研究院, 江苏 南京 210038

摘要 介绍了一种用于偏振控制的遗传退火算法(GASA),该算法在遗传算法(GA)的基础上,引入了模拟退火的选择机制,将蒙特卡罗思想引入到了GA中,使算法具有更加强大的搜索能力。通过建立基于GASA算法的光纤激光主动偏振控制系统的数学模型,得到了不同参量情况下的GASA算法的仿真图像,并且分析了其收敛效果。仿真结果表明,在选择输出激光的偏振消光比作为适应度函数,种群数量为90,变异概率为0.7,交叉概率为0.001,温度下降比率为0.99的情况下,系统可以达到最优的控制效果。将GASA算法和随机并行梯度下降算法的仿真图像进行对比,可以看出,GASA算法具有较好的全局搜索能力和跳出局部最优值的能力,可以将其用在光纤激光的主动偏振控制系统中。

关键词 激光器; 光纤激光器; 主动偏振控制; 控制算法

中图分类号 O436.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2314002

Research on Active Polarization Control System of Fiber Laser Based on a Mixed Genetic Algorithm and Simulated Annealing Algorithm

You Yang^{1,2}, Qi Yunfeng^{1*}, Shen Hui¹, Zou Xingxing¹,
He Bing^{1,3**}, Zhou Jun^{1,3***}

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China;

³Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Nanjing, Jiangsu 210038, China

Abstract Therefore, this paper proposed a mixed genetic algorithm and simulated annealing (GASA) algorithm for polarization control. Based on a genetic algorithm (GA), this algorithm introduced the selection mechanism of simulated annealing (SA), and introduces the Monte Carlo idea into GA, which made the algorithm have more powerful search ability. By establishing a mathematical model for the active polarization control system of fiber laser based on the GASA algorithm, we obtained the simulation images of the GASA algorithm under different parameter combinations and analyzed the convergence effect. The simulation results show that when the polarization extinction ratio of output laser is selected as the fitness function, the population number is 90, the mutation probability is 0.7, the crossover probability is 0.001, and the temperature drop ratio is 0.99, the system can achieve the optimal control effect. By comparing the simulation images of GASA algorithm and stochastic parallel gradient descent algorithm, we can see that the GASA algorithm has better ability of global search and jumping out of local optimal values, and can be used in the active polarization control system of fiber laser.

Key words lasers; fiber laser; active polarization control; control algorithm

OCIS codes 140.3510; 260.5430; 140.3298; 170.1650

收稿日期: 2020-08-06; 修回日期: 2020-08-28; 录用日期: 2020-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(61705243)、广东省重点领域研发计划(2018B090904001)

* E-mail: dreamer_7@mail.siom.ac.cn; ** E-mail: bryanho@siom.ac.cn; *** E-mail: junzhouhd@siom.ac.cn

1 引 言

高功率线偏振激光已经广泛应用于引力波探测、相干合成、频率转换以及远程激光通信等领域^[1-5]。高功率线偏振光纤激光器具有结构简单、光束质量好、转化效率高、鲁棒性高等优点,是产生高功率线偏振激光的理想光源^[6]。但是,保偏激光器需要比非保偏激光器更加复杂的光纤制造和熔接技术;非线性效应在保偏放大器中更容易出现,受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)等效应的阈值更低^[7];并且受热光效应影响,保偏激光器更容易出现模式不稳定(MI)现象^[8]。因此,保偏光纤激光器的功率提升比非保偏光纤激光器具有更大的挑战。迄今为止,文献报道的非保偏单纤激光最高输出功率已经超过 20 kW^[9],而保偏光纤激光器的最大功率仅为 2.43 kW^[10]。

对非保偏光纤激光器实施主动偏振控制技术是实现更高输出功率的一种新型技术途径。这一技术途径的实施方案是将算法施加到偏振控制器上,锁定输出激光的偏振态极值,从而在非保偏光纤放大器中得到高消光比的输出光。由于主动偏振控制的光纤激光器工艺相对简单,功率提升空间大,因此具有非常广阔的应用前景。

在光纤激光的主动偏振控制系统中,控制算法是实现高消光比偏振控制的核心技术,对整个系统的收敛时间和输出激光的消光比有着重要的影响,国内外的研究学者对其进行了探索。1989年,Aarts等^[11]首次提出了采用三个光纤挤压器可对非线偏光纤激光进行无限偏振极化控制的概念。2005年,李伟文等^[12]运用模拟退火(SA)算法进行了光纤激光主动偏振的仿真,得到了较稳定的输出偏振态。2008年,王铁城等^[13]用粒子群优化(PSO)算法^[14],对偏振控制系统进行了仿真模拟,得到了较低的搜索误差。2009年,Liu等^[15]提出了一种快速定位(FLA)算法和梯度算法相结合的方法,可以较快速地找到目标的偏振态。2013年,Huang等^[16]在FLA算法基础上提出了快速搜索算法,并且实现了20 mW的主动偏振控制转化验证。2016年,中国工程物理研究院和国防科技大学基于随机并行梯度下降(SPGD)算法的主动偏振控制技术在非保偏光纤激光器中分别实现了1 kW和1.43 kW的激光输出,偏振消光比均优于11 dB^[17-18]。

本文建立了光纤激光主动偏振控制系统的数学

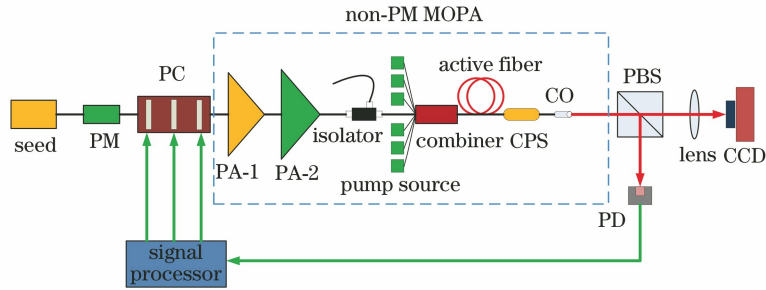
模型,提出了一种改良型遗传退火(GASA)算法,综合了遗传算法(GA)和SA算法的优势,从而具有更强的搜索能力和更快的收敛速度^[19]。传统的GA算法^[20]具有很强的全局搜索能力,并且在算法的自变量较少的情况下具有较大的控制带宽,但是前期容易出现“早熟”现象,陷入局部最优值。而SA算法可以在前期跳出局部最优^[21],弥补GA算法的缺陷。本文模拟了不同参量对于算法收敛特性的影响,分析了GASA算法适合偏振控制系统的最佳参量组合情况,可在20步左右的迭代次数内准确地收敛到全局极大值。通过比较GA算法和SPGD算法可知,GASA算法在主动偏振控制系统中的收敛速度和跳出局部最优解方面展示出独特的优势,具有普适性应用价值。

2 基本原理与理论模型

2.1 非线偏光纤激光主动偏振控制技术的基本原理

高功率光纤激光主动偏振控制技术的主要原理是利用光电探测器将输出激光的偏振误差信号转换为电信号,然后将其输送到算法控制器中;算法控制器通过采用一些优化算法产生补偿信号,反馈到激光器前端的偏振控制器上,对输出激光的偏振误差进行补偿,从而实现非保偏光纤激光器的近线偏振激光输出。

光纤激光主动偏振控制系统装置图如图1所示,种子激光经过偏振控制器(PC)后,进入两级预放,实现激光功率的预放大,输出功率为数十瓦级。预放输出的激光与高功率泵浦源在泵浦信号合束器中合束,然后注入大模场双包层增益光纤,实现激光的高功率放大。包层光滤除器(CPS)用于滤除残余的包层激光。高功率激光经过准直后输出,由于整个光纤链路为非保偏放大器,所以输出激光为部分偏振激光。该高功率激光经过偏振分光棱镜(PBS)进行激光偏振检测,分成沿水平方向和垂直方向偏振的两束光,将其中一束光通过高反射镜进行微弱激光的采样,并使用光电探测器将光信号转化为电信号用于反馈控制。探测到的电信号加载到信号处理器中(如数字信号处理器或可编程逻辑门阵列),进行分析处理后反馈给偏振控制器。信号处理器中的控制算法通过改变种子光的偏振态,对输入的电信号进行极大和极小值搜索和锁定,从而实现高消光比的偏振激光输出。



PM: phase modulation; PC: polarization controller; PA: pre-amplifier; CPS: cladding pump laser stripper; CO: collimation; PBS: polarization beam splitter; PD: photodetector; CCD: charge coupled device; non-PM MOPA: non polarization maintained master oscillator power amplification

图 1 光纤激光主动偏振控制系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of fiber laser active polarization control system

2.2 延迟量型偏振控制器的数学模型

偏振控制器(PC)是偏振自适应控制系统的核心器件,按照偏振控制器的控制原理可以分为延迟量型 PC、相位角型 PC 和延迟量-相位角型 PC 三种。其中延迟量型 PC 具有响应速度快,便于用电驱动的特点,最适合作为偏振预补偿的执行器件。常见的延迟量型偏振控制器包括:基于电光效应的

液晶型 PC 和基于压电效应的光纤挤压型 PC。

对于延迟量型偏振控制器,3 个相移变化范围是 $0 \sim 2\pi$ 的延迟量模块就可以实现所有偏振态的遍历性^[22],第 4 个延迟量模块是辅助模块,是为了防止偏振控制器在无端复位过程中导致的偏振态的突变。每一个延迟量模块的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{A}(\alpha, \delta) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(i\delta/2) & 0 \\ 0 & \exp(-i\delta/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: α 表示延迟量模块的快轴与水平方向的夹角。一般情况下 3 个模块的 α 分别取 $0^\circ, 45^\circ, 0^\circ$ ^[23]。 δ 为偏振控制器对光的偏振态产生的相移,变化范围是 $0 \sim 2\pi$ 。为了简化分析,忽略偏振控制过程中的无端复位,将 3 个相移模块的偏振控制器作为研究对象。

$$\mathbf{A}(\delta_1, \delta_2, \delta_3) = \mathbf{A}_3(0^\circ, \delta_3) \mathbf{A}_2(45^\circ, \delta_2) \mathbf{A}_1(0^\circ, \delta_1). \quad (2)$$

任意光的琼斯矢量可以表示为

$$\mathbf{E}_{in} = \begin{Bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \exp(i\varphi) \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

式中: θ 为偏振态的方位角; φ 为两个光矢量之间的相位差。那么输出光的琼斯矢量可以表示为

所以整个偏振控制器的琼斯矩阵可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{out} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} &= \mathbf{A}(\delta_1, \delta_2, \delta_3) \mathbf{E}_{in} = \mathbf{A}_3(0, \delta_3) \mathbf{A}_2\left(\frac{\pi}{4}, \delta_2\right) \mathbf{A}_1(0, \delta_1) \mathbf{E}_{in} = \\ & \begin{bmatrix} \exp\left[\frac{i(\delta_1 + \delta_3)}{2}\right] \cdot \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cdot \cos \theta - \exp\left[\frac{i(2\varphi - \delta_1 + \delta_3)}{2}\right] \cdot \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cdot \sin \theta \exp\left[\frac{i(\delta_1 - \delta_3)}{2}\right] \cdot \\ \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cdot \cos \theta - i \exp\left[\frac{i(2\varphi - \delta_1 - \delta_3)}{2}\right] \cdot \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cdot \sin \theta \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

定义 E_x^* 为 E_x 的复共轭, E_y^* 为 E_y 的复共轭,则输出光在水平和垂直两个偏振分量的光强可以表示为

$$\begin{aligned} I_x = E_x E_x^* &= \text{sqrt} \left\{ \left[\cos\left(\frac{\delta_1 + \delta_3}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos \theta - \sin\left(\frac{\delta_3 - \delta_1 + 2\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \sin \theta \right]^2 + \right. \\ & \left. \left[\sin\left(\frac{\delta_1 + \delta_3}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos \theta + \cos\left(\frac{\delta_3 - \delta_1 + 2\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \sin \theta \right]^2 \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$I_y = E_y E_y^* = \text{sqr}t \left\{ \left[\sin\left(\frac{2\varphi - \delta_1 - \delta_3}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \sin \theta + \cos\left(\frac{\delta_1 - \delta_3}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos \theta \right]^2 + \left[\cos\left(\frac{2\varphi - \delta_1 - \delta_3}{2}\right) \cos\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \sin \theta - \sin\left(\frac{\delta_1 - \delta_3}{2}\right) \sin\left(\frac{\delta_2}{2}\right) \cos \theta \right]^2 \right\}. \quad (6)$$

2.3 遗传退火算法原理

GASA 算法的流程图如图 2 所示,可将其具体

归结为 3 个部分:初始化种群操作、遗传操作和模拟退火种群更新操作。

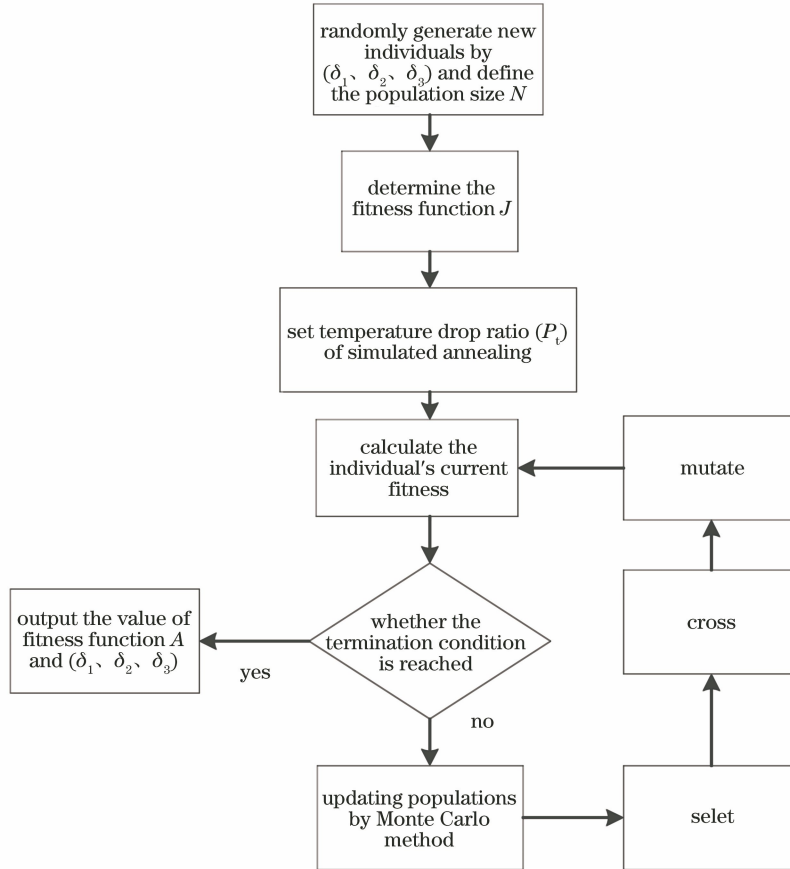


图 2 GASA 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of GASA algorithm

初始化种群操作就是将随机生成的相位延迟量组合 $(\delta_1, \delta_2, \delta_3)$ 进行二进制编码,作为种群中的一条染色体,每个个体拥有一条特定的染色体。重复初始化 N 次,就可以得到数量为 N 的种群。然后对 GASA 算法的适应度函数进行选择,将其作为评价个体优劣的标准函数,并计算每个个体的种群适应度。

遗传操作包括选择、交叉和变异。其中,本文的选择操作采用“轮盘赌”的选择方式,即每个个体被选中的概率 P 与其适应度的大小成正比,用数学式可以表示为

$$P(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^N f(x_j)}, \quad (7)$$

式中: $f(x_i)$ 为个体的适应度函数; $\sum_{j=1}^N f(x_j)$ 为

种群的适应度函数之和。

交叉操作在遗传操作中出现的概率比较大,对于维持种群的多样性具有非常重要的意义,是产生不同适应度个体的主要途径。本文采用算术交叉的方法,即在两个父代染色体上以一定的规则选择交叉位点,对两个等位基因进行交叉互换,产生两个新的子代染色体。算术交叉的过程可以表示为

$$\begin{cases} X_A^{i+1} = \gamma X_A^i + (1 - \gamma) X_B^i \\ X_B^{i+1} = \gamma X_B^i + (1 - \gamma) X_A^i \end{cases}, \quad (8)$$

式中: X_A^i, X_B^i 为父代个体; X_A^{i+1}, X_B^{i+1} 为子代个体; $\gamma = \exp(-a_0 M/T)$ 表示为交叉点的位置, a_0 为设置的常数, M 为当前迭代次数, T 为当前温度。

变异操作是针对单个染色体进行的,在遗传操

作中出现的概率比较小,但是却可以起到引入新的基因进入群体的作用,对于维持种群的多样性同样不可或缺。变异的操作可以表述为:首先,设置算法的变异概率 P_m ,然后,生成一个(0,1)的随机数 β ,如果 $\beta < P_m$,那么在染色体上随机生成一个位置,对其进行“0”、“1”互换操作。如果 $\beta > P_m$,那么就不进行变异操作。为了防止算法出现振荡特征,一般变异概率 P_m 应设置较小的数值。

模拟退火种群更新操作是在设置的模拟退火温度范围内,对前后两代个体的更替环节使用模拟退火思想。

假设 f_1, f_2 分别为迭代前后的两代适应度函数值, $\text{rand}(0,1)$ 表示生成的 0 到 1 之间的随机数, T 为温度系数,令 $\Delta f = f_2 - f_1 \geq 0$,则选择过程可以表示为

$$\begin{cases} \text{if } \text{rand}(0,1) \leq \exp\left(-\frac{\Delta f}{T}\right), & \text{accept } f_2 \\ \text{else,} & \text{accept } f_1 \end{cases} \quad (9)$$

由于更新函数 $T' = P_t \times T$ (P_t 为温度下降的比率),随着迭代次数的增多, $\text{rand}(0,1) > \exp\left(-\frac{\Delta f}{T}\right)$ 的概率会逐渐增大,即在 $\Delta f > 0$ 时,最开始接受新解的概率比较小,后来接收新解 f_2 的概率会越来越大,这就较好地避免了算法的过早收敛问题,可以在算法的前期跳出局部最优解。然后对所有被保留的个体的适应度进行“轮盘赌”选择,最终挑选出适应度最高个体,作为问题的一组最优解。

3 数值仿真与结果分析

根据(6)式表示的原理,生成随机的 φ, θ 值,对系统进行基于 GASA 算法的仿真。在 GASA 算法中,影响算法收敛的主要参量是遗传算法中的适应度函数 J 、初始种群数量 N 、染色体交叉的概率 P_c 、变异的概率 P_m 以及模拟退火选择中的温度下降比例 P_t 。因此,为了实现遗传退火算法在光纤激光主动偏振控制模型中的最优控制效果,本文通过分别改变不同的参量,对影响 GASA 算法收敛的因素进行研究。

3.1 适应度函数

适应度函数是影响 GASA 算法收敛的参量之一。在算法仿真的过程中,可以选择的适应度函数主要有 3 种。

$$J_1 = I_y, \quad (10)$$

$$J_2 = \frac{I_y - I_x}{I_y + I_x}, \quad (11)$$

$$J_3 = 10 \lg(I_y/I_x), \quad (12)$$

式中: J_1 表示垂直方向的偏振分量的光强度; J_2 表示输出激光的偏振度; J_3 表示输出激光的偏振消光比。在相同的算法参量下,对不同的适应度函数进行仿真。为了得到更加有统计意义的结论,对每种适应度函数进行多次运行取平均值。为了便于比较以及进行归一化处理,不同的适应度函数取得的收敛值最终都被写成了偏振度的形式,范围为(0,1)。图 3 为算法在不同适应度函数情况下收敛得到的偏振度和迭代次数的关系曲线图。

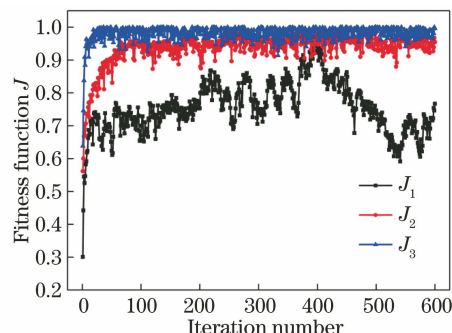


图 3 不同适应度函数下的收敛曲线

Fig. 3 Convergence curves for different fitness functions

由图 3 可知,对于 GASA 算法,在 3 种适应度函数的选取中, J_2, J_3 的收敛效果远远好于 J_1 的收敛效果, J_3 的收敛速度明显大于 J_2 , 并且 J_3 收敛后的值更加接近于全局最优值 1, 具有最好的收敛效果。因此在下文中,将选择 J_3 作为控制系统的适应度函数。

3.2 初始种群数量

种群数量 N 是影响 GASA 算法的重要参量之二。一般情况下,当种群数量比较多时,算法寻找全局最优解的能力将会增强,但是会延长算法到达最优值的时间;种群数量比较少时,算法的全局搜索能力减弱,但是收敛时间也会缩短。因此,种群数量不宜过大也不宜过小,一般选择 10~100 为宜。因此,将遗传退火算法应用到主动偏振控制系统中,以 J_1 作为适应度函数,分别选择 20、50、60、70、80、90、100 作为种群数量,对系统进行仿真实验,得到的结果如图 4 所示。

从图 4(a)可以看出,当 $N=20$ 时,由于种群个体数量较少,算法收敛所用的时间最长;当 $N=50, 60, 70, 80, 100$ 时,算法收敛的速度相当,在 16 步左右时可以收敛到极大值 1 附近;当 $N=90$ 时,算法的收敛速度最快,仅 4 步左右即收敛到极大值附近。从图 4(b)可以看出,当 $N=20, 50, 60, 70, 80$ 时,搜

索 100 步后适应度函数的值随着种群数量的增加而呈现下降趋势。在 $N=80$ 时,该值取得极小值;当 $N=90$ 时,该值迅速抬升,取得极大值;当 $N=100$

时,该值又开始回落。综上所述,优化选择 $N=90$ 作为偏振控制算法的种群数量有利于提高收敛速度和跳出局部最优值。

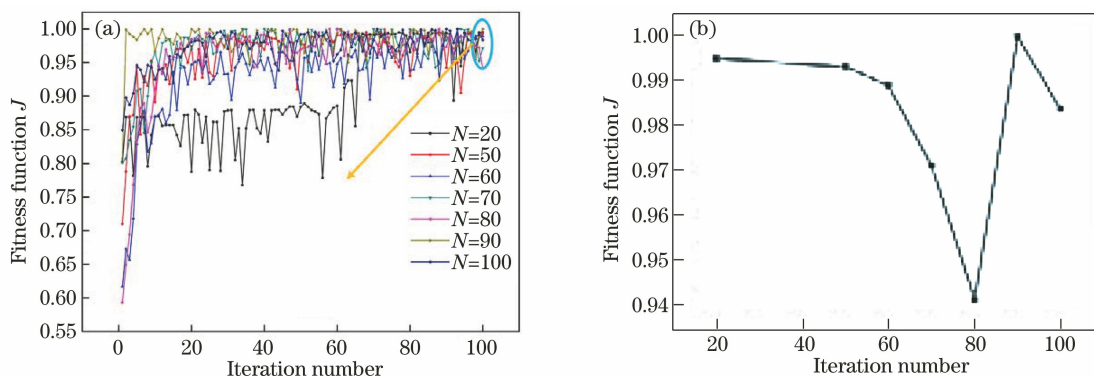


图 4 $N=20, 50, 60, 70, 80, 100$ 时,适应度函数的收敛曲线。(a)适应度函数随迭代步数的收敛曲线;
(b)算法最后一步时适应度函数的值

Fig. 4 Convergence curves of fitness function for $N=20, 50, 60, 70, 80, 100$. (a) Convergence curves of fitness function with iteration number; (b) value of fitness function at the last step

3.3 染色体交叉的概率

染色体交叉的概率 P_c 是影响 GASA 算法收敛的重要参量之三。当 P_c 过大时,算法中高适应度个体的结构很快就会被破坏,使得算法不容易被收

敛;当 P_c 过小时,搜索过程相对缓慢,算法甚至会停滞不前。一般 P_c 的值应选择在 $0.4 \sim 0.98$ 。因此,分别选择 $P_c=0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$,对系统进行仿真实验,得到的结果如图 5 所示。

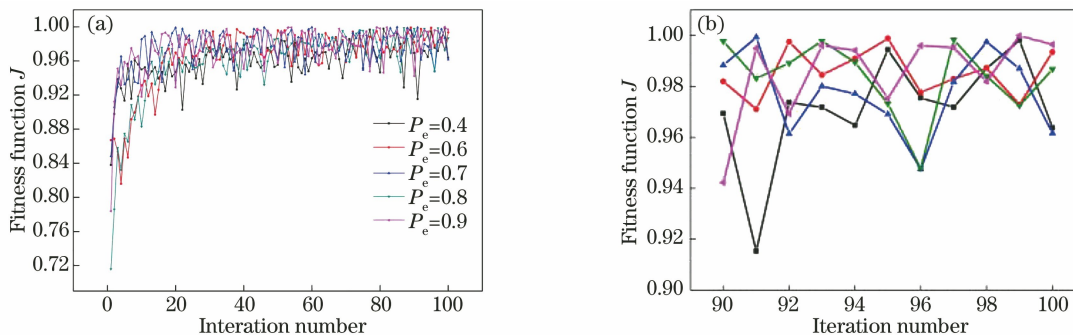


图 5 $P_c=0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ 时的适应度函数收敛曲线。(a)适应度函数随迭代步数的收敛曲线;
(b)算法在第 90~100 步时适应度函数的值

Fig. 5 Convergence curves of fitness function for $P_c=0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$. (a) Convergence curves of fitness function with iteration number; (b) value of fitness function at the step of 90 to 100

从图 5 可以看出,当 $P_c=0.4$ 时,算法的搜索速度非常缓慢,且会产生较强的振荡,直至 100 步时也没有收敛到极值 1 附近;当 $P_c=0.9$ 时,算法收敛速度比较快,但在收敛结束后振荡也比较严重,不利于提高消光比的稳定性;当 $P_c=0.7$ 时,算法的收敛速度最快,且收敛后的振荡幅度较小。因此,优化选择适中值 $P_c=0.7$ 作为控制算法的交叉概率。

3.4 染色体变异的概率

染色体变异概率 P_m 是影响 GASA 算法收敛性能的重要参量之四。如果变异概率 P_m 取值过小,则不易产生新个体结构;如果取值过大,则会退

化成纯粹的随机搜索算法,甚至使算法产生振荡,难以收敛。一般 P_m 的取值在 $0.0001 \sim 0.2$,于是分别取 $P_m=0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 0.2$ 。对系统进行仿真实验,得到的结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,当 $P_m=0.001$ 时,算法最终收敛到了极大值 1,且搜索用时很少;当 $P_m=0.0001$ 和 $P_m=0.01$ 时,算法陷入了局部极值,分别稳定到了 0.9725 和 0.9842,无法继续优化搜索;当 $P_m=0.1$ 和 $P_m=0.2$ 时,由于 P_m 取值过高,算法产生了持续振荡,无法进行收敛。因此将 P_m 优化选择在 0.001 左右,即 10^{-3} 量级比较合适。

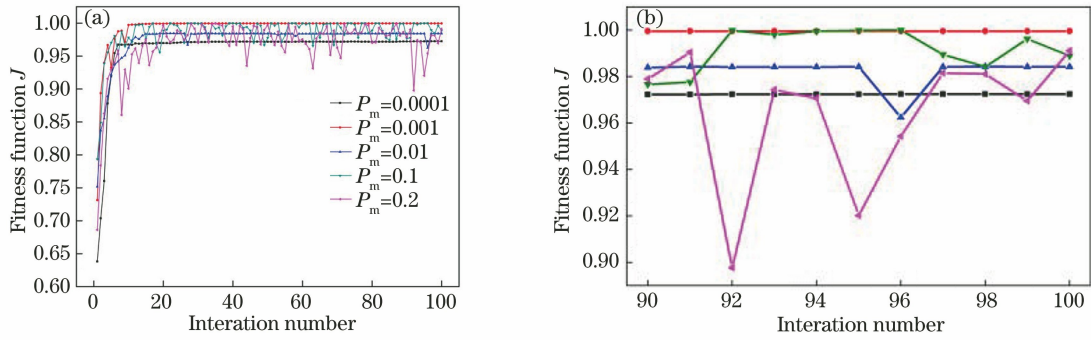


图 6 $P_m=0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 0.2$ 时的适应度函数收敛曲线。(a)适应度函数随迭代步数的收敛曲线；
(b)算法在第 90~100 步时适应度函数的值

Fig. 6 Convergence curves of fitness function for $P_m=0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 0.2$. (a) Convergence curves of fitness function with iteration number; (b) value of fitness function at the step of 90 to 100

3.5 模拟退火选择中的温度下降比率

模拟退火选择是 GASA 算法中非常重要的环节,温度下降比率影响着算法跳出局部最优解的能力。将模拟退火的初始温度设置为 90,终止温度设置为 89,温度下降比率分别设置为 $P_t = 0.99, 0.97, 0.95, 0.93, 0.91$,对其分别进行仿真实验,得到的结果如图 7 所示。

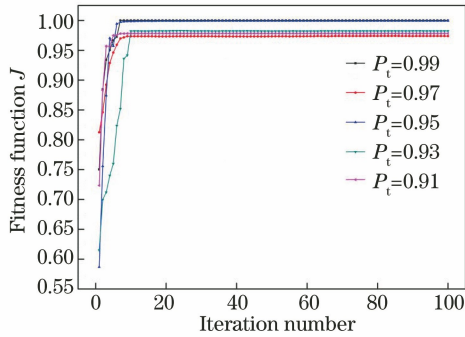


图 7 $P_t=0.99, 0.97, 0.95, 0.93, 0.91$ 时的适应度函数收敛曲线

Fig. 7 Convergence curves of the fitness function for $P_t=0.99, 0.97, 0.95, 0.93, 0.91$

如图 7 所示,温度下降比率 P_t 主要影响算法跳出局部最优值的能力。由图 7 的结果可知,当 $P_t = 0.99$ 时,算法收敛的能力最强,完全收敛到了“1”,并且在“1”处保持稳定;其次是当 $P_t = 0.95$ 时,算法收敛到了 0.991。当 $P_t = 0.97, 0.93$ 和 0.91 时,算法都收敛于 0.97 附近,不具有很好的跳出局部最优解的能力。因此,优化选择 $P_t = 0.99$ 作为控制算法的温度下降比率。

4 算法比较与分析

SPGD 算法是以梯度下降算法为基础,结合串

行扰动法和多通道小抖动法的新梯度下降算法^[24]。双向扰动的 SPGD 算法前后两代之间的迭代公式可以写为

$$u^{(k+1)} = u^{(k)} + r\delta u^{(k)}(J^+ - J^-), \quad (13)$$

式中: k 为迭代次数; u 为施加的控制电压; δu 为扰动电压; r 为迭代步长; J^+ 为施加正向扰动后的评价函数; J^- 为施加负向扰动后的评价函数。因此,决定 SPGD 算法收敛特性的参量包括扰动电压的幅值 δu 和迭代步长 r 。为了研究 SPGD 算法中各参量的取值和算法收敛的关系,迭代步长 r 首先被设置为 15。随机扰动序列 $\{\delta u_m\} (m = 1, 2, 3)$ 应该满足均值为 0、方差相等,因此将 $\{\delta u_m\}$ 设置为服从 $(-\delta u, +\delta u)$ 的均匀分布。分别选择 $\delta u = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$,对 SPGD 算法进行仿真实验,得到的收敛曲线如图 8 所示。

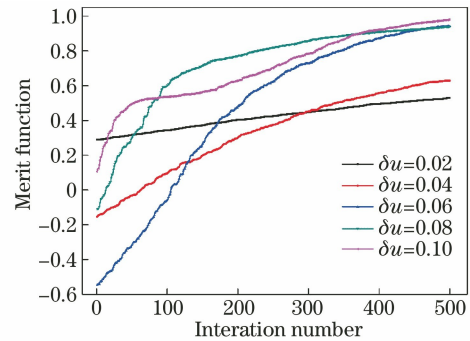


图 8 $\delta u=0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$ 时 SPGD 算法的评价函数收敛曲线

Fig. 8 Convergence curves of evaluation function of SPGD algorithm for $\delta u=0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$

从图 8 可以看出,经过 500 次的搜索之后,当扰动电压 $\delta u = 0.02$ 和 0.04 时,算法收敛速度比较缓慢,分别收敛到了 0.5300 和 0.6287;当扰动电压

$\delta u = 0.06, 0.08$ 和 0.10 时, 算法收敛较快, 分别收敛到了 $0.9415, 0.9398$ 和 0.9791 。但是, 在 $\delta u = 0.10$ 时, 算法产生了微弱的振荡。

在 $\delta u = 0.08$ 和 0.10 的情况下, 令迭代步长 $r = 10, 15, 20, 25, 30$, 得到的收敛曲线分别如图 9 和图 10 所示。为了便于比较, 将上文提出的 GASA 算

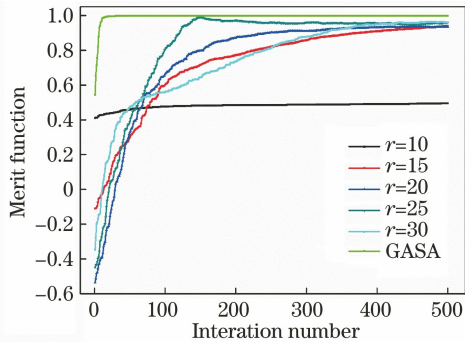


图 9 当 $\delta u = 0.08, r = 10, 15, 20, 25, 30$ 时 SPGD 算法的评价函数收敛曲线

Fig. 9 Convergence curves of evaluation function of SPGD algorithm for $\delta u = 0.08$ and $r = 10, 15, 20, 25, 30$

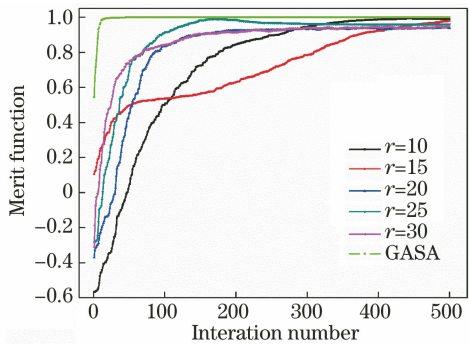


图 10 当 $\delta u = 0.10, r = 10, 15, 20, 25, 30$ 时 SPGD 算法的评价函数收敛曲线

Fig. 10 Convergence curves of evaluation function of SPGD algorithm for $\delta u = 0.10$ and $r = 10, 15, 20, 25, 30$

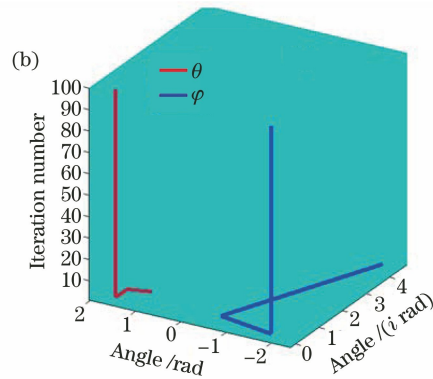
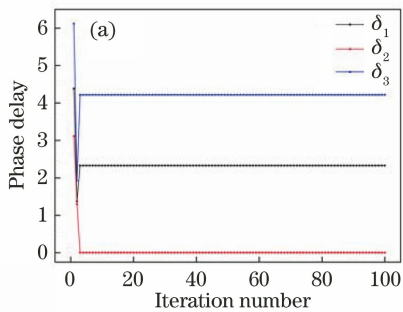


图 11 迭代过程中各个变量的变化曲线图。(a) 延迟量 ($\delta_1, \delta_2, \delta_3$) 相位变化曲线图; (b) 输出光 θ 和 φ 变化曲线图

Fig. 11 Change curves of each variable during the iteration. (a) Phase change curves of delay amounts ($\delta_1, \delta_2, \delta_3$); (b) change curves of output light θ and φ

法的收敛曲线也放在了图 9 和图 10 中。

从图 9 可以看出, 经过 500 次的迭代后, 当 $\delta u = 0.08, r = 10$ 时, SPGD 算法不能收敛; 当 $\delta u = 0.08, r = 15, 20, 25, 30$ 时, SPGD 算法分别收敛在了 $0.9398, 0.9342, 0.9601$ 和 0.9605 。其中, 当 $r = 25$ 时, SPGD 算法的收敛速度最快, 在第 148 次迭代后收敛, 但偏振度又随着迭代次数逐渐减少, 说明 SPGD 算法在一定概率上出现了方向性的错误。从图 10 可以看出, 在 $\delta u = 0.10$ 的情况下, 对于 $r = 10, 15, 20, 25, 30$, SPGD 算法均能完成收敛, 分别收敛到 $0.9891, 0.9791, 0.9379, 0.9597, 0.9488$ 。当 $r = 25$ 时, 算法收敛最快, 在第 180 次迭代后收敛, 但是同样出现了收敛之后下降的方向性问题。对于 GASA 算法, 仅需要 9 次迭代就完成了收敛, 并且最终收敛的值稳定在 0.9995 。因此可以说明, 本文提出的 GASA 算法在收敛速度和跳出局部最优值方面均优于 SPGD 算法。

图 11 所示为在 GASA 算法搜索过程中各模块的延迟量以及偏振态发生的变化。从图 11(a) 可以看出, 在一次收敛效果较好的 GASA 算法的搜索过程中, 各延迟量模块通过迭代搜索, 仅用了 3 步就找到了算法的极大值, 之后各延迟量保持稳定, 说明偏振控制系统维持在了收敛状态。然后, 以 ($\delta_1, \delta_2, \delta_3$) 的变化为基础, 根据 (5) 式所示的关系, 反推出了输出光琼斯矢量中 θ 和 φ 随迭代次数的变化过程, 如图 11(b) 所示, 可以看出, θ 经过前两次的搜索分别改变为 $1.1834 + 0.8279i$ 和 $1.6129 - 0.5714i$, 并于第三次迭代时就到达了 $1.5708 (\approx \pi/2)$, 收敛之后保持恒定, 说明此时的偏振态为线偏振。 φ 经过前两次的搜索分别改变为 $-2.0045 + 4.5103i$ 和 $-0.5755 + 0.3818i$, 第三次迭代的值为 -1.8909 ,

之后保持恒定,说明算法收敛后此偏振光两光矢量的相位差为 -1.8909 。

5 结 论

本文选择输出激光的偏振消光比作为适应度函数,将 GASA 算法加载到光纤激光主动偏振控制系统中进行仿真。通过对算法中不同参量的仿真研究,分析了算法中各个参量的变化对算法的收敛能力造成的影响,得出了适用于偏振控制系统快速收敛效果的优化参量组合,种群数量 N 设置为 90,交叉概率 P_c 设置为 0.7,变异概率 P_m 设置为 0.001,温度下降比率 P_t 设置为 0.99。进而证明了 GASA 算法适用于延迟量型偏振控制器,在搜索速度和跳出局部最优值能力方面具有明显的优势,可以完成任意偏振态的快速转换。

参 考 文 献

- [1] de Varona O, Fittkau W, Booker P, et al. Single-frequency fiber amplifier at $1.5 \mu\text{m}$ with 100 W in the linearly-polarized TEM_{00} mode for next-generation gravitational wave detectors [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 24880-24892.
- [2] Ma P F, Huang L, Wang X L, et al. High power broadband all fiber super-fluorescent source with linear polarization and near diffraction-limited beam quality [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1082-1088.
- [3] Rulkov A B, Ferin A A, Popov S V, et al. Narrow-line, 1178 nm CW bismuth-doped fiber laser with 6.4 W output for direct frequency doubling [J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5473-5476.
- [4] Ma C, Li J L, Chen X, et al. High-resolution tunable fiber laser based on echelle grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1014001.
马成, 李金亮, 陈笑, 等. 基于中阶梯光栅的高分辨率可调谐光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1014001.
- [5] Yu W H, Feng D, Liang R, et al. Polarization axis detection technique of polarization maintaining fiber based on symmetry evaluation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0211001.
于文海, 冯迪, 梁日, 等. 基于对称性评估的保偏光纤偏振轴检测技术 [J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0211001.
- [6] Shi W, Fang Q, Zhu X S, et al. Fiber lasers and their applications [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [7] Agrawal G. Highly nonlinear fibers [M]. Amsterdam: Elsevier, 2013: 457-496.
- [8] Smith A V, Smith J J. Mode instability in high power fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10180-10192.
- [9] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market [C] // CLEO: 2013, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2013.
- [10] Su R T, Tao R M, Wang X L, et al. 2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(8): 085102.
- [11] Aarts W H J, Khoe G D. New endless polarization control method using three fiber squeezers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(7): 1033-1043.
- [12] Li W W, Zhang X M, Chen K S, et al. Application of simulated annealing algorithm on endless polarization controller [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(6): 820-824.
李伟文, 章献民, 陈抗生, 等. 模拟退火算法在无端偏振控制器中的应用 [J]. *光子学报*, 2005, 34(6): 820-824.
- [13] Wang T C, Liu T G, Wan M S, et al. Polarization control for polarization division multiplexing system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, 6(6): 9-12.
王铁城, 刘铁根, 万木森, 等. 偏振复用系统中解复用端的偏振控制算法 [J]. *光学与光电技术*, 2008, 6(6): 9-12.
- [14] Zhu C L, Jiao Q B, Tan X, et al. Fast convergent particle swarm optimization algorithm for subwavelength azimuthally polarized metal grating design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0705002.
朱春霖, 焦庆斌, 谭鑫, 等. 应用于亚波长角向偏振金属光栅设计的快速收敛粒子群算法优化 [J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0705002.
- [15] Liu Y, Chi H, Zhang X M, et al. A novel control scheme for four-plate retardation polarization controller [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, 51(1): 124-128.
- [16] Huang Z M, Liu C L, Li J F, et al. Fiber polarization control based on a fast locating algorithm [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(27): 6663-6668.
- [17] Wang Y S, Yan H, Peng W J, et al. 1 kW narrow linewidth linear polarization fiber laser 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 窄线宽线偏振光纤激光器 [J]. *中国激光*,

- 2016, 43(5): 0519001.
- [18] 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.
- [19] Elbeltagi E, Hegazy T, Grierson D. Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms[J]. Advanced Engineering Informatics, 2005, 19(1): 43-53.
- [20] Whitley D. A genetic algorithm tutorial[J]. Statistics and Computing, 1994, 4(2): 43-53.
- [21] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671-680.
- [22] Zhang Q Y, Zhu Y, Su Y, et al. Research on the polar blind zone of the fiber squeezer polarization controller[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0506001.
- 张启业, 朱勇, 苏洋, 等. 光纤挤压型偏振控制器的“极地盲区”问题研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506001.
- [23] Liao Y B. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 20-22.
- 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 20-22.
- [24] Vorontsov M A, Sivokon V P. Stochastic parallel-gradient-descent technique for high-resolution wavefront phase-distortion correction[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(10): 2745-2758.