

基于人工蜂群优化算法的光谱形复用技术

刘雁飞,李志斌

(上海电力大学 自动化工程学院,上海 200090)

摘要:光纤布喇格光栅(FBG)在构成大型传感网络时,由于光源带宽有限会出现光谱重叠的问题。提出了一种人工蜂群(ABC)算法及改进ABC(IABC)算法的解调技术,结合谱形复用技术与IABC算法对光谱重叠中的各个光栅的波长进行识别,并对多个FBG传感系统进行实验仿真与分析。实验结果表明:IABC算法在多FBG传感复用系统中的解调误差不超过3.6 pm,解调时间不超过7 s,温度测量精度达0.5 °C,解决了多个FBG传感网络部分重叠和完全重叠问题。

关键词:光纤布喇格光栅;传感网络;光谱重叠;解调算法;改进人工蜂群算法

中图分类号:TN929.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)01-0052-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.01.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spectral multiplexing technology based on artificial swarm optimization algorithm

LIU Yanfei, LI Zhibin

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

Abstract: When fiber Bragg grating (FBG) forms a large-scale sensor network, due to the limited bandwidth of light source, there will be spectral overlap. An artificial bee colony (ABC) algorithm and a demodulation technology of improved ABC (IABC) algorithm are proposed. The wavelength of each grating in the spectrum overlap is identified by combining the spectral shape multiplexing technology and the IABC algorithm, and several FBG sensing systems are simulated and analysed. The experimental results show that the demodulation error of IABC algorithm in multi FBG sensor multiplexing system is less than 3.6 pm, the demodulation time is not more than 7 s, and the temperature measurement accuracy is 0.5 °C. The problem of partial overlap and full overlap of multi FBG sensor networks is solved.

Key words: fiber Bragg grating; sensor network; spectrum overlap; demodulation algorithm; improved artificial bee colony algorithm

0 引言

光纤布喇格光栅(FBG)传感器具有抗电磁干扰能力强、精度高和性价比高的优点,被应用在航空、电力和化工等领域;同时,FBG在准分布式温度、应变等测量领域也有广泛的应用前景^[1]。FBG传感器形成的传感网络可以实现多点同时测量。FBG具有不同的复用方式,包括时分复用、空分复用等类型,满足了不同场

景下的应用需求^[2-4]。其它复用方式与波分复用相比,传感系统的复杂性增加,而采用最简单的波分复用方式时,要求FBG光谱间不发生相互重叠(光源带宽有限^[5]),FBG的复用数目受到限制。

FBG谱形复用原理是通过识别光谱形状信息来对光谱进行解调,利用时允许光谱发生重叠,使其复用数量成倍增长。解调算法是实现谱形复用的关键,目前常结合优化算法对其进行解调。为了提高解调的准确性,许多学者采用了不同的优化改进算法。文献[6]采用遗传算法用于提高波分复用传感器网络中FBG传感器的性能。文献[7]通过模拟退火算法对波分复用进行处理,使得FBG波长识别精度达到更高的要求。Liu D等人^[8]为了解决光谱重叠的问题,将改进的差分算法引入到FBG串联传感网络中解决了串扰问题。但上述研究仅局限于2个FBG构成的传感网络。

收稿日期:2020-06-24。

基金项目:上海市电站自动化技术重点实验室项目(13DZ2273800)资助。

作者简介:刘雁飞(1994—),男,山西大同人,硕士生,现就读于上海电力大学自动化工程学院电气系统检测与控制专业,主要研究光纤传感网络,包括峰谱重叠问题、交叉敏感问题等,侧重提高重叠光谱的解调精度。参与海南电网智能跨越架项目,负责测控系统的设计,曾获上海市第十二届“挑战杯”全国大学生创业计划竞赛铜奖。



丁晖等人^[9]提出采用光纤滤波器(FPF)模型、粒子群优化算法相结合的方法实现了多个 FBG 复用系统重叠光谱的识别,但是精度有限。文献[10–12]采用智能算法自动寻峰,但信号干扰对结果影响较大,即对光谱的提取要求较高。本文提出人工蜂群(ABC)算法解调中心波长,并在此基础上提出改进 ABC(IABC)算法,以改善 FBG 漂移后中心波长的解调精度,并且应用于多个 FBG 复用系统。

1 FBG 光谱复用原理

FBG 光谱复用可以对光谱形状的信息进行转换处理,由此得到传感器测量的信息。如果作用在 FBG 的外部条件发生变化,则波长只出现一定的漂移,光谱形状并未改变^[13]。并联光谱复用系统结构如图 1 所示,光源发出的光通过耦合器进入 n 个支路中,再通过每个支路的 FBG 反射回来,衰减器可调节反射峰值,最后在光谱仪中形成反射光谱。

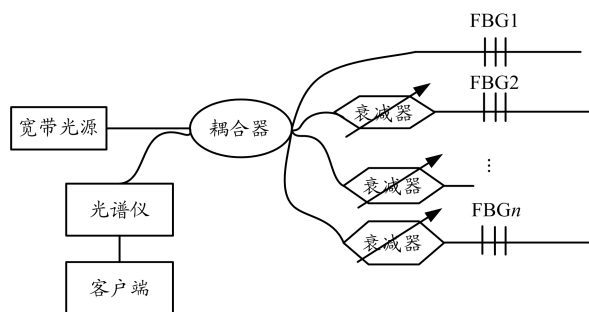


图 1 并联形式的光谱复用系统结构图

在实际应用中,FBG 传感网络中的每个 FBG 都会占用一定的带宽,在光源带宽有限的条件下重叠光谱将很大程度限制 FBG 复用数量,所以研究重叠光谱解调技术对提升 FBG 复用数量具有重要意义。本文将 FBG 的重叠光谱解调问题转化为函数优化问题。为了保证解调出的中心波长与 FBG 一一对应,要求每个 FBG 的反射率不同,假设第 i 个 FBG 反射光谱谱形为 $g_i(\lambda, \lambda_{Bi})$,表达式为:

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

其中, B_G 表示 3 dB 带宽, r_i 、 λ_{Bi} 分别表示第 i 个 FBG 的反射率、中心波长。由此可以得到叠加光谱的形式为:

$$R(\lambda, \lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{Bm}) = \sum_{i=1}^m g(\lambda, \lambda_{Bi}) \quad (2)$$

其中, R 表示叠加光谱函数,即采样光谱; g 表示超高斯函数。式(2)中的谱形可能会发生完全重叠,也可能部分重叠或不重叠。为了方便解调 m 个 FBG 的中心

波长 $(\lambda, \lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{Bm})$, 可以重构函数如下:

$$R_i(\lambda, s_1, s_1, \dots, s_m) = \sum_{i=1}^m g(\lambda, s_i) \quad (3)$$

其中, $s_i (i=1, 2, \dots, m)$ 表示构造函数中对应的每个 FBG 的中心波长。将 $R_i(\lambda, s_1, s_1, \dots, s_m)$ 与 $R(\lambda, \lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{Bm})$ 进行对比,并且通过 $g(\lambda, s_1, s_1, \dots, s_m)$ 定量表征其重合程度为:

$$g(s_1, s_1, \dots, s_m) = \int_0^\infty [R(\lambda, \lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{Bm}) - R_i(\lambda, s_1, s_1, \dots, s_m)] \quad (4)$$

当且仅当 $(s_1, s_1, \dots, s_m) = (\lambda_{B1}, \lambda_{B2}, \dots, \lambda_{Bm})$ 时,目标函数 $g(s_1, s_1, \dots, s_m)$ 取到最小值,原始光谱和重构光谱达到最优匹配,即求出中心波长值。

2 算法原理

2.1 ABC 算法

ABC 算法通过解空间的点来表示蜜源位置,即对应着问题的潜在解^[14]。需要采用迭代的方式搜寻蜜源邻域位置,基于蜜源丰富度雇佣跟随蜂采蜜。在此过程中需要分析蜜源在更新多次后是否得到改进,如果未改进则不再保留该蜜源,而是通过侦察蜂继续搜寻新的蜜源。其中,侦察蜂、引领蜂和跟随蜂的作用不同,侦察蜂有助于解决陷入局部最优的问题;引领蜂可以保持优良解;跟随蜂则能够改善收敛性。

NP 代表蜜源数目,蜜源 $X_i (i=1, 2, \dots, NP)$ 的质量与解的适应度值 fit 保持对应,由此可以得到 $X_i^t = [x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{iD}^t]$, $x_{id} \in (L_d, U_d)$, L_d 、 U_d 对应搜索空间下、上限,已知 $d=1, 2, \dots, D$, t 代表迭代数量,则 i 的初始位置生成公式如下所示:

$$x_{id} = L_d + \text{rand}(0, 1) (U_d - L_d) \quad (5)$$

其中, rand 为随机数的缩写。在搜索开始阶段,引领蜂在蜜源 X_i 的周围根据式(6)搜索一个新的蜜源。

$$v_{id} = x_{id} + \varphi (x_{id} - x_{jd}) \quad (6)$$

其中, $j \neq i$, 表示在 NP 个蜜源中随机选取一个不等于 X_i 的蜜源, v_{id} 表示修正后的食物源的位置, x_{ij} 表示第 i 个蜜源的第 j 维度值。

φ 与扰动程度有关,主要是 $[-1, 1]$ 均匀分布的随机数。根据新蜜源 V_i 适应度与 X_i 的比较来确定是否保留,如果前者优于后者,则采用新的蜜源;如果后者优于前者,则不使用新蜜源,即依然保留 X_i 。在全部引领蜂按照式(6)计算完成后,跟随蜂根据如式(7)对概率进行计算。

$$p_i = \text{fit}_i / \sum_{i=1}^{NP} \text{fit}_i \quad (7)$$

其中, fit_i 表示蜜源 i 所对应的适应值, 即解的适应度。在 ABC 算法中, 解的适应度评价依据式(8)来计算。

$$\text{fit}_i = \begin{cases} 1/(1+f_i), & f_i \geq 0 \\ 1+\text{abs}(f_i), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

其中, f_i 代表解的函数值。如果蜜源 X_i 在搜索过程中已经达到了阈值 limit , 但是没有获取到更优的蜜源, 则不保留 X_i , 此时侦察蜂将在搜索空间内任意形成一个新的蜜源, 具体过程如式(9)所示:

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} L_d + \text{rand}(0, 1)(U_d - L_d), & \text{trial}_i \geq \text{limit} \\ X_i^t, & \text{trial}_i < \text{limit} \end{cases} \quad (9)$$

其中, trial 为设置的初始参数, limit 为判断蜜源是否更新的上限。

2.2 IABC 算法

受差分进化算法的启发, 结合 ABC 算法的特点进行改进, 可以得到如下搜索方程:

$$v_{i,j} = x_{r1,j} + \varphi_{i,j}(x_{i,j} - x_{r2,j}) + \Phi_{i,j}(x_{r3,j} - x_{r4,j}) \quad (10)$$

$$v_{i,j} = x_{\text{best},j} + \varphi_{i,j}(x_{i,j} - x_{r1,j}) + \Phi_{i,j}(x_{r2,j} - x_{r3,j}) \quad (11)$$

其中, $x_{ri,j}$ 为从进化种群中随机选取的互不相同的个体, $i \in \{1, 2, \dots, SN\}$; r_1, r_2, r_3 和 r_4 是 $\{1, 2, \dots, SN\}$ 中随机选择的整数, 且都与 i 不同; $x_{\text{best},j}$ 是当前全局最优解; $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ 是随机选择的指标; $\varphi_{i,j} \in [-1, 1]$ 和 $\Phi_{i,j} \in [0.5, 1]$ 是均匀分布的随机数。 $\varphi_{i,j}$ 和 $\Phi_{i,j}$ 均为缩放比例因子, 用于控制差向量的影响大小。其中, $\Phi_{i,j}$ 如果太大会导致寻优陷入局部极值和削弱对等式的利用。

上述 2 个搜索方程分别与种群多样性的保持、收敛速度控制有关。为了将 2 个搜索方程的优点结合, 引入一个选择概率 p 来控制方程(10)和(11)的使用频率, 新搜索机制的主要步骤如下:

步骤一: 给定蜜源 X_i 和选择概率 p 产生一个新蜜源 v_{i0} 。

步骤二: 若 $\text{rand} < p$, 则使用式(10)根据旧蜜源 X_i , 产生新蜜源 v_{i0} 。

步骤三: 若 $\text{rand} \geq p$, 则使用式(11)根据旧蜜源 X_i 产生新蜜源 v_{i0} 。

基于以上分析, IABC 算法流程图如图 2 所示。

3 实验与分析

3.1 实验平台

本文采用了专业化的实验平台, 具体结构如图 3 所示, 主要由激光器(ASE)形成的光信号传输到 FBG

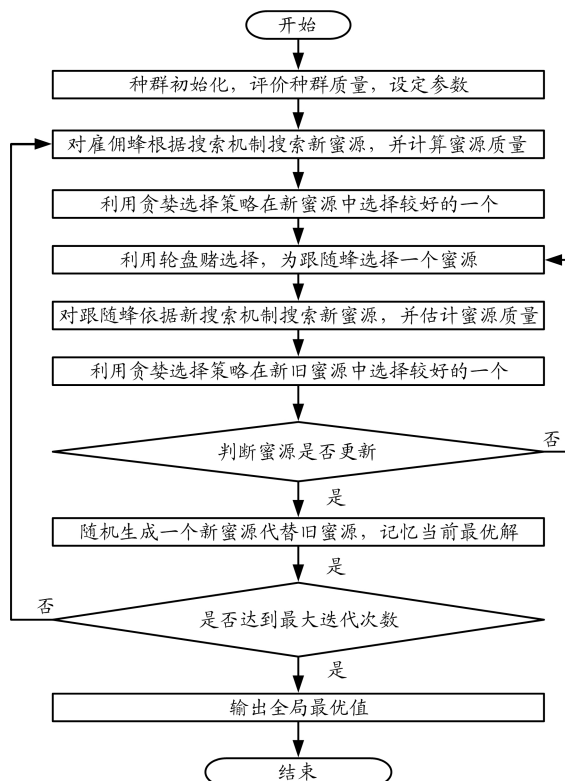


图 2 IABC 算法流程图

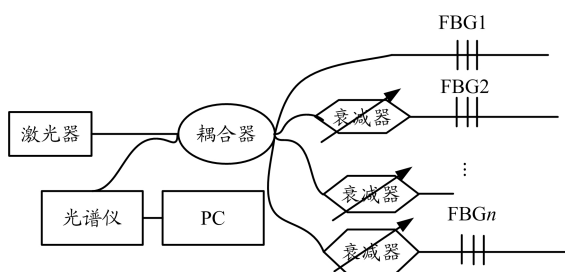


图 3 实验平台结构示意图

并联支路之后, 可以通过 FBG 反射得到的窄带光进一步进入到光谱仪中, 以此得到需要的反射光谱^[5], 再将采集的反射光谱在计算机(PC)运用算法进行解调分析。

本次研究利用了 C 波段 ASE 宽带光源, 其应用的优势主要体现在 2 个方面: 首先是具有较大的光谱范围, 其次是具有稳定的光源特性。波长测试范围可以达到 600~1700 nm, 光功率最大值是 100 mW。此外, 还利用了 MS9740A 光谱仪, 其波长精度可以达到 ± 20 pm, 输入光功率最大值是 23 dB, 分辨率为 0.03 nm。实验所用光纤为上海启鹏工程材料科技有限公司提供的光纤类型为 SMF-28, 3 dB 带宽为 0.2 nm, 峰值反射率达到 99%, 温度量程为 $-40 \sim +120$ °C, 对应波长变化约为 1.6 nm。本次实验所用 PC 为联想 B5400, 主频为 2.5 GHz。

3.2 结果与分析

3.2.1 2 个 FBG 光谱重叠

第一组实验选取 FBG1、FBG2 这 2 个传感器,二者的中心波长分别为 1540.721 nm、1541.308 nm。将 FBG2 置于室温(约 25 ℃)下并保持温度不变;FBG1 置于恒温箱中,先调节温度在 25~75 ℃变化,然后调节相应衰减器反射率 r_1 、 r_2 分别为 0.8、1。2 个 FBG 谱形不重叠、部分重叠和完全重叠的典型叠加状态如图 4 所示。

针对上述光谱重叠现象,采用 ABC 算法和 IABC 算法完成重构过程。其中,IABC 算法的选择概率设为 0.25,2 种算法的种群规模、更新上限 limit 和最大循环次数分别设定为 60、100 和 200。将 2 种算法在不同温度下分别独立重复 10 次运算,取结果平均值得出各个 FBG 的中心波长结果如表 1 和表 2 所示。根据表 1 和表 2 的仿真结果可知:当 FBG1 和 FBG2 的光谱发生部分重叠和完全重叠时,ABC 算法和 IABC 算法都可识别出重叠的中心波长,区别在于识别精度。ABC 算法总体误差在 ± 30 pm 以内,IABC 算法最大误差为 5 pm,平均误差为 1.4 pm,即 IABC 算法解调精度明显优于 ABC 算法。

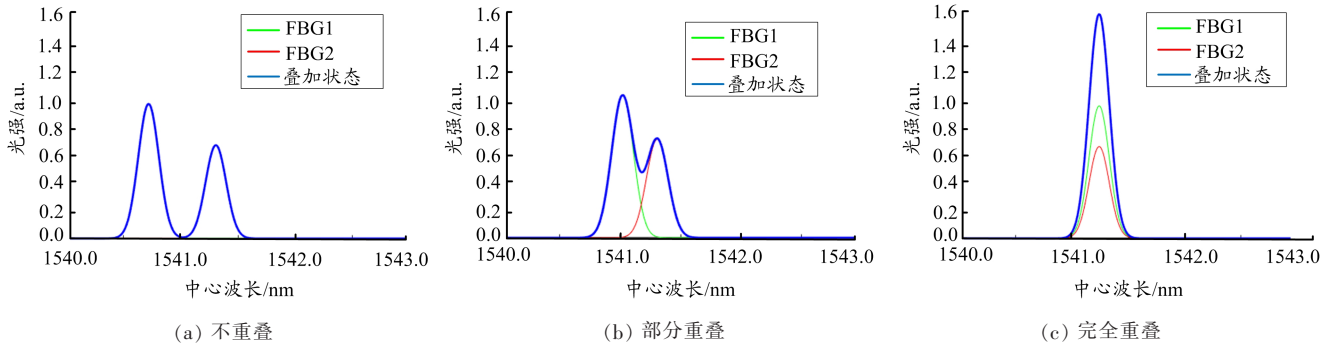


图 4 2 个 FBG 光谱重叠图

3.2.2 3 个 FBG 光谱重叠

第二组实验选取 3 个 FBG 传感器,FBG1、FBG2 和 FBG3 中心波长依次为 1540.721 nm、1541.308 nm 和 1541.872 nm。将 FBG2 置于室温下并保持温度不变;FBG1 置于恒温箱中,调节温度在 25~70 ℃变化;FBG3 置于恒温箱中,调节温度在 25~20 ℃变化。调节相应衰减器反射率 r_1 、 r_2 和 r_3 分别为 1、0.85 和 0.62。3 个 FBG 谱形不重叠、部分重叠和完全重叠的典型叠加状态如图 5 所示。

根据图 5 光谱重叠情况,保持 2 种算法参数不变,分别对其重叠情况运行 10 次,取结果平均值,得到中心波长解调结果如图 6 所示。可以看出,ABC 算法解调结果线性度较差,IABC 算法解调结果呈明显的线性关系,且波长误差浮动较小,都在 1 pm 以内。最终得到的平均耗时信息如表 3 所示,相对于 ABC 算法,IABC 算法的运行时间更小,大约只有前者的十分之一。由此可以证明,与 ABC 算法相比,IABC 算法在光谱重叠识别中的效率和精度更高。

3.2.3 4 个 FBG 光谱重叠

第三组实验选取 4 个 FBG 传感器,FBG1、FBG2、FBG3 和 FBG4 中心波长分别为 1540.721 nm、

表 1 ABC 算法解调中心波长及误差值

次数	T/℃	λ_{B1}/nm	误差/nm	λ_{B2}/nm	误差/nm
第 1 次	25	1540.743	0.022	1541.327	0.019
第 2 次	30	1540.705	0.016	1541.286	0.022
第 3 次	35	1540.711	0.001	1541.336	0.028
第 4 次	40	1540.728	0.007	1541.268	0.040
第 5 次	45	1540.73	0.009	1541.322	0.014
第 6 次	50	1540.719	0.002	1541.327	0.019
第 7 次	55	1540.737	0.016	1541.32	0.012
第 8 次	60	1540.742	0.021	1541.352	0.044
第 9 次	65	1540.746	0.025	1541.341	0.033
第 10 次	70	1540.752	0.031	1541.348	0.040

表 2 IABC 算法解调中心波长及误差值

次数	T/℃	λ_{B1}/nm	误差/nm	λ_{B2}/nm	误差/nm
第 1 次	25	1540.725	0.004	1541.307	0.001
第 2 次	30	1540.719	0.002	1541.308	0.000
第 3 次	35	1540.716	0.005	1541.312	0.004
第 4 次	40	1540.726	0.005	1541.306	0.002
第 5 次	45	1540.724	0.003	1541.304	0.004
第 6 次	50	1540.720	0.001	1541.310	0.002
第 7 次	55	1540.723	0.002	1541.309	0.001
第 8 次	60	1540.718	0.003	1541.313	0.005
第 9 次	65	1540.722	0.001	1541.311	0.003
第 10 次	70	1540.717	0.004	1541.305	0.003

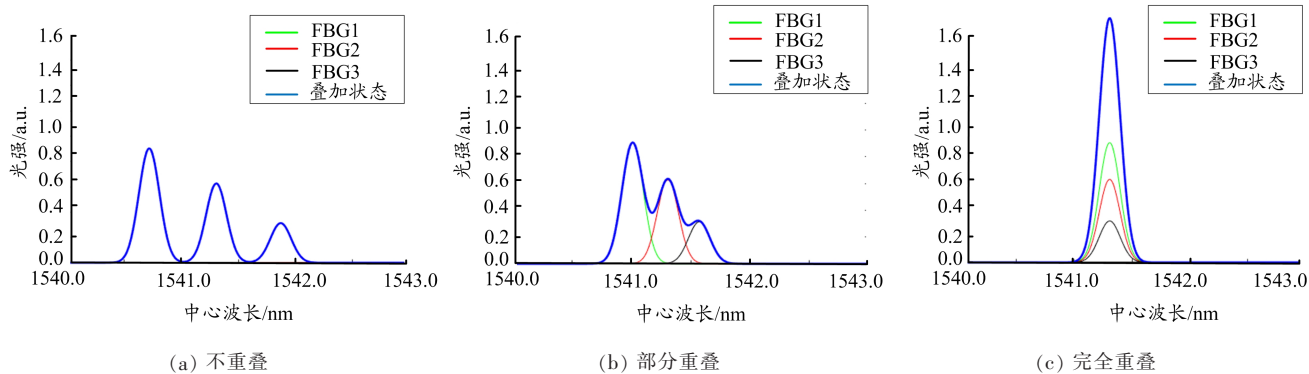


图5 3个FBG光谱重叠图

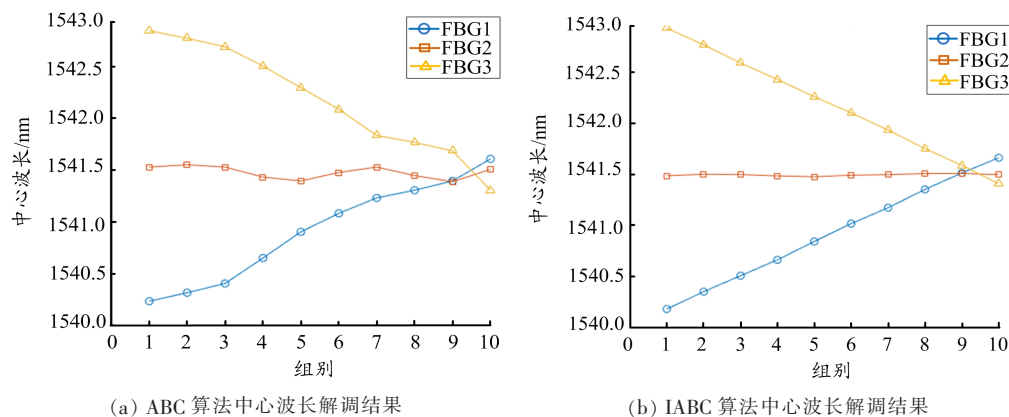


图6 2种算法中心波长解调结果

表3 2种FBG解调算法平均耗时

标号	平均耗时/s	
	ABC 算法	IABC 算法
1	30.20	3.21
2	28.68	3.07
3	29.25	3.11
4	28.58	2.97
5	28.73	2.88
6	28.48	2.62
7	29.02	3.05
8	28.78	2.92
9	27.97	3.42
10	28.66	3.08

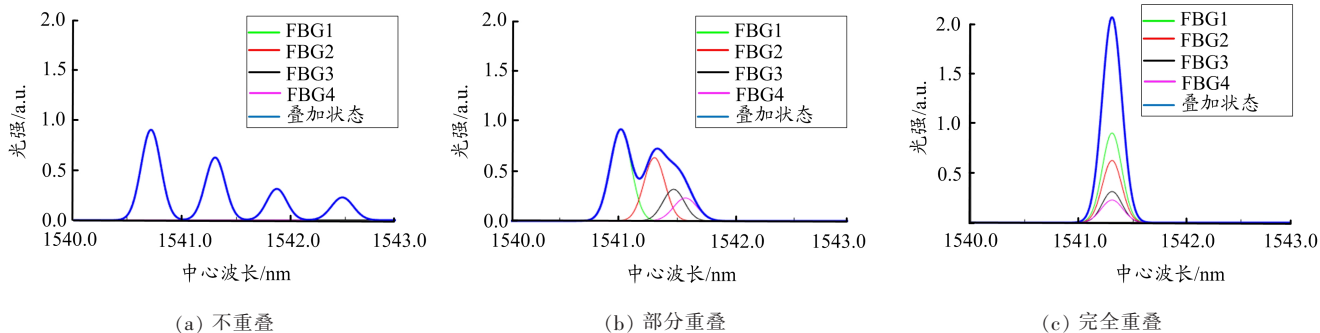


图7 4个FBG光谱重叠图

1541.308 nm、1541.872 nm 和 1542.493 nm, 调整相应衰减器反射率 r_1 、 r_2 、 r_3 和 r_4 分别为 1、0.78、0.52 和 0.30。随机改变温度使中心波长谱形实现随机重叠(包括部分重叠和完全重叠)。4 个 FBG 谱形典型叠加状态如图 7 所示。

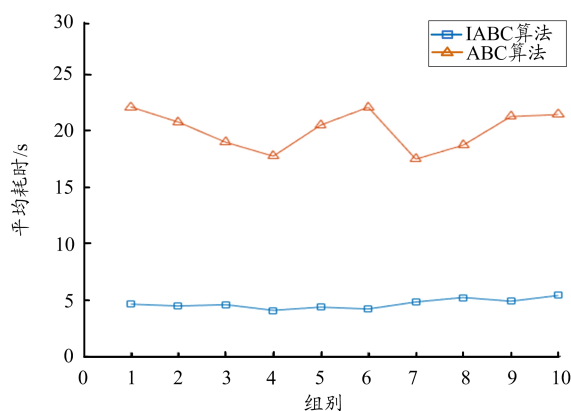
在实验过程中采用相同的算法参数,针对各组数据独立重复运行算法 10 次,并计算中心波长的平均值,由此得到的实验结果如图 8 所示。可以看出,2 种算法的解调结果都与实际值相差不大。ABC 算法平均误差在 23 pm 左右,平均耗时在 23 s 上下波动;而 I-ABC 算法平均误差在 3 pm 以内,平均耗时在 5 s 左

右,解调精度和解调时间都明显优于 ABC 算法,验证了 IABC 算法在 4 个 FBG 光谱重叠解调中依然适用。

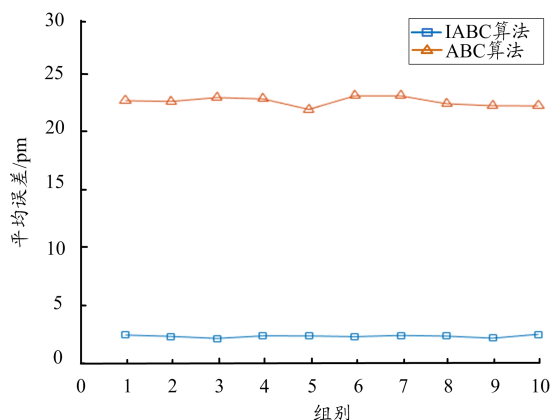
3.2.4 多个 FBG 光谱重叠

为了验证 IABC 算法在多个 FBG 重叠下的中心波长解调中的应用情况,本文对 8 个、12 个和 20 个 FBG 光谱完全重叠进行仿真,选取中心波长接近的传感器,调整实验温度至光谱完全重叠,采用 IABC 算法解调中心波长。

在实验过程中仍然采用相同的算法参数,每组实验独立重复运行 10 次后得到的结果如表 4 所示。从表 4 可知,随着 FBG 复用数量的增加,算法中粒子维



(a) 2种算法解调中心波长平均耗时



(b) 2种算法解调中心波长平均误差

图 8 2种算法解调中心波长平均误差和平均耗时

度增加,对算法的耗时与精度都有一定影响,但IABC算法解调误差依然控制在3.6 pm以内,解调时间控制在7 s内。实验表明IABC算法在多FBG复用系统中依然适用,能满足精度与时效性的要求。

4 结束语

本文就FBG传感网络重叠光谱解调问题提出了一种基于ABC算法及IABC算法的解调技术,通过构造并求解FBG传感网络解调模型得到各FBG中心波长。实验实际测量的光谱并非呈现理想高斯谱形,将其与高斯光谱数值仿真进行比较,进一步验证所提算法可行性。根据ABC算法与IABC算法的仿真分析结果可知,IABC算法采用多维搜索的方式实现重叠光谱

的解调,容易得到全局最优解,同时收敛效率更高,相对于ABC算法具有一定的优势。实验结果表明:IABC算法可以对重叠光谱进行快速、精确解调,解调时间不超过7 s,解调误差不超过3.6 pm,温度测量精度达 ± 0.5 °C,考虑到光谱仪的精度为0.01 nm,对应的测量温度为1 °C。

因此,IABC算法具有实际意义,特别在大规模的FBG传感网络实验中,与现有算法相比具有更准确的性能解调性能,该算法对提升FBG传感网络容量、扩大FBG传感器的实际工程应用具有参考价值。

参考文献:

- [1] 陈静,林雅婷,周清旭,等. 基于峰值匹配分布式估计算法的光纤布拉格光栅传感网络重叠光谱的波长解调[J]. 光子学报,2019,48(4): 0406002-1-0406002-2.
- [2] 祁耀斌,吴敢峰,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.
- [3] 荣民. 基于光纤传感技术的液体溶液浓度测量关键问题研究[D]. 保定:河北大学,2008.
- [4] 陈勇,程亚男,刘焕淋. 利用改进粒子群优化算法解调光传感重叠光谱信号[J]. 中国激光,2018,45(7):259-269.
- [5] 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):222-229.
- [6] SHI C Z, CHAN C C, JIN W, et al. Improving the performance of a FBG sensor network using a genetic algorithm[J]. Elsevier B.V., 2003, 107(1): 57-59.
- [7] GONGJ M, MACALPINE J M K, CHAN C, et al. A novel wavelength detection technique for fiber bragggrating sensors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(5): 678-680.
- [8] LIU D, TANG K, YANG Z, et al. A fiber Bragg grating sensor network using an improved differential evolution algorithm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(19): 1385-1387.
- [9] 丁晖,吴相楠,梁建奇,等. 粒子群优化算法在光纤光栅传感器波长解调中的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(2):563-566.
- [10] 黄洪全,何子述,方方,等. 多重谱峰的分解方法[J]. 原子能科学,2010,44(9):1114-1119.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 张梅,张伟,章鹏,等. 光纤光栅谱形复用解调中粒子群算法的参数优化[J]. 中国激光,2019,46(7):276-283.
- [14] 何尧,刘建华,杨荣华. 人工蜂群算法研究综述[J]. 计算机应用研究,2018,35(5):1281-1286.
- [15] 孔翔宇. 几类优化问题的人工蜂群算法[D]. 西安:西安电子科技大学,2016.
- [16] 李志斌,刘畅,黄启韬. 改进优化算法FBG传感网复用能力的研究[J]. 激光与红外,2018,48(2):249-254.