

利用改进粒子群优化算法解调光传感重叠光谱信号

陈勇¹, 程亚男¹, 刘焕淋²

¹重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065;

²重庆邮电大学光纤通信技术重点实验室, 重庆 400065

摘要 利用光纤布拉格光栅(FBG)构建大型传感网络时,在相同带宽的条件下,为了增加传感器的数量,会尽可能多地写入光纤光栅,因此将导致部分光谱发生重叠,使 FBG 中心波长识别困难,解调精度降低。为此,提出一种改进粒子群优化(PSO)算法,以提高中心波长的识别精度。结合光谱形状复用技术构建重叠光谱模型,搭建温度实验系统来获取重叠光谱信号,并对 PSO 算法中的权重因子和学习因子进行了改进,利用所提算法对重叠光谱模型参数进行优化,并将其与 6 种优化算法进行对比。仿真与实验结果表明,所提算法与对比算法相比,具有收敛速度快、运行时间短、波长识别精度高的特点,且波长解调误差均小于 1 pm,验证了算法的有效性和可行性。

关键词 光谱学; FBG 传感网; 光谱形状复用; 重叠光谱; 粒子群优化算法; 精确解调

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0710003

Demodulation of Light Sensing Overlapping Spectral Signal by Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

Chen Yong¹, Cheng Yanan¹, Liu Huanlin²

¹Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Network Control, Ministry of Education, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

²Key Laboratory of Optical Fiber Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract When we construct a large distributed sensing network by fiber Bragg grating (FBG), under the condition of same bandwidth, we fabricate as many fiber gratings as possible to increase the number of sensors, which leads to overlapping spectra and makes FBG central wavelength recognition difficult and reduces the demodulation accuracy. In order to solve this problem, we propose an improved particle swarm optimization (PSO) algorithm to improve the recognition accuracy of the central wavelength. First, the overlapping spectra model is established by spectral shape multiplexing technology. Then, the temperature experiment system is built to get the overlapping spectral signals, and the weight factor and the learning factor in the PSO algorithm are improved. Finally, the proposed algorithm is used to optimize the parameters of the overlapping spectra model, and it is compared with the six optimization algorithms. Simulation result and experimental result show that the proposed algorithm has the characteristics of fast convergence speed, short running time and high wavelength recognition accuracy compared with the contrast algorithm, and the wavelength demodulation error is less than 1 pm, which verifies the effectiveness and feasibility of the algorithm.

Key words spectroscopy; fiber Bragg grating sensor network; spectral shape multiplexing; overlapping spectra; particle swarm optimization algorithm; accurate demodulation

OCIS codes 300.6170; 060.3735; 070.2025; 070.1060

收稿日期: 2018-02-07; 收到修改稿日期: 2018-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(61275077, 61571072)、重庆市基础与前沿研究项目(2015jcyjA40024)

作者简介: 陈勇(1963—),男,博士,教授,主要从事光纤传感检测及其信号处理方面的研究。

E-mail: chenrong@cqupt.edu.cn

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有耐腐蚀、耐高温、体积小、高灵敏度、不受电磁干扰等优点,被广泛应用于对桥梁结构的健康监测^[1]、对海底石油管道的泄露监测^[2]以及对大型建筑物的安全监测^[3]等。考虑到被检测物的体积一般较大,需用准分布式FBG传感网络监测多个点^[4]。目前的组网技术主要有:波分复用技术、时分复用技术、空分复用技术等^[5-6]。由于受光源带宽和FBG工作范围的限制,每种复用技术可复用的传感器数量一般少于10个,不能满足实际需求,因此研究一种扩大FBG传感网容量的方法极为重要。

文献[7]将中心波长相近的FBG“串联”放置,与“并联”放置相比,其更灵活、普遍,但产生的重叠光谱解调困难;文献[8]利用模拟退火算法识别FBG重叠光谱,该方法可增加传感网中的FBG数量,但其全局搜索能力差,易受参数的影响;文献[9]利用遗传算法解调FBG重叠光谱,但其存在收敛速度慢、局部搜索能力弱且运行时间长的缺点;粒子群优化(PSO)算法相比于其他智能优化算法,具有收敛速度较快、运行时间较短、局部和全局搜索能力较强的优点,因此近年来诸多学者利用PSO算法来解决参数优化的问题^[10-16]。在文献[11]中,PSO算法中的权重因子和学习因子采用固定值,收敛速度慢,且算法易陷入局部最优;文献[12]改进了PSO算法

的速度更新公式,加快了收敛速度,但解调精度仍不理想;文献[15]中的PSO算法采用动态权重因子和学习因子,不仅加快了收敛速度,也提高了解调精度,但解调误差仍为几十皮米;文献[16]利用PSO算法解调X光谱(一种高斯型的重叠光谱),虽然该算法的初始值是随机设定的,但仍可能陷入局部最优,不能搜索到全局最优值。

针对传感网中FBG容量不足的问题,在带宽不变的情况下,本文采用同一波段内写入多个FBG,并结合光谱形状复用技术扩大传感网监测点;针对上述文献中PSO算法识别FBG重叠光谱时易陷入局部最优、收敛速度较慢且求解精度不高等问题,提出了一种改进的粒子群优化算法,即动态粒子群优化(DPSO)算法,对构建的重叠光谱模型进行参数优化,以精确解调FBG漂移后的中心波长。

2 重叠光谱模型的建立

当FBG受到温度和均匀应变作用时,其光谱形状不会发生变化,但其中心波长会产生一定的漂移,导致多个具有相同中心波长的FBG传感器的光谱会出现重叠,即利用其特性可在同一波段内放置几个FBG传感器,每个FBG分别对应一个监测点。因此,在现有光源带宽不变的情况下,通过光谱形状复用技术可大大增加传感系统中FBG的数量,实现对大型结构的健康监测。大容量FBG传感系统的原理图如图1所示。

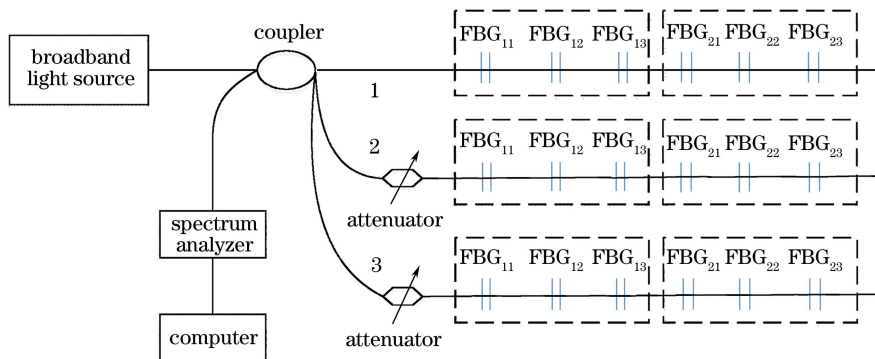


图1 大容量FBG传感系统原理图

Fig. 1 Schematic of large capacity FBG sensing system

在图1中,左边列(第1组)内的FBG为同一波段内中心波长相近的传感器,右边列(第2组)内的FBG为另一波段内中心波长相近的传感器。其中,衰减器用以区分不同通道中同一波段内的FBG形成的幅值不同的反射谱,以识别受外界作用的FBG的位置。

假设 $g_{ij}(\lambda)$ 为第 i 组中第 j 个FBG未受作用时的反射光谱,根据光谱形状不变的原理, $g_{ij}(\lambda)$ 只发生中心波长漂移,那么光谱仪接收到每个波段上的原始光谱可以表示为

$$R(\lambda) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_{ij} g_{ij}(\lambda - \lambda_{ij}) + N(\lambda), \quad (1)$$

式中: m 为 FBG 的组数, 此处取 $m=2$; n 为一组内 FBG 的个数, 此处取 $n=3$; r_{ij} 为第 i 个波段内第 j 个 FBG 的反射率, 取值为 $0\sim 1$; $g_{ij}(\lambda - \lambda_{ij})$ 为第 i 个波段内第 j 个 FBG 的反射功率谱, 近似为高斯型; λ_{ij} 为第 i 个波段内第 j 个 FBG 受外界环境作用后的中心波长; $N(\lambda)$ 为系统噪声, 一般为高斯白噪声。 $g_{ij}(\lambda - \lambda_{ij})$ 的表达式为

$$g_{ij}(\lambda - \lambda_{ij}) = r_{ij} \exp \left[(-4 \ln 2) \left(\frac{\lambda - \lambda_{ij}}{B_G} \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中: B_G 为 FBG 的 3 dB 带宽, 理论上为 0.2 nm。

利用 $g_{ij}(\lambda)$ 构造出一个新的合成光谱, 即:

$$R'(\lambda) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 r_{ij} g_{ij}(\lambda - s_{ij}), \quad (3)$$

式中: s_{ij} 为重构 FBG 反射谱的中心波长。通过实验不断改变 s_{ij} 的值得到一系列光谱, 使其包含第 1 组和第 2 组内所有光谱的重叠情况。

上述原始光谱与合成谱的方差表示为

$$G(s) = \sum_{k=1}^K [R(\lambda) - R'(\lambda)]^2, \quad (4)$$

式中: K 为光谱采样点数, 此处取 $K=1000$ 。由(4)式可知: 当 $s_{ij} = \lambda_{ij}$ 时, $G(s)$ 的值最小, 也就是说, $G(s)$ 最小时对应的 s_{ij} 即为 FBG 漂移后的中心波长, 因此 FBG 中心波长的识别问题即可转化为多参数寻优问题。

3 PSO 算法的改进

PSO 算法^[10]描述为: 在一个 D 维搜索空间中, 群体中每个个体被视为一个搜索粒子, 粒子的搜索空间为整个 D 维区域, 粒子的当前位置为对应优化问题中的一个候选解。针对本研究中的问题, 第 q 个粒子的构成为 $p_q(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_l)$, 其中 l 为待寻峰的个数, λ_l 为 FBG 的中心波长, 搜索空间为 l 维。每个粒子根据其速度和位置更新公式进行更新, 产生新的候选解, 通过不断的迭代, 最终获得全局最优解(最优粒子的位置), 即得到 FBG 漂移后的中心波长。粒子的速度和位置表达式如下

$$v_{a,b}(t+1) = \omega v_{a,b}(t) + c_1 \text{rand}_1 [p_{\text{best}_{a,b}} - x_{a,b}(t)] + c_2 \text{rand}_2 [g_{\text{best}_{a,b}} - x_{a,b}(t)], \quad (5)$$

$$x_{a,b}(t+1) = x_{a,b}(t) + v_{a,b}(t+1), \quad (6)$$

式中: $a=1, \dots, N$ (N 为种群规模); $b=1, \dots, D$ (D 为空间维度); t 为当前迭代次数; ω 为权重因子, $\omega \in [0, 1]$; c_1 和 c_2 分别为自我学习因子、社会学习因子, $c_1 \in [0, 2]$, $c_2 \in [0, 2]$; $p_{\text{best}_{a,b}}$ 、 $g_{\text{best}_{a,b}}$ 分别为个体最优

值、全局最优值; rand_1 、 rand_2 为 $0\sim 1$ 间的随机数。

利用基本 PSO 算法^[11]对构建的重叠光谱模型进行参数寻优时, 由于每次迭代过程中的权重因子和学习因子都在固定的范围内随机变化, 故会出现收敛速度慢、运行时间长且跳不出局部最优的情况。因此, 需要对基本 PSO 算法进行改进。

3.1 PSO 算法的改进(DPSO 算法)

3.1.1 改进权重因子

ω 在 PSO 搜索算法中具有重要意义。若 ω 较大, 可进行全局搜索, 有利于总群体的多样性; 若 ω 较小, 可进行局部搜索, 有利于算法的收敛性。而基本 PSO 算法中的 ω 为 $0\sim 1$ 间的常数, 不利于增加种群多样性和提高算法收敛性。因此, 改进的权重因子如下:

$$\omega_t = \begin{cases} \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{T} t, & 1 \leq t < (2T)/3 \\ \omega_{\min}, & (2T)/3 \leq t \leq T \end{cases}, \quad t=1, \dots, T, \quad (7)$$

式中: t 、 T 分别为当前、最大迭代次数; ω_{\min} 、 ω_{\max} 分别为最小、最大权重因子^[16]。

由式(7)可知: 在算法前期 [$t < (2T)/3$], ω 线性递减, 即迭代初期 ω 较大, 使算法进行全局搜索, 增加了种群多样性; 随着 ω 逐渐减小, 进行了深入的局部搜索, 增加了算法的开采性; 在算法后期 [$t > (2T)/3$], 利用 ω_{\min} 以最小步长不断进行搜索, 逐渐逼近全局最优值。

3.1.2 学习因子改进

本研究采用动态 c_1 和 c_2 , 使 c_1 呈递减的趋势, c_2 呈递增的趋势, 即在搜索初期粒子主要依靠自身的历史信息, 在后期主要依靠群体信息, 从而增加群体的多样性, 使粒子跳出局部最优, 达到全局最优。改进的 c_1 和 c_2 如下:

$$\begin{cases} c_1 = \exp \left[\frac{\ln 2}{T} (T - t + 1) \right] \\ c_2 = \exp \left[\frac{\ln 2}{T} (t - 1) \right] \end{cases}. \quad (8)$$

3.1.3 适应度函数

由第 2 节可知, 通过求解 $G(s)$ 的最小值可获取 FBG 漂移后的中心波长, 因此 DPSO 算法中的适应度函数即为(4)式。

3.2 FBG 重叠光谱解调步骤及流程

首先构造 FBG 传感网重叠光谱模型, 然后采用 DPSO 算法优化模型中的参数, 进而得到 FBG 漂移后的中心波长。利用 DPSO 算法解调 FBG 重叠光谱信号的流程图如图 2 所示。

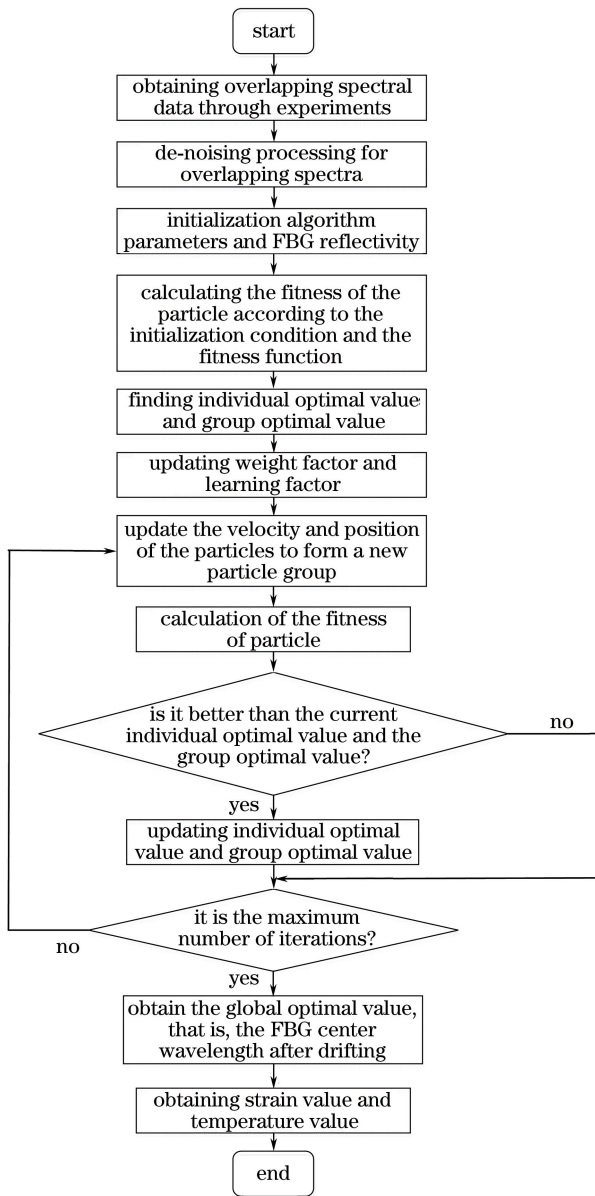


图 2 DPSO 算法解调重叠光谱流程图

Fig. 2 Flow chart of demodulating overlapping spectra using DPSO algorithm

利用所提 DPSO 算法解调 FBG 重叠光谱信号的步骤如下：

- 1) 算法开始,通过第 4 节中的实验获得重叠光谱数据,并对含噪光谱信号进行去噪处理;
- 2) 初始化 DPSO 算法参数,设置最大迭代次数及 r_{ij} ;
- 3) 根据初始化条件和适应度函数计算粒子的适应度值;
- 4) 获得整个群体中的个体最优值和全局最优值;
- 5) 根据(7)、(8)式更新权重因子和学习因子,并根据(5)、(6)式更新粒子的速度和位置,形成新的粒子群体;

- 6) 计算所有更新后的粒子的适应度值;
- 7) 依次判断每个粒子的适应度值是否比当前个体最优值和全体最优值更优;若更优,则更新个体最优值和全体最优值;否则进入下一步;
- 8) 判断是否达到最大迭代次数;若满足,则获得全局最优粒子位置,即 FBG 受外界环境作用后的中心波长;否则转入步骤 5);
- 9) 根据 FBG 波长变化量与温度的关系式,计算 FBG 所受外界温度的影响;
- 10) 算法结束。

4 实验与结果分析

4.1 实验系统的搭建

实验采用 5 个 FBG 传感器,分别为 FBG_{11} 、 FBG_{12} 、 FBG_{21} 、 FBG_{22} 和 FBG_{23} ,在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下它们的中心波长分别为 1524.825 、 1525.310 、 1549.838 、 1550.320 、 1550.736 nm ,光纤弹光系数 P_{11} 、 P_{12} 分别为 0.120 、 0.275 ,泊松比为 0.17 。

以图 1 中的光路 1 为例,搭建实验系统平台。实验原理如图 3 所示,宽带光源发出的光从端口 1 进入环形器,经过端口 2 后进入 FBG 阵列,符合 FBG 中心波长的光被反射回来,从端口 3 进入光谱分析仪,利用计算机对获得的信号进行提取并处理。

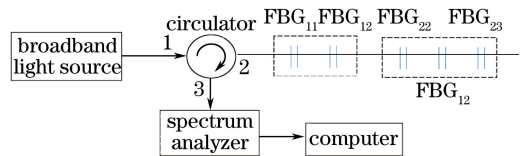


图 3 FBG 光谱形状复用传感系统原理图

Fig. 3 Schematic of sensing system of FBG spectral shape multiplexing

根据上述原理图搭建了温度传感实验平台,如图 4 所示。整个系统主要由宽带光源、环形器、FBG 传感器、温控箱、光谱分析仪、光纤熔接机、计算机组成。其中: Superk Compact 宽带光源(NKT Photonics 公司,丹麦)的平均输出功率为 100 mW ,其波长覆盖范围为 $500\sim 2400\text{ nm}$;环形器型号为 PIOC-3-15-P-2-1-0(绵阳全光通信科技有限公司),操作波长为 $(1550\pm 30)\text{ nm}$;温控箱的型号为 SLTD1-150(天津市精易工贸有限公司),控温范围为 $0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,控温精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;光谱分析仪型号为 Agilent 86142B,其波长扫描范围为 $600\sim 1700\text{ nm}$,解调精度为 10 pm 。

共进行了两组实验;第 1 组将 FBG_{11} 、 FBG_{12} 传感器连接在实验系统中, FBG_{11} 置于温控箱中,

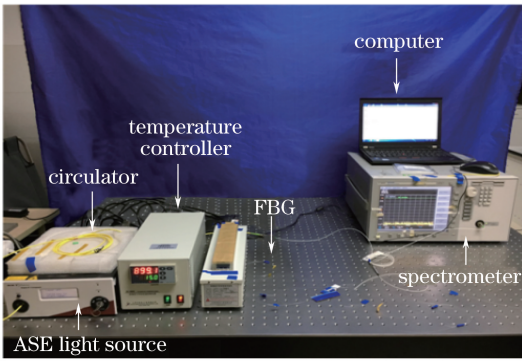


图 4 FBG 温度传感系统

Fig. 4 FBG temperature sensing system

FBG₁₂置于室温中,调节温度在 35~65 °C 内变化,每隔 5 °C 记录一次实验数据;第 2 组将 FBG₂₁、FBG₂₂、FBG₂₃ 传感器连接在实验系统中,FBG₂₁、FBG₂₂ 置于温控箱中,FBG₂₃ 置于室温中,调节温度在 45~75 °C 内变化,每隔 5 °C 记录一次实验数据。两组实验中相邻 FBG 的间距均为 1 m。

4.2 算法参数设置

所提 DPSO 算法参数设置如表 1 所示,同时为了公平地对比算法性能,设置 $N=30$, $T=100$,每个算法均运行 100 次。在 6 种对比算法中,其他参数的设置分别参照文献[11]中的二进制粒子群优化(BPSO)算法、文献[12]中的改进粒子群优化(IPSO)算法、文献[13]中的(GPSO)算法、文献[14]中的(MPSO)算法、文献[15]中的(I-PSO)算法以及文献[16]中的(GS-PSO)算法。

表 1 DPSO 算法参数设置

Table1 Parameter setting of DPSO algorithm

Parameter	N	T	ω_{\max}	ω_{\min}
Value	30	100	0.9	0.4

4.3 实验结果分析

4.3.1 第 1 组实验

将 FBG₁₁、FBG₁₂ 传感器接入实验系统,其反射率分别为 $r_{11}=0.80$, $r_{12}=0.65$,通过调节温控箱获得 FBG 在不同温度下的含噪信号和去噪^[17] FBG 信号,如图 5、6 所示。

由图 6 可看出,当 FBG₁₁ 在温控箱中受到不同温度作用时,其中心波长不断发生漂移,从而形成不同程度的重叠光谱。利用 DPSO 算法识别重叠光谱模型参数,即可获得两个 FBG 漂移后的中心波长。DPSO 算法的识别过程如图 7 所示。

当迭代次数为 30 时,算法基本完全收敛,说明 DPSO 算法具有较好的收敛性,且可精确识别 FBG

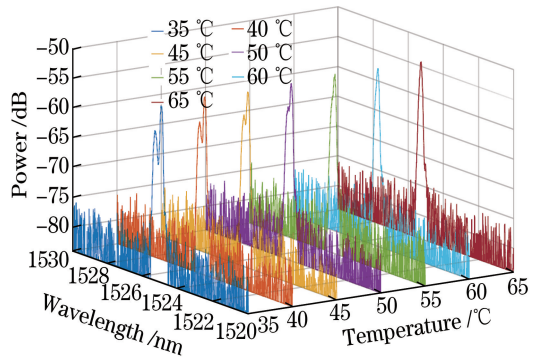


图 5 不同温度下 2 个 FBG 的含噪信号图

Fig. 5 Two FBG signal-to-noise signal diagram at different temperatures

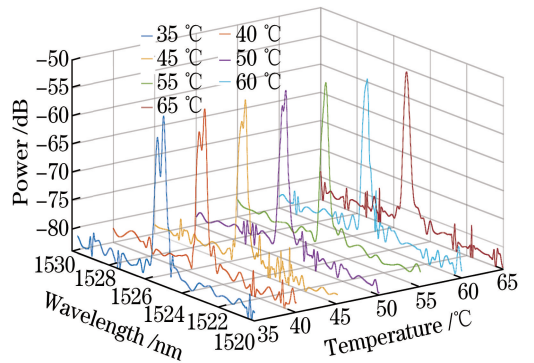


图 6 不同温度下 2 个 FBG 的去噪信号图

Fig. 6 Two FBG de-noising signal diagram at different temperatures

的中心波长。

1) 算法运行时间对比

为了进一步验证算法的性能,将 DPSO 算法与 6 种对比算法在 MATLAB 中分别运行 100 次,对它们所用的平均时间进行了仿真,如图 8 所示。

由图 8 可得,BPSO 算法的平均耗时最长,IPSO 算法次之,DPSO 算法的平均耗时最短。为了直观地对比每种算法的耗时,以 60 °C 时为例,对算法运行 100 次的耗时进行仿真,结果如图 9 所示。由图 9 知,DPSO 算法运行时间最短,进一步验证了算法的可行性。

2) 波长解调误差对比

图 10 为利用 7 种算法识别不同温度下重叠光谱中心波长的平均误差。

图中 10 中的虚线和实线分别为 FBG₁₁ 和 FBG₁₂ 的中心波长平均误差,可知:BPSO 算法识别两 FBG 波长的平均误差最大,最高为 52.30492 pm; IPSO 算法识别两 FBG 波长的平均误差次之,最高为 45.75969 pm; DPSO 算法识别的两个 FBG 中心

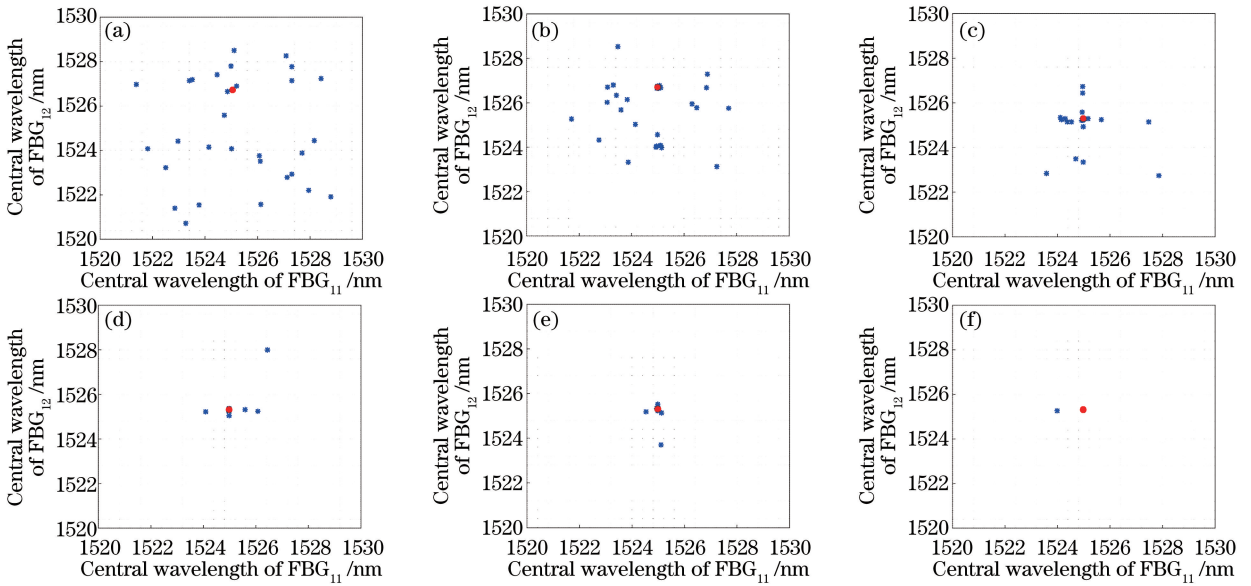


图 7 DPSO 算法在迭代次数分别为(a) 5、(b) 10、(c) 15、(d) 20、(e) 25、(f) 30 时的粒子运动图

Fig. 7 Particle motion graphs when the number of iterations is (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25, (f) 30 in DPSO algorithm

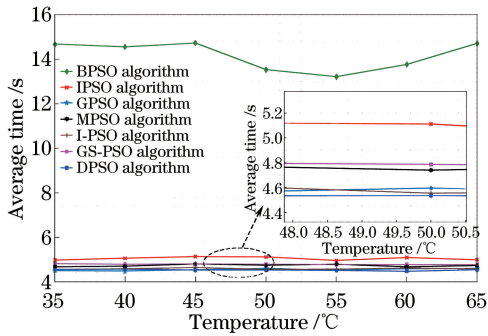


图 8 不同温度下 7 种算法运行 100 次的平均时间
Fig. 8 Average time of seven algorithms running 100 times at different temperatures

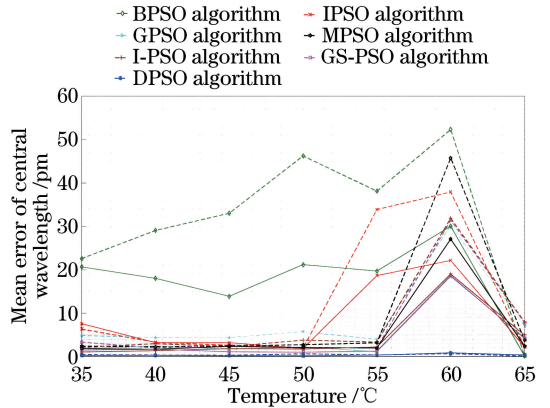


图 10 FBG₁₁ 和 FBG₁₂ 中心波长的平均误差
Fig. 10 Mean error of central wavelength of FBG₁₁ and FBG₁₂

波长的平均误差最小,均小于 1 pm。

为了客观说明 DPSO 算法的有效性,表 2~4 分别列出不同温度下每种算法运行 100 次的平均耗时、平均适应度值以及 FBG₁₁ 和 FBG₁₂ 中心波长平均误差值。

由表 2 和表 3 知,DPSO 算法耗时最短,适应度值最小。适应度值越接近于零,说明识别的 FBG 中心波长越精确。同时由表 4 可知,DPSO 算法的波长解调精度均小于 1 pm,最大为 0.84891 pm,最小为 0.12090 pm。以上仿真图和实验数据均表明,DPSO 算法用于 FBG 重叠光谱信号的解调具有一定的可行性和有效性。

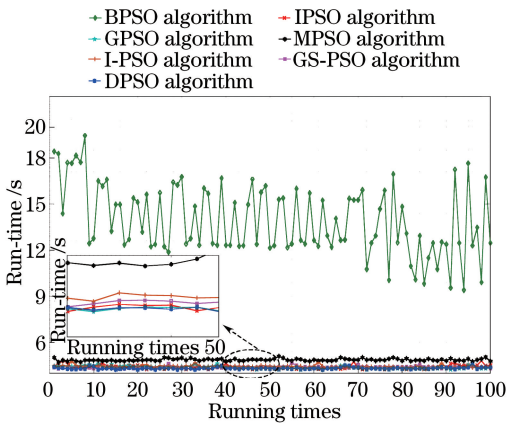


图 9 60 °C 时 7 种算法运行 100 次的耗时
Fig. 9 Run-time of seven algorithms running 100 times at 60 °C

表 2 不同温度下 7 种算法运行 100 次的平均耗时

Table 2 Average time of seven algorithms running 100 times at different temperatures

Temperature / °C	Average time / s						
	BPSO	IPSO	GPSO	MPSO	I-PSO	GS-PSO	DPSO
	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm
35	14.6786	4.9726	4.5585	4.6775	4.5597	4.8182	4.5042
40	14.5516	5.0568	4.5699	4.7037	4.5793	4.7900	4.4900
45	14.7227	5.1258	4.5406	4.7963	4.6503	4.8031	4.5296
50	13.5309	5.1115	4.5958	4.7387	4.5546	4.7858	4.5347
55	13.2217	4.9579	4.5261	4.7910	4.5663	4.7661	4.5203
60	13.7655	5.0931	4.5889	4.6754	4.6091	4.7706	4.4764
65	14.7105	4.9948	4.6055	4.7256	4.5859	4.7767	4.5489

表 3 不同温度下 7 种算法的平均适应度值

Table 3 Average fitness value of seven algorithms at different temperatures

Temperature / °C	Average fitness value						
	BPSO	IPSO	GPSO	MPSO	I-PSO	GS-PSO	DPSO
	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm
35	0.66026	0.13412	0.00622	0.01324	0.00261	0.00634	0.00014
40	0.59764	0.02150	0.00578	0.01532	0.00554	0.00433	0.00015
45	0.52226	0.03873	0.00615	0.00970	0.00513	0.00341	0.00083
50	0.33318	0.00899	0.00532	0.01884	0.00790	0.00242	0.00018
55	0.07022	0.02352	0.00926	0.00908	0.00999	0.00281	0.00038
60	0.00845	0.00102	0.00427	0.00364	0.00304	0.00215	0.00075
65	0.09333	0.11302	0.00103	0.00136	0.00543	0.00230	0.00029

表 4 不同温度下 7 种算法的 FBG₁₁ 和 FBG₁₂ 中心波长平均误差值

Table 4 Mean error of central wavelength of FBG₁₁ and FBG₁₂ of seven algorithms at different temperatures

Temperature / °C	FBG	Mean error / pm						
		BPSO	IPSO	GPSO	MPSO	I-PSO	GS-PSO	DPSO
		algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm
35	FBG ₁₁	22.57272	6.32606	4.83910	2.40530	2.11034	3.33901	0.46600
	FBG ₁₂	20.68532	7.57752	1.82794	1.82682	1.06209	1.49709	0.22706
40	FBG ₁₁	29.05570	3.31489	4.36729	2.26857	2.97235	1.97205	0.33901
	FBG ₁₂	18.04285	3.23710	2.47584	1.69534	1.34976	1.66905	0.27001
45	FBG ₁₁	33.02502	2.60064	4.37743	2.44212	2.31071	2.69559	0.29102
	FBG ₁₂	13.89648	3.23602	1.66914	2.33777	1.80997	1.08977	0.21798
50	FBG ₁₁	46.23337	1.93749	5.74438	2.73671	3.78118	2.13112	0.63405
	FBG ₁₂	21.18343	1.87464	2.28360	2.07933	1.74745	0.99112	0.18101
55	FBG ₁₁	38.11705	33.86866	3.97333	3.17216	3.33848	1.97924	0.37621
	FBG ₁₂	19.71244	18.66961	1.13299	1.96425	2.20601	1.27305	0.34102
60	FBG ₁₁	52.30492	37.92883	30.23874	45.75969	31.88482	31.40478	0.68021
	FBG ₁₂	30.04594	22.18308	18.46024	27.08714	19.05338	18.63080	0.84891
65	FBG ₁₁	0.23620	2.21232	7.02901	3.75874	7.98747	7.77933	0.12090
	FBG ₁₂	0.14371	2.20489	4.38922	2.45340	4.93424	4.16690	0.41114

4.3.2 第 2 组实验

将反射率 $r_{21} = 0.90, r_{22} = 0.82, r_{23} = 0.72$ 的 FBG₂₁、FBG₂₂、FBG₂₃ 接入实验系统中,获得的 FBG 含噪信号和去噪信号^[17] 分别如图 11 和 12 所示。

由图 12 可知,FBG₂₁ 和 FBG₂₂ 在不同温度下可

与 FBG₂₃ 形成不同重叠程度的光谱。

1) 算法运行时间的对比

为了验证 DPSO 算法是否可识别具有 3 个峰值的光谱信号,将 7 种算法在 MATLAB 环境下运行 100 次,将它们的平均耗时进行仿真,结果如图 13 所示。

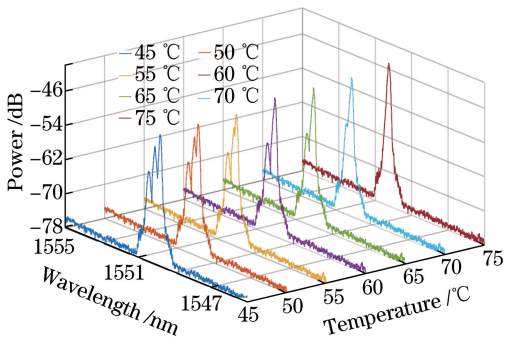


图 11 不同温度下 3 个 FBG 的含噪信号图
Fig. 11 Three FBG signal-to-noise signal diagram at different temperatures

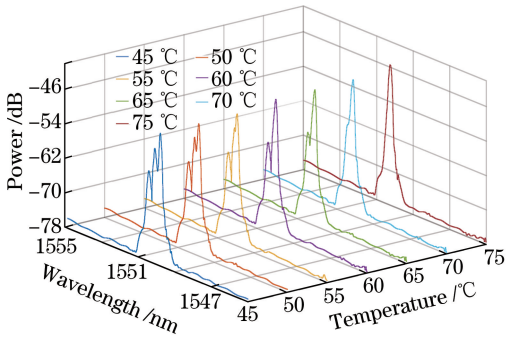


图 12 不同温度下 3 个 FBG 的去噪信号图
Fig. 12 Three FBG de-noising signal diagram at different temperatures

由图 13 可得,与第 1 组实验类似,BPSO 算法的平均耗时最长,IPSO 算法次之,DPSO 算法的耗时最短。

2) 波长解调误差的对比

为了说明 DPSO 算法识别 3 个 FBG 中心波长的有效性,分别对不同温度下 7 种算法解调中心波长的平均误差进行了仿真,结果如图 14 所示。

图 14(a)~(c) 分别表示 7 种算法运行 100 次

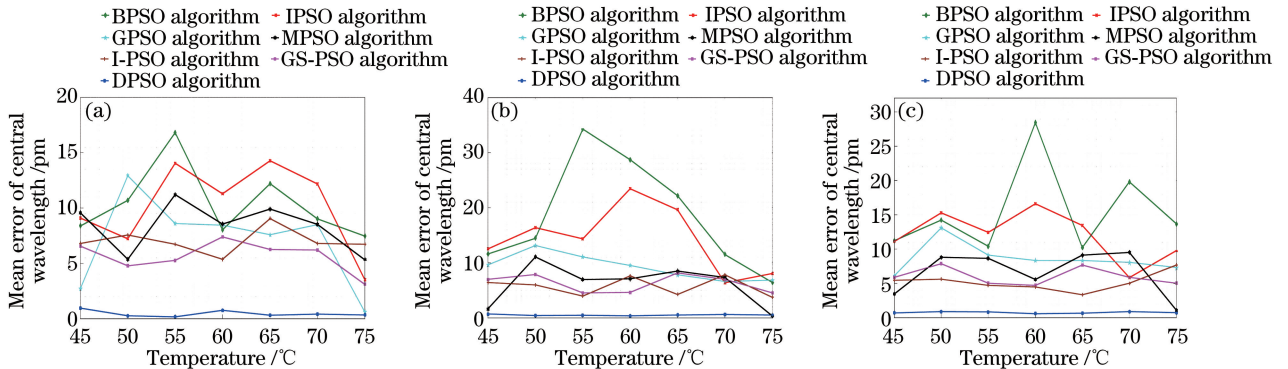


图 14 (a) FBG₂₁、(b) FBG₂₂、(c) FBG₂₃ 中心波长的平均误差

Fig. 14 Mean error of central wavelength of (a) FBG₂₁, (b) FBG₂₂ and (c) FBG₂₃

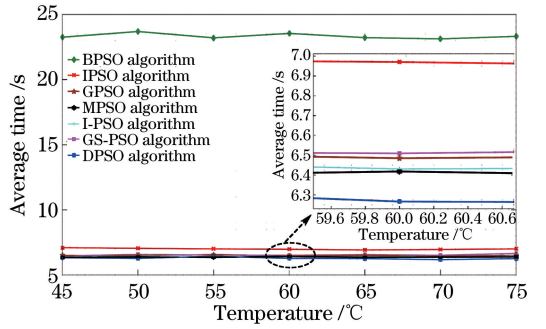


图 13 不同温度下 7 种算法运行 100 次的平均耗时
Fig. 13 Average time of seven algorithms running 100 times at different temperatures

后,识别 FBG₂₁、FBG₂₂ 和 FBG₂₃ 的中心波长平均误差。从图 14 可知:DPSO 算法解调出的平均波长误差值最小,均小于 1 pm;6 种对比算法的平均波长误差值均较大,其中 BPSO 算法识别 FBG₂₂ 的平均误差最高(34.27955 pm),MPSO 算法次之,证明了 DPSO 算法解调 3 个 FBG 重叠光谱的有效性。

由表 5~7 可知:DPSO 算法的耗时最短,平均适应度最小;对重叠光谱中 3 个 FBG 中心波长的识别精度均小于 1 pm,最大误差为 0.96455 pm;BPSO 算法用时最长,且识别精度较差,其他几种算法的用时与 DPSO 算法相当,但其识别精度低于 DPSO 算法。可见,利用 DPSO 算法同样可识别 3 个 FBG 构成的重叠光谱信号,再次验证了该算法的可行性和有效性。

为了验证 FBG 中心波长与温度的关系,将解调出的 FBG₂₁ 中心波长与温度在 MATLAB 中进行拟合,结果如图 15 所示。

为了进一步客观表明各个算法的解调结果,表 5~7 分别列出 3 个 FBG 中心波长的平均误差值、每种算法运行 100 次的平均耗时及平均适应度值。

表 5 不同温度下 7 种算法的 FBG₂₁、FBG₂₂ 和 FBG₂₃ 中心波长平均误差值

Table 5 Mean error of central wavelength of FBG₂₁, FBG₂₂ and FBG₂₃ of seven algorithms at different temperatures

Temperature / °C	FBG	Mean error / pm						
		BPSO	IPSO	GPSO	MPSO	I-PSO	GS-PSO	DPSO
		algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm
45	FBG ₂₁	8.38650	9.10530	2.72147	9.57363	6.79582	6.56160	0.96455
	FBG ₂₂	11.58824	12.53189	9.64521	1.63202	6.42892	6.99971	0.71972
	FBG ₂₃	11.20920	11.09653	6.11469	3.47095	5.44031	5.86538	0.69962
50	FBG ₂₁	10.68530	7.21927	12.92242	5.36296	7.56493	4.78567	0.26188
	FBG ₂₂	14.47487	16.38932	13.15051	11.07756	5.99276	7.89094	0.45558
	FBG ₂₃	14.21533	15.26720	13.11181	8.80817	5.61857	7.87242	0.87062
55	FBG ₂₁	16.82183	14.04566	8.60896	11.21754	6.71527	5.26786	0.17213
	FBG ₂₂	34.27955	14.34737	11.06934	6.96918	3.95016	4.52220	0.47508
	FBG ₂₃	10.39403	12.44230	9.11939	8.65444	4.70099	5.02434	0.83007
60	FBG ₂₁	8.03439	11.29509	8.45115	8.56031	5.35927	7.38787	0.76288
	FBG ₂₂	28.72941	23.45011	9.54285	7.10752	7.64219	4.63546	0.38900
	FBG ₂₃	28.43478	16.60299	8.31982	5.55027	4.46734	4.69984	0.58287
65	FBG ₂₁	12.20465	14.26785	7.57924	9.91237	9.05138	6.26613	0.31380
	FBG ₂₂	22.17935	19.65278	7.84885	8.51009	4.25926	8.17510	0.52530
	FBG ₂₃	10.21387	13.44579	8.33526	9.10327	3.33736	7.69325	0.67328
70	FBG ₂₁	9.02049	12.18091	8.49254	8.51531	6.79582	6.19848	0.41727
	FBG ₂₂	11.53099	6.37280	6.62709	7.36652	7.84856	6.99971	0.62785
	FBG ₂₃	19.78399	5.85381	8.07413	9.51944	5.00661	5.86538	0.87348
75	FBG ₂₁	7.46752	3.52821	0.62172	5.31275	6.71527	3.10960	0.34889
	FBG ₂₂	6.44565	8.05850	6.84367	0.35084	3.74282	4.52220	0.51788
	FBG ₂₃	13.66537	9.78516	7.31501	1.09412	7.68816	5.02434	0.72392

表 6 不同温度下 7 种算法运行 100 次的平均耗时

Table 6 Average time of seven algorithms running 100 times at different temperatures

Temperature / °C	Average run-time / s						
	BPSO	IPSO	GPSO	MPSO	I-PSO	GS-PSO	DPSO
	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm
45	23.2612	7.0915	6.5037	6.3583	6.4666	6.4696	6.3217
50	23.6881	7.0439	6.5037	6.3871	6.4822	6.5786	6.2668
55	23.2014	7.0035	6.5582	6.3583	6.5219	6.5300	6.4370
60	23.5454	6.9705	6.4848	6.4181	6.4314	6.5097	6.2667
65	23.2283	6.9097	6.5220	6.3584	6.4439	6.5600	6.2499
70	23.1230	6.9522	6.4221	6.3717	6.4666	6.5197	6.1719
75	23.3226	6.9977	6.5158	6.3872	6.5219	6.6509	6.2592

表 7 不同温度下 7 种算法运行 100 次的平均适应度值

Table 7 Average fitness value of seven algorithms running 100 times at different temperatures

Temperature / °C	Average fitness value						
	BPSO	IPSO	GPSO	MPSO	I-PSO	GS-PSO	DPSO
	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm	algorithm
45	0.17330	0.13032	0.02611	0.01497	0.33687	0.20176	0.00421
50	0.36988	0.38277	0.28561	0.17255	0.21914	0.25709	0.00499
55	0.22092	0.25575	0.23362	0.19523	0.16857	0.13419	0.00208
60	0.28744	0.38277	0.09036	0.06344	0.15295	0.08014	0.00268
65	0.24345	0.13032	0.18841	0.02156	0.08820	0.02967	0.00218
70	0.40986	0.13032	0.07079	0.06789	0.05644	0.01267	0.00347
75	0.31010	0.25575	0.02387	0.00000	0.07077	0.11934	0.00350

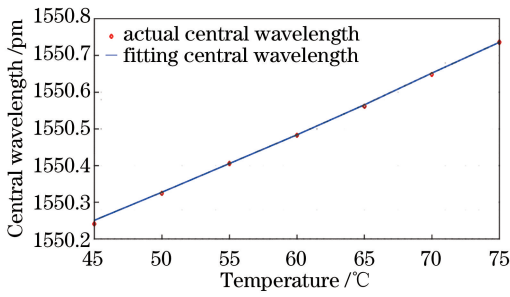


图 15 FBG₂₁ 中心波长拟合图

Fig. 15 Central wavelength fitting diagram of FBG₂₁

由图 15 可知,FBG 漂移后的中心波长与温度呈良好的线性关系。因此,根据 FBG 温度传感原理,可由中心波长的漂移量得出温度的变化量。

5 结 论

针对 FBG 重叠光谱信号解调困难的问题,提出了一种改进 PSO 算法,以提高 FBG 波长的识别精度。构建 FBG 传感网重叠光谱模型,搭建温度实验系统来获取重叠光谱信号,利用所提算法对重叠光谱模型参数进行优化,并将其与 6 种算法进行对比。通过仿真可知,所提算法收敛速度快,运行时间短,波长识别误差均小于 1 pm,此方法为大容量 FBG 传感网重叠光谱的解调提供了一种可选方案,有利于布局大型光纤光栅传感网的检测点数。

参 考 文 献

[1] Xiao F, Chen G S, Hulsey J L. Monitoring bridge dynamic responses using fiber Bragg grating tiltmeters[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2390.

[2] Chen Y, Yang K, Liu H L. A self-adaptive peak detection algorithm to process multi-peak fiber Bragg grating sensing signal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0805008.
陈勇, 杨凯, 刘焕淋. 多峰光纤布拉格光栅传感信号的自适应寻峰处理[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805008.

[3] Tian S Z, Cao C C, Wang D P. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0114001.
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土筒支梁裂缝的实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0114001.

[4] Chen Y, Zhou L X, Liu H L. A fiber Bragg grating sensor perimeter intrusion localization method optimized by improved particle swarm optimization algorithm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(3):

1243-1249.

[5] Dai Y M, Zhu D X, Wu D H. Shock search particle swarm optimization algorithm based on kernel matrix synergistic evolution [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2016, 28(2): 247-253.
戴月明, 朱达祥, 吴定会. 核矩阵协同进化的震荡搜索粒子群优化算法[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2016, 28(2): 247-253.

[6] Cao P Q, Xu G L. Large capacity and fast FBG sensing system based marshalling measurement and edgefilter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1010003.
曹品奇, 许国良. 基于分组测量和边沿滤波的大容量光纤光栅快速传感系统[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1010003.

[7] Zhao X Z, Li P C. Tabu search algorithm used to enhance the multiplexing capacity of FBG sensing system[J]. *Journal of Optoelectronic • Laser*, 2011, 22(6): 849-852.
赵学增, 李平川. 利用禁忌搜索算法提高 FBG 传感系统复用能力的研究[J]. *光电子 • 激光*, 2011, 22(6): 849-852.

[8] Qi Y F, Li C L, Jiang P, *et al.* Spectral shape multiplexing technology of fiber Bragg gratings using simulated annealing algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0906004.
齐跃峰, 李彩玲, 江鹏, 等. 利用模拟退火算法研究光纤布拉格光栅的光谱形状复用技术[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0906004.

[9] Ju H B. Research on multiplexing and demodulation on technique of fiber Bragg grating sensor based on genetic algorithm[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009: 21-31.
巨红兵. 基于遗传算法的光纤光栅传感器复用解调技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009: 21-31.

[10] Zhang Y J, Wang H M, Fu X H, *et al.* Identification of steel plate damage position based on particle swarm support vector machine[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1006006.
张燕君, 王会敏, 付兴虎, 等. 基于粒子群支持向量机的钢板损伤位置识别[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1006006.

[11] He L, Wang M, Li B. Ensemble particle swarm optimizer for single objective optimization [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2017, 29(4): 527-534.
何莉, 王森, 李博. 面向单目标优化的集成粒子群算法[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2017, 29

- (4): 527-534.
- [12] Lee T Y, Chen C L. Unit commitment with probabilistic reserve: an IPSO approach [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(2): 486-493.
- [13] Jamian J J, Abdullah M N, Mokhlis H, *et al.* Global particle swarm optimization for high dimension numerical functions analysis [J/OL]. *Journal of Applied Mathematics*, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/329193>.
- [14] Khan S U, Yang S Y, Wang L Y, *et al.* A modified particle swarm optimization algorithm for global optimizations of inverse problems [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(3): 1-4.
- [15] Wang Z F, Wang J, Sui Q M, *et al.* The simultaneous measurement of temperature and mean strain based on the distorted spectra of half-encapsulated fiber Bragg gratings using improved particle swarm optimization [J]. *Optics Communications*, 2017, 392: 153-161.
- [16] Yang X, Huang H Q, Jiang K M, *et al.* Application of particle swarm algorithm and GMM-SDR model in overlapping spectrum peak analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(8): 2376-2380. 杨熙, 黄洪全, 蒋开明, 等. 粒子群和 GMM-SDR 模型在重叠谱峰解析中的应用 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(8): 2376-2380.
- [17] Chen Y, Cheng Y N, Liu H L. Application of improved wavelet adaptive threshold de-noising algorithm in FBG demodulation [J]. *Optik: International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 132: 243-248.