

基于优化粒子群算法的光纤传感谱形复用技术

鲍克勤,倪蓉*,张雪健

(上海电力大学 自动化工程学院,上海 200090)

摘要:大型光纤布喇格光栅(FBG)传感网络中,由于光源带宽有限,而FBG传感器复用数量多,会出现光谱重叠问题。因此,提高复用能力成为传感网络设计中的一个关键问题。结合谱形复用与量子粒子群优化(QPSO)算法,对多FBG传感系统进行实验与仿真分析。与传统粒子群算法相比,QPSO算法中参数设置比较简单,粒子搜索最优解能力大大提高。对QPSO算法和自适应变异的量子粒子群优化(AMQPSO)算法的解调结果进行分析,对比两者的解调精度与时间。AMQPSO算法在多FBG复用系统中的解调误差不超过3 pm,温度测量精度达0.3 °C,解调时间不超过5 s,解决了多FBG系统中部分重叠及完全重叠问题。

关键词:光纤布喇格光栅;谱形复用;波长解调算法;重叠光谱;量子粒子群优化算法

中图分类号:TN253 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)11-0005-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.11.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical fiber sensing spectral shape multiplexing technology based on particle swarm optimization algorithm

BAO Keqin, NI Rong*, ZHANG Xuejian

(School of Automation Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200090, China)

Abstract: In large fiber Bragg grating(FBG) sensor networks, due to the limited bandwidth of light sources and the large number of FBG sensors, the problem of spectral overlap will occur. Therefore, improving the reuse ability has become a key problem in the design of sensor networks. In this paper, the experiment and simulation analysis of multi-FBG transmission system are carried out by combining spectral reuse with quantum particle swarm optimization (QPSO) algorithm. Compared with the traditional particle swarm algorithm, the parameter setting of the QPSO algorithm is relatively simple, and the ability of particle search for the optimal solution is greatly improved. The paper analyzes the demodulation results of QPSO algorithm and adaptive mutation quantum particle swarm optimization (AMQPSO) algorithm, and compares the demodulation accuracy and time of the two algorithms. The demodulation error of AMQPSO algorithm in multi-FBG reuse system is not more than 3 pm, the accuracy of temperature measurement is up to 0.3 °C, and the demodulation time is not more than 5 s. It solves the problem of partial overlap and complete overlap in multi-FBG system.

Key words: fiber Bragg grating; spectral multiplexing; wavelength demodulation algorithm; overlapping spectrum; quantum particle swarm optimization algorithm

0 引言

光纤布喇格光栅(FBG)传感器近年来发展迅速^[1],

因其具有抗电磁干扰能力强、环境适应性好、灵敏度和性价比高的优势,得以在电力、航天和化工等领域广泛应用^[2-4]。FBG传感器复用能力良好,组成传感网络后能够实现多点同时测量。常用的复用方法可分为波分、时分、空分、谱形复用及它们的混合形式,其中波分^[5]、时分^[6]复用要求各光谱不能发生重叠现象,所以传感器的复用数量受到限制。谱形复用的原理是通过识别光谱形状信息来对光谱进行解调,允许光谱重叠,在有限的光源带宽中增加了FBG传感器的复用数量。

收稿日期:2019-07-09。

基金项目:国家自然科学基金(61573239)资助。

作者简介:鲍克勤(1965-),男,硕士,副教授,主要研究方向为电厂控制系统优化、电网安全评估技术以及电气设备状态检测技术。目前在上海电力大学自动化工程学院任教,曾获得华东电网科技奖、浙江省电力公司科技进步奖等。

*通信作者:倪蓉(E-mail: nirong95@163.com)。



文献[7-9]通过研究光谱形状信息,如峰值、峰高和面积等参数,利用智能算法进行自动寻峰,但容易受干扰信号影响,对提取光谱的要求较高。文献[10-12]采用了极限学习机(ELM)算法、禁忌搜索(TS)算法和差分进化(DE)算法,但仅对2个FBG复用系统进行实验仿真。文献[13]实现了多FBG并联复用系统重叠光谱的识别,但对于不同FBG数量的系统,需要不断改变解调算法的参数。本文采用了量子粒子群优化(QPSO)算法解调中心波长,并在QPSO算法基础上提出了自适应变异的量子粒子群优化(AMQPSO)算法。

1 光谱形状复用解调原理

当FBG感应温度或应力变化时,光谱形状保持不变,仅波长发生漂移。并联形式的光谱复用系统结构图如图1所示。光源发出的光经过耦合器进入 n 个支路中,由每个支路的FBG反射回来,衰减器可以调节反射峰值,最后在光谱仪中形成反射光谱。

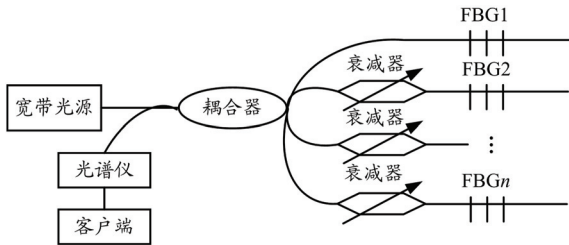


图1 并联形式的光谱复用系统结构图

若第 i 个FBG独立反射光谱为 $g_i(\lambda-\lambda_{Bi})$,近似为高斯函数表达式为:

$$g_i(\lambda-\lambda_{Bi})=r_i \exp\left[-\frac{(\lambda-\lambda_{Bi})^2}{B_c}\right] \quad (1)$$

其中, λ_{Bi} 表示第 i 个FBG的中心波长; r_i 表示每个FBG的反射率,且 $0 \leq r_i \leq 1$; B_c 为FBG的3 dB带宽,通常取0.2 nm。则光谱仪中构成的反射谱为:

$$R(\lambda)=\sum_{i=1}^n r_i g_i(\lambda-\lambda_{Bi})+N(\lambda) \quad (2)$$

其中, $N(\lambda)$ 是系统中的随机噪声。为方便对中心波长解调,在原始反射光谱基础上进行光谱重构,构成新光谱为:

$$R_v(\lambda)=\sum_{i=1}^n r_i g_i(\lambda-s_i) \quad (3)$$

其中, s_i 表示第 i 个重构光谱的中心波长。通过比较 $R(\lambda)$ 和 $R_v(\lambda)$,可得到两光谱的重叠程度函数:

$$f(s)=[R(\lambda)-R_v(\lambda)]^2 \quad (4)$$

当 $s_i=\lambda_{Bi}$ 时,目标函数 $f(s)$ 取最小值。将求解中心

波长的过程转化为最优值求解,当目标函数取最小值时,求解出的 $(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 即为中心波长值。

2 优化粒子群算法

2.1 QPSO

在粒子群算法中引入量子理论^[14],即QPSO^[15,16]。传统的微粒群算法中加入量子进化算法后,全局收敛性大大提高。在量子空间中,粒子在运动中表现为量子行为,没有固定的运动轨迹,粒子能够遍布整个可行解空间,从而提高全局搜索能力。QPSO算法中粒子状态的进化方程为:

$$X_i(t+1)=\begin{cases} P_i-\beta|mbest_i-X_i(t)|\ln(1/u), & u \geq 0.5 \\ P_i+\beta|mbest_i-X_i(t)|\ln(1/u), & u < 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

其中, t 为进化代数, β 为压缩-膨胀因子, u 为 $[0,1]$ 上的随机数, P_i 表示第 i 个粒子之前的个体最优位置, $mbest_i$ 为种群中全部个体最优位置的中间值。

2.2 AMQPSO

在种群不断进化的过程中,个体间的差异逐渐减小。根据个体位置的差异,得到对应适应度值的变化,进一步判断种群的状态。利用适应度方差 σ^2 和空间位置的聚集度 h 来表征适应度值的整体变化,第 i 个个体的适应度方差为:

$$\sigma^2=\sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i-f_{avg}}{v}\right)^2 \quad (6)$$

其中, f_i 为第 i 个个体的适应度值, f_{avg} 为适应度平均值, v 为归一化定标因子。设 p_g 表示群体最优位置,则第 t 代空间位置的聚集程度函数 h 表达式为:

$$h=\frac{\max_{1 \leq i \leq N} \{\|X_i-p_g\|\}}{\max_i \left\{ \max_{1 \leq i \leq N} \{\|X_i-p_g\|\} \right\}} \quad (7)$$

适应度方差值 σ^2 能够直接反映各个体之间的聚集程度,方差值越小,聚集程度越高。空间位置的聚集程度函数 h 反映空间中个体之间的离散程度, h 值越小,则分布得越集中。随着进化迭代过程不断推进,种群中各个体的适应度值差异越来越小, σ^2 和 h 也逐渐减小,此时极易陷入局部最优。为了避免陷入局部最优,本文引入了变异算子 P_m ,对粒子进行变异操作, P_m 表示为:

$$P_m=\begin{cases} \exp(-h)/5, & \sigma^2 < \sigma_1 \\ 0, & \sigma^2 \geq \sigma_1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, σ_1 为阈值,表示算法是否进入搜索后期状态,是一个接近0的数。

当 h 值较大时,粒子的聚集程度较小,对应变异概率 P_m 也较小。反之, h 值较小时,粒子的聚集程度高,个体差异小,对应的变异概率 P_m 增大。引入变异概率后,可以有效克服早熟收敛的现象,优化算法的全局收敛性。具体的 AM-QPSO 算法流程图如图 2 所示。

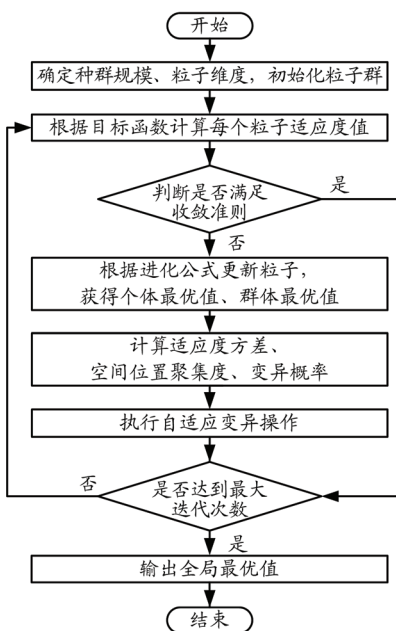


图 2 AMQPSO 算法流程图

3 实验结果与分析

3.1 2 个 FBG 光谱重叠

实验 1 使用 2 个 FBG 传感器,FBG1、FBG2 中心波长分别为 1544.593 nm、1544.172 nm。根据图 1 搭建实验平台。通过可调谐衰减器调节各路反射光强,使得 $r_1=1, r_2=0.74$ 。实验中,将 FBG1 放在室温(约 25℃)下,温度保持不变;FBG2 放置于恒温箱内,恒温箱初始温度设置为 25℃。调节温度在 25℃~55℃变化,每次升温 5℃并记录实验数据。对 2 个 FBG 中心波长的重叠谱形去噪后得到的结果如图 3 所示(6 条不同颜色的曲线表示随机选取的 6 种不同重叠情况)。

针对图 3 中光谱的重叠情况(包括部分重叠和完全重叠),采用 QPSO 和 AMQPSO 算法进行重构操作。AMQPSO 算法中, $\sigma_1=0.001$ 。这 2 种优化粒子群算法中种群规模都取 30,最大迭代次数为 100。依照以上参数,对中心波长进行解调,取算法运行 10 次结果的平

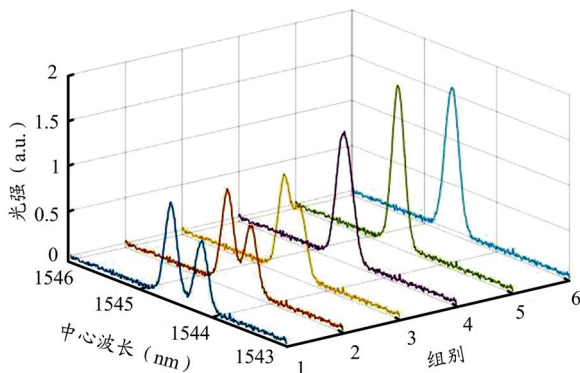


图 3 2 个 FBG 光谱重叠图

均值,得到中心波长解调误差及耗时如表 1 所示。可以看出,QPSO 算法的最大解调误差不超过 30 pm,对 FBG1 与 FBG2 的解调误差相近,能同时解调出 2 个 FBG 的中心波长,平均误差为 19.89 pm,平均解调时间为 23.03 s。AMQPSO 算法的解调性能明显优于 QPSO 算法,其平均误差仅为 0.60 pm,平均耗时为 2.4 s。以上实验与仿真数据表明:本文提出的 AMQPSO 算法在解调重叠光谱时具备一定的优越性。

表 1 2 个 FBG 中心波长解调误差及耗时

T(℃)	算法名称	解调误差(pm)		耗时(s)
		FBG1	FBG2	
25	QPSO	21.394	23.85	23.45
	AMQPSO	0.57	0.56	2.24
30	QPSO	18.42	29.23	23.94
	AMQPSO	0.36	0.56	2.37
35	QPSO	13.85	15.69	22.67
	AMQPSO	0.94	0.12	2.42
40	QPSO	19.23	14.26	23.25
	AMQPSO	0.16	0.91	2.48
45	QPSO	27.56	19.92	22.32
	AMQPSO	0.85	0.87	2.33
50	PSO	17.98	17.34	22.63
	AMQPSO	0.74	0.72	2.56

3.2 3 个 FBG 光谱重叠

实验 2 使用 3 个 FBG,FBG1、FBG2 和 FBG3 的中心波长依次为 1539.851 nm、1540.243 nm 和 1540.672 nm,反射率调节为 $r_1=1, r_2=0.82$ 和 $r_3=0.56$ 。FBG2 放置在室温下,保持温度不变。将 FBG1 置于恒温箱中,每次升温 5℃并记录中心波长的漂移。FBG3 也放于恒温箱中,每降温 5℃记录数据,使其与 FBG1、FBG2 的光谱发生重叠。记录 3 个 FBG 的重叠光谱图,经过去噪后得到结果如图 4 所示。

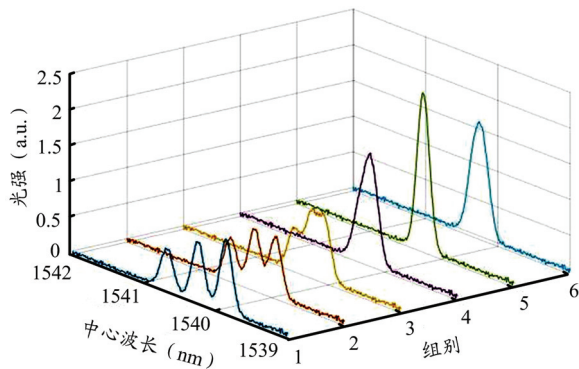
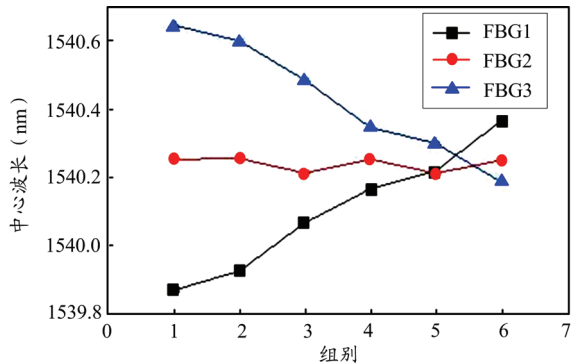
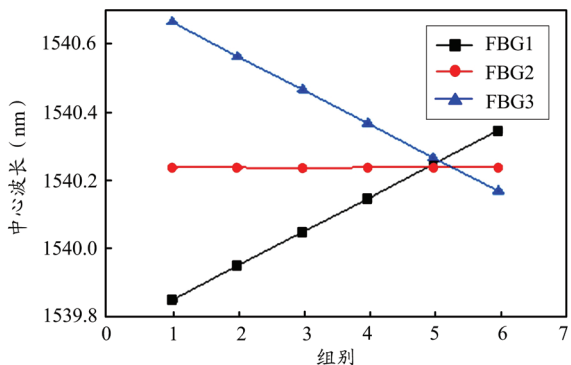


图 4 3 个 FBG 光谱重叠图

2 种算法的参数不变,用 2 种算法对随机选取的 6 种重叠情况分别运行 10 次,结果取平均值,得到中心波长的解调结果如图 5 所示。可以看出,QPSO 算法的解调结果线性程度较差。AMQPSO 算法的解调结果呈线性关系,平均误差为 1.02 pm,且波长误差波动幅度较小,都在 1.3 pm 范围内波动。3 个 FBG 解调算法的平均耗时如表 2 所示,AMQPSO 算法的运行时间约为 QPSO 算法的 1/10,表明 AMQPSO 算法在识别 3 个 FBG 重叠光谱时具有快速性和准确性。



(a) QPSO 算法中心波长解调结果



(b) AMQPSO 算法中心波长解调结果

图 5 2 种优化算法的中心波长解调结果

3.3 4 个 FBG 光谱重叠

本文再对 4 个 FBG 的重叠光谱进行研究,4 个 FBG 的中心波长依次为 1533.875 nm、1534.288 nm、1534.719 nm 和 1535.134 nm,调整反射率依次为 1、0.76、0.49 和 0.32。由于 4 个 FBG 光谱的重叠情况较复杂,实验中只进行 10 组数据的测量。随机改变 FBG1、FBG2 和 FBG3 的温度,使中心波长谱形实现随机重叠(包括部分重叠与完全重叠)。图 6 为 3 种典型重叠情况的谱形图。

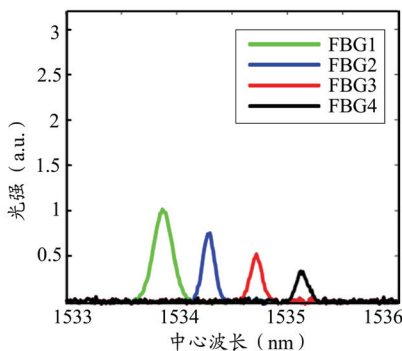
Step	耗时(s)	
	QPSO	AMQPSO
1	27.94	2.54
2	26.52	2.87
3	26.37	2.73
4	27.48	3.26
5	27.13	2.82
6	26.84	2.85

本文对 10 组实验数据进行算法仿真,算法参数不变。每组实验重复运行 10 次取中心波长平均值,并获得平均误差及平均耗时,如图 7 所示。可以看出,2 种算法的解调结果与实际值十分接近。AMQPSO 算法的平均误差为 1.432 pm,最大误差为 1.86 pm(不超过 2 pm)。AMQPSO 算法平均耗时 3.201 s,而 QPSO 算法平均耗时 30 s。说明在上述试验中 AMQPSO 算法的性能一直优于 QPSO 算法,验证了 AMQPSO 算法在 4 个 FBG 光谱重叠问题中的可行性。

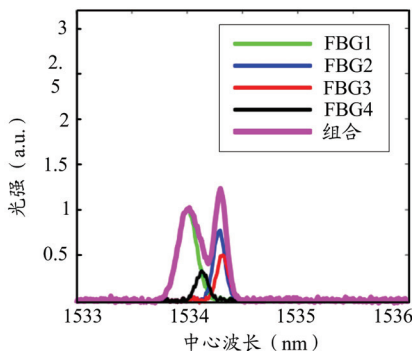
3.4 多 FBG 光谱重叠

为了验证优化算法在多 FBG 重叠时中心波长的解调情况,本文分别对 8 个 FBG、12 个 FBG 和 20 个 FBG 光谱完全重叠进行仿真。选取中心波长十分接近的 FBG 传感器,改变实验温度,使光谱发生完全重叠,采用 AMQPSO 算法解调中心波长。算法参数不变,每组实验重复运行 10 次,得到的解调平均误差与耗时如表 3 所示。

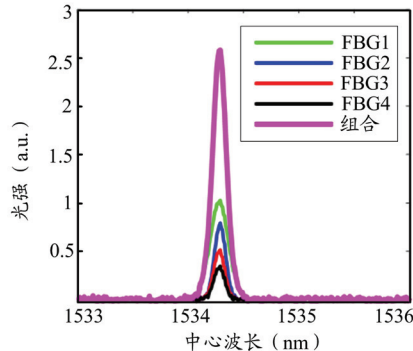
随着 FBG 复用数量的增加,算法中粒子维度增



(a) 4 个 FBG 光谱不重叠

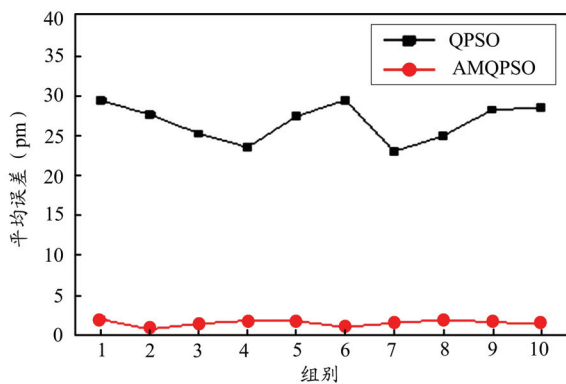


(b) 4 个 FBG 光谱部分重叠

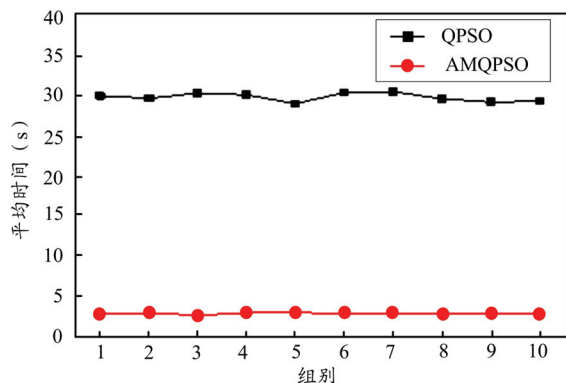


(c) 4 个 FBG 光谱完全重叠

图 6 3 种典型重叠情况的谱形图



(a) 4个FBG解调算法平均误差



(b) 4个FBG解调算法平均耗时

图7 4个FBG解调算法平均误差和平均耗时

表3 多FBG解调平均误差与时间

参数	8个FBG	12个FBG	20个FBG
平均误差(pm)	1.971	2.534	2.812
耗时(s)	3.427	4.382	4.753

加,对算法的耗时与精度有一定影响,解调难度上升。但AMQPSO算法仍能较好地适用于多FBG系统中,解调时间波动不大,耗时在5 s内,解调误差在3 pm内。实验结果表明:AMQPSO算法在多FBG复用系统中仍适用,且满足精度与时效性的要求。

4 结束语

本文提出了2种优化粒子群算法(QPSO和AMQPSO),其中AMQPSO算法对重叠光谱进行解调具有较高解调精度。通过实验获得实际重叠光谱形状,实际测量中光谱并非完全呈现理想高光谱形,与高光谱数值仿真进行比较,进一步验证所提出算法的性能。在实验基础上进行QPSO与AMQPSO这2种算法的仿真,发现AMQPSO算法在进行重叠光谱解调时,能够对粒子采取自适应变异措施,避免陷入局部

最优。使用AMQPSO算法可以对重叠光谱进行快速、精准解调,解调误差不超过3 pm,解调时间不超过5 s。温度测量精度达0.3 ℃,优于传感器实际测量精度0.5 ℃。本文提出的优化解调算法对FBG传感复用技术具有参考价值,可以用于大容量FBG传感解调系统中。

参考文献:

- [1] 廖延彪,苑立波,田芊. 中国光纤传感40年[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 10-28.
- [2] 黄嘉盛. 基于光纤传感技术的电力电缆故障点定位的研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2013.
- [3] SABRI N, ALJUNID S A, SALIM MS, et al. Toward Optical Sensors: Review and Applications[C]// International Conference on Science and Engineering in Mathematics, Chemistry and Physics (ScieTech), JAN. 24-25, 2013, Jakarta, Indonesia. England: Journal of Physics Conference Series, 2013.
- [4] KERROUCHE A, BOYLE W J O, SUN Tong, et al. Enhanced FBG sensor-based system performance assessment for monitoring strain along a pre-stressed CFRP rod in structural monitoring [J]. Sensors and Actuators a-physical, 2009, 151(2): 127-132.
- [5] 祁耀斌,吴敢锋,王汉熙. 光纤布拉格光栅传感复用模式发展方向[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(8): 3058-3072.
- [6] 赖俊森,汤瑞,吴冰冰,等. 光纤通信空分复用技术研究进展分析[J]. 电信科学, 2017, 33(9): 118-135.
- [7] 黄洪全,何子述,方方,等. 多重谱峰的分解方法[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(9): 1114-1119.
- [8] 毕云峰,李颖,杜增丰,等. 对称零面积变换结合L-M拟合自动识别重叠光谱峰[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(8): 2339-2342.
- [9] 冯飞,王府北,谢非,等. 小波变换与高斯拟合在光谱重叠峰解析中的应用[J]. 光子学报, 2015, 44(6): 113-118.
- [10] JIANG H, CHEN J, LIU TD. Wavelength Detection in Spectrally Overlapped FBG Sensor Network Using Extreme Learning Machine [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(20): 2031-2034.
- [11] 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.
- [12] LIU D, TANG K, YANG ZY, et al. A Fiber Bragg Grating Sensor Network Using an Improved Differential Evolution Algorithm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 23(19): 1385-1387.
- [13] 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): 90-96.
- [14] ZHANG Zhisheng. Quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for economic load dispatch of power system [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(2): 1800-1803.
- [15] FANG Wei, SUN Jun, DING YanRui, et al. A Review of Quantum-behaved Particle Swarm Optimization [J]. IEEE Technical Review, 2010, 27(4): 336-348.
- [16] LI PanChi, WANG HaiYing, SONG KaoPing, et al. Research on the improvement of quantum potential well-based particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(6): 2-4.