

# 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

齐跃峰 李彩玲\* 江鹏 王璐 张景浩 王伟

燕山大学信息科学与工程学院, 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛, 066004

**摘要** 利用光谱形状复用技术和模拟退火算法对光栅光谱重叠现象进行了理论分析和实验研究, 分别研究了2个、3个和4个光栅光谱部分重叠和完全重叠时的区分识别情况。研究表明, 当光纤光栅反射谱发生部分重叠或完全重叠时, 可以利用模拟退火算法实现光栅的区分识别, 且不多于4个光栅的光谱重叠能够被很好地区分识别, 波长识别误差小于10 pm, 实验结果与理论能够很好地吻合。此方法为大规模光纤光栅传感网络中光栅复用解调提供了一种可供选择的解决方案。

**关键词** 光纤光栅; 光谱形状复用; 模拟退火算法; 复用网络; 解调

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0906004

## Spectral Shape Multiplexing Technology of Fiber Bragg Gratings Using Simulated Annealing Algorithm

Qi Yuefeng Li Cailing Jiang Peng Wang Lu Zhang Jinghao Wang Wei

Information Science & Engineering College, Yanshan University, Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** The spectral shape multiplexing technology and the simulated annealing algorithm are used to theoretically analyze and experimentally study on the spectral overlap of fiber Bragg gratings(FBGs). When the spectra of FBGs are fully or partially overlapped, the recognition of 2, 3 and 4 gratings multiplexing is discussed. In this research, no more than 4 spectra overlapped gratings are well distinguished and their recognition accuracies are within 10 pm, which are in agreement with the theory. The method provides an alternative solution for the multiplexing demodulation of fiber grating sensing network in large scale.

**Key Words** fiber grating; spectral shape multiplexing; simulated annealing algorithm; multiplexing network; demodulation

**OCIS code** 060.2370; 050.2770; 280.4788

### 1 引言

近年来,随着光纤传感技术的发展,各种新型光纤传感器被开发出来。由于具有抗电磁干扰、体积小、质量轻、耐腐蚀、易于实现网络复用等优点,光纤布拉格光栅(FBG)作为新型传感元件受到广泛关注并已被应用于光学传感和光学通信等领域,以及应用于许多物理量如应力、温度、速度、加速度等的测量<sup>[1-5]</sup>。其中实现网络复用是FBG的一个突出优点,常用的复用技术包括波分复用、时分复用<sup>[6]</sup>和光谱形状复用<sup>[7]</sup>。波分复用和时分复用采用传统的峰值检测方法,即通过检测光纤光栅的峰值波长来得到需要的传感信息。FBG传感器是通过检测反射波长的变化来实现传感的<sup>[8-9]</sup>,在大范围分布式应用环境下光栅数量很多,如果相邻的FBGs光谱间有重叠,峰值检测方法就会引起串扰从而极大地影响解调结果,而且有限的光源带宽也限制了

收稿日期:2015-04-16; 收到修改稿日期:2015-05-05

基金项目:国家自然科学基金(61275093、61205084)、河北省自然科学基金(F2015203277)、秦皇岛市科学技术与发展计划项目(201502A035)

作者简介:齐跃峰(1972—),男,博士,教授,主要从事光纤光栅及光纤传感等方面的研究。E-mail:yfqi@ysu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail:cailing93@163.com

可复用的光栅数目<sup>[10-11]</sup>。光谱形状复用是通过光谱形状的信息来获取 FBG 传感信息的,当作用在 FBG 上的应变或温度均匀变化时,FBG 反射谱的形状不发生改变只发生了波长漂移,这就允许传感网络中的光谱出现重叠,从而增加光源的利用率和可复用光栅的数目<sup>[12]</sup>。

本文利用模拟退火算法(SA)<sup>[13]</sup>对光纤光栅光谱形状复用解调技术进行研究。模拟退火算法是一种非线性解决组合优化问题的方法,该方法基于对退火过程的模拟,对每个解进行邻域搜索,采用 Metropolis 接受准则判断是否接受某个新解,且用降温速率表来控制算法的进程,最后求得最优解<sup>[14]</sup>。近年来,已有学者利用模拟退火算法对光栅复用网络的解调进行了研究,实现了 3 个光栅光谱重叠情况下的复用解调。但当复用网络中光栅数量增大时,会出现解调误差增大、解调效率降低等问题<sup>[15]</sup>。改进了对模拟退火算法,提高了解调效率,增加了光栅光谱重叠解调数量,实现了 4 个光栅光谱重叠情况下的解调,为大规模光纤光栅传感网络中提高光栅复用率提供了一种可能的选择方案。

## 2 模拟退火算法与光谱形状复用原理

利用模拟退火算法对光纤光栅的光谱形状复用传感网络进行解调,其复用网络的结构原理如图 1 所示。

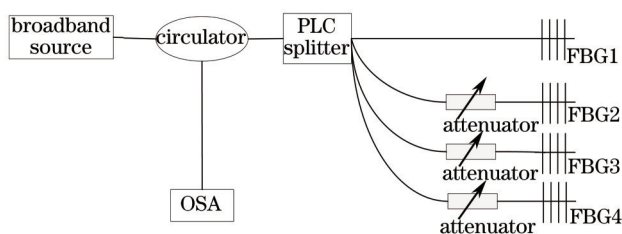


图 1 FBG 光谱形状复用系统结构原理图

Fig.1 Structure principle of FBG spectral shape multiplexing system

图 1 中,PLC splitter 为平面光波导分路器,OSA 为光谱仪。宽带光源发出的光经环形器分别进入光栅 FBG1、FBG2、FBG3、FBG4,经光栅反射回来再通过环形器进入光谱仪形成反射谱。假设  $g_i(\lambda)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 是 FBG 的反射谱,那么光谱仪接收到的光谱可以表示为

$$R(\lambda) = \sum_i r_i g_i(\lambda - \lambda_{bi}) + N(\lambda), i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

式中  $r_i$  ( $0 \leq r_i \leq 1$ ) 是各个 FBGs 的反射率,  $\lambda_{bi}$  是 FBG 反射谱的中心波长,  $N(\lambda)$  是系统产生的随机白噪声。从(1)式的原始光谱构造一个新的合成谱,如(2)式:

$$R_r(\lambda) = \sum_i r_i g(\lambda - s_i), i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

式中  $s_i$  为重构光谱的中心波长,那么原始光谱和合成谱间差的平方且求积分可表示为

$$f(s) = \int_0^\infty [R(\lambda) - R_r(\lambda)]^2 d\lambda. \quad (3)$$

从(3)式中可以看出,当  $s_i = \lambda_{bi}$  时,  $f(s)$  的值最小,即当  $f(s)$  最小时,  $s_i$  各个值对应的值就是 FBG 反射谱的中心波长。因此算法的思路就是求解出一组  $s_i$ ,使得  $f(s)$  的值最小。

传统的模拟退火算法包含几个要素,分别是状态空间、状态产生函数、初始温度、降温速率表、Metropolis 准则、内循环终止准则和外循环终止准则<sup>[16]</sup>。基本思想是从初始解开始,温度控制参数下降时会产生一系列的马尔科夫链,对于温度控制参数的每一个取值,算法持续进行“产生新解-判断-接受或舍弃”的迭代过程,其中由状态产生函数控制新解的产生,由 Metropolis 接受准则判断是否接受新解,利用温度控制参数进行降温,最终求得目标函数的最优解。上述过程中,内循环和外循环总的迭代次数造成的计算量非常大,使得算法收敛到最优解的速度缓慢。为了提升算法的收敛速度,本研究在内循环中设置阈值,同时加入重退火的操作<sup>[16-17]</sup>,即进行“产生新解-判断-接受或舍弃-退火-判断已接受解的个数-重退火”的迭代过程,算法实现具体过程如下:

1) 从解空间中随机抽取一组解  $\{s_i\}$ ,作为当前解  $\{s_0\}$ ,代入目标函数  $f(s)$ ,得到  $f(s_0)$ ,同时设置初始温度  $T_0$ 。

2) 在当前解的基础上随机产生新解,并判断是否在解空间中,如满足则将新解记为 $\{s_{new}\}$ ,并代入目标函数得到 $f(s_{new})$ ,若不满足则继续重新获取新解。其中新解的产生如(4)式所示:

$$s_{new} = s_0 + 0.01 \times F \times X_{rand}, \quad (4)$$

式中 $F$ 为解空间的步长, $X_{rand}$ 是(0,1)内的随机数。

3) 利用Metropolis接受准则判断是否接受新解,若接受则将新解作为当前解,若不接受,则将新解舍弃。Metropolis接受准则的接受概率公式表示为

$$P = \begin{cases} 1, \Delta f < 0 \\ \frac{1}{1 + \exp(\Delta f / T_0)}, \Delta f > 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $\Delta f = f(s_{new}) - f(s_0)$ ,当 $\Delta f > 0$ 时,若 $P \geq X_{rand}$ ,则保留新解,反之舍弃新解。

4) 按照一定的降温准则进行降温,并且重复步骤2)和步骤3)。

5) 降温 $N$ 次后,判断是否得到最优解;若没有,则进行重退火。

6) 直到计算得到最优解,算法结束。

算法流程图如图2所示。

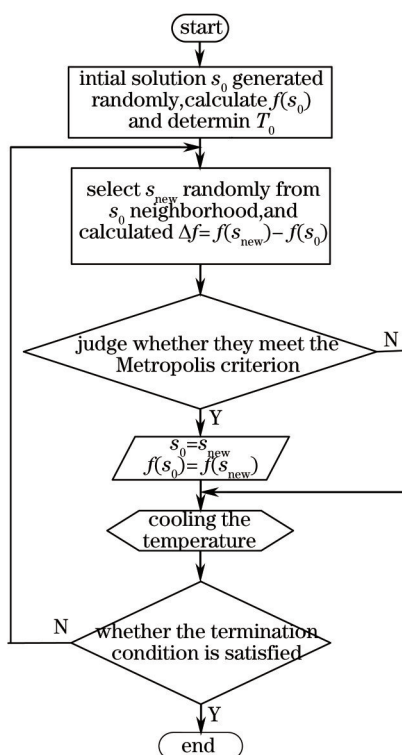


图2 模拟退火算法流程图

Fig2 Flowchart of SA algorithm

### 3 理论计算与数值仿真

在数值仿真过程中,设FBG的反射谱均为高斯谱,则有

$$g_i(\lambda - \lambda_{Bi}) = r_i \exp\left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_{Bi}}{B_c}\right)^2\right], \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

式中 $\lambda_{Bi}$ 和 $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )分别表示第 $i$ 个FBG反射谱的中心波长和反射率, $B_c$ 为FBG的3 dB带宽,理论上 $B_c = 0.2$  nm。取 $n = 2, 3, 4$ 分别进行仿真分析,即分别对2个、3个和4个光谱重叠条件下的复用问题进行研究。

#### 3.1 2个FBGs重叠复用

当 $n = 2$ 时,取2个FBGs的反射率分别为 $r_1 = 1$ ,  $r_2 = 0.7$ ,反射谱的中心波长分别为 $\lambda_{B1} = 1531.3$  nm,

$\lambda_{B2} = 1531.7 \text{ nm}$ 。为了模拟实际的测量环境,在FBG的反射谱上加入信噪比(SNR)为13 dB的随机白噪声。要从上述加了白噪声的原始光谱中解调出2个FBGs反射谱的中心波长,需要选择合适的模拟退火参数。文中选取的参数分别为初始温度为  $T_0 = 100$ ,最大迭代次数  $L = 500$ ,重退火前接收新解的个数  $N = 500$ ,即仿真只需进行一次退火,降温速率函数用降温最快的指数降温,其函数表示为

$$T_k = 0.95^k T_0, k = 1, 2, 3, \dots, \quad (7)$$

式中  $T_k$  为第  $k$  步的温度值,  $T_0$  为初始温度。

将  $\lambda_{B2}$  的值固定在 1531.7 nm 不变,  $\lambda_{B1}$  的值从 1531.3 nm 以 0.05 nm 的步长变到 1531.8 nm,得到的10个  $\lambda_{B1}$  分别与  $\lambda_{B2}$  组合形成2个FBGs的复用网络。对以上10对组合分别计算10次,得到  $s_1$  和  $s_2$  的仿真结果的平均值,如图3所示,仿真结果中2个FBGs波长误差的平均标准方差分别为 2.36  $\mu\text{m}$  和 1.93  $\mu\text{m}$ ,即误差可控制在 5  $\mu\text{m}$  以内。

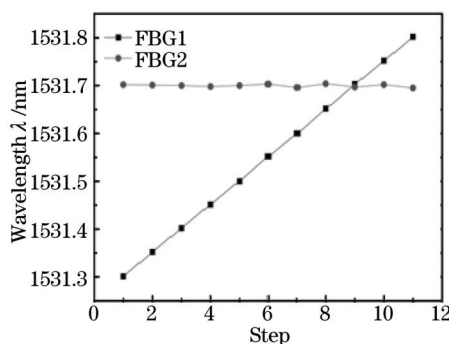


图3 2个FBGs复用的仿真结果

Fig.3 Simulation results of two FBG

### 3.2 3个FBGs重叠复用

$n = 3$  时,3个FBGs的反射率分别取  $r_1 = 1$ ,  $r_2 = 0.5$  和  $r_3 = 0.7$ ,3个反射谱的初始中心波长分别设为  $\lambda_{B1} = 1531.2 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{B2} = 1531.4 \text{ nm}$  和  $\lambda_{B3} = 1531.6 \text{ nm}$ ,此时,利用上述设置好的算法参数已经不能解调出想要的解,需重新寻找较好的参数。经多次实验,最终确定的参数为:初始温度  $T_0 = 100$ ,最大迭代次数  $L$  取为无穷大,重退火前接受新解的个数为  $N = 1000$ 。降温速率函数采用线性函数,其表达式如(8)式所示:

$$T_k = 0.95T_{k-1}. \quad (8)$$

利用设置好的参数,对给定反射率和中心波长的3个FBGs复用网络仿真10次,可以得到误差在10  $\mu\text{m}$  内的结果。改变波长设置,当  $\lambda_{B1} = 1531.2 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{B2} = \lambda_{B3} = 1531.6 \text{ nm}$  及  $\lambda_{B1} = \lambda_{B2} = \lambda_{B3} = 1531.6 \text{ nm}$  即在有2个波长重合和3个波长重合的情况下继续各仿真10次,得到的3个光栅波长的标准方差如表1所示。

表1 3个波长方差的均方根比较

Table 1 Root-mean-square values of the deviation for three FBGs

Step	$\delta_{s1}$	$\delta_{s2}$	$\delta_{s3}$
Step1	4.53	6.02	4.76
Step2	4.33	3.70	3.86
Step3	4.47	5.55	5.64

表1中  $\delta_{s1}$ ,  $\delta_{s2}$ ,  $\delta_{s3}$  分别表示解调出的3个光栅波长的标准方差。由第3组数据结果可以看出,即使在3个光栅重叠的情况下,也可以实现光栅的解调,误差在10  $\mu\text{m}$  以内。另外,当重叠波长数目增加时,需要进行重退火操作,且单次退火的次数增加,即需要降到更低的温度,退火的速度减慢,更有利搜索到最优解。

### 3.3 4个FBG重叠复用

$n = 4$  时,取4个FBGs的反射率分别为  $r_1 = 1$ ,  $r_2 = 0.5$ ,  $r_3 = 0.7$  和  $r_4 = 0.9$ ,反射谱的中心波长分别设置为  $\lambda_{B1} = 1530.1 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{B2} = 1530.3 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{B3} = 1530.6 \text{ nm}$  和  $\lambda_{B4} = 1531 \text{ nm}$ 。在经过多次调试后,选取的参数分别为初始温度为  $T_0 = 200$ ,最大迭代次数  $L$  选为无穷大,重退火前接受新解的个数  $N = 100$ 。当降温速率函数选择指数降温 and 线性降温时,均无法在仿真过程中找到最优解,因而降温速率选择典型的对数衰减函数,如(9)式

所示:

$$T_k = \frac{T_0}{\ln k} \quad (9)$$

利用以上参数仿真 10 次, 4 个 FBGs 都可以得到较小的结果。改变波长设置, 分别令  $\lambda_{B1} = 1530.1 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{B2} = 1530.3 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{B3} = \lambda_{B4} = 1531 \text{ nm}$ (2 个光栅重叠), 及  $\lambda_{B1} = 1530.1 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{B2} = \lambda_{B3} = \lambda_{B4} = 1531 \text{ nm}$ (3 个光栅重叠), 及  $\lambda_{B1} = \lambda_{B2} = \lambda_{B3} = \lambda_{B4} = 1531 \text{ nm}$ (4 个光栅重叠), 当光栅重叠时, 利用上述参数进行仿真时, 已找不到最优解, 需重新设置参数。本研究中, 设置当 2 个光栅重叠、3 个光栅重叠和 4 个光栅重叠时的重退火前接收解的个数分别为 300、500、700, 其他参数不变可以解调出较好的结果。4 种情况得到的波长误差的标准方差如表 2 所示。

表 2 中  $\delta_{s1}$ ,  $\delta_{s2}$ ,  $\delta_{s3}$  和  $\delta_{s4}$  分别表示 4 个波长误差的标准方差。由表 2 的仿真结果表明, 当 4 个光纤光栅光谱发生重叠或部分重叠时, 模拟退火算法仍可以将重叠波长识别出来, 识别误差在 10  $\mu\text{m}$  以下。通过对不同数量复用光栅的理论解调的比较, 可得到如下结论: 随着波长数的增加, 总的迭代次数明显增加, 且降温速率要求越慢越好; 在波长数为 2 个的时候只需要一次退火, 而增加到 3 个或 4 个的时候都需要进行多次退火, 即需要多次重新搜索; 波长没有重叠时, 重退火前迭代次数要求小, 随着重叠波长数的增加, 重退火次数相应增加。

表 2 4 个波长误差的标准误差比较

Table 2 Root-mean-square values of the deviation for four FBGs

Step	$\delta_{s1}$	$\delta_{s2}$	$\delta_{s3}$	$\delta_{s4}$
Step1	3.45	6.86	4.76	4.36
Step2	4.97	5.86	5.77	4.69
Step3	4.97	5.64	5.67	4.96
Step4	4.85	5.46	5.81	4.68

## 4 实验研究

实验装置原理图如图 1 所示, 来自宽带光源的光经过环形器及分光器进入 4 根 FBGs 光栅中, 经光栅反射回的光进入光谱仪形成合成光谱。在进行实验之前, 利用光谱仪记录每个光栅的独立反射谱, 以方便构造(2)式的重构光谱。测得室温中 4 根光栅的中心波长分别为 1558.94、1558.97、1559.04、1559.13 nm, 其在光谱仪的合成谱如图 4(a)所示。实验过程中, 将 FBG1、FBG3、FBG4 置于室温环境中, 保证其光谱不发生漂移,

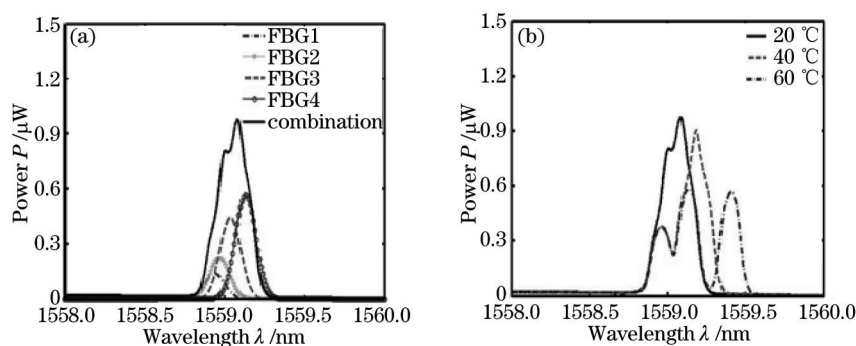


图 4 (a) 4 个光栅反射谱的原始合成谱; (b) 不同温度下 4 个光栅反射谱的合成谱

Fig.4 (a) Reflected combination spectra of the four FBGs; (b) reflected spectra of the measured when temperature value is changed

同时, 将 FBG2 的裸光栅完全放置于 60  $^{\circ}\text{C}$  的热水中, 使其反射谱发生一定程度的漂移, 此时记录下光谱仪上的合成谱。利用酒精温度计记录水温的变化, 每隔 5  $^{\circ}\text{C}$  记录一次光谱仪的合成谱。在记录光谱仪上的光谱时, 将其谱宽设置为 2 nm, 取 2000 个采样点, 也就是每隔 1 pm 取一对应点的坐标, 然后利用模拟退火算法将每组采集到的合成谱进行识别。图 4(b)是温度分别在 20  $^{\circ}\text{C}$ 、40  $^{\circ}\text{C}$ 、60  $^{\circ}\text{C}$  的时候光谱仪对应的合成谱。

在计算过程中, 取最大迭代次数  $L$  为无穷大, 重退火前接收新解个数  $N = 500$ , 初始温度  $T_0 = 200$ , 退火速度选择典型的对数降温, 对每一温度下对应的光栅组合分别进行 10 次计算, 其计算结果的平均值如图 5

所示。计算出的4个FBG波长误差的平均标准方差分别是5.61、4.98、6.22、7.32 pm。

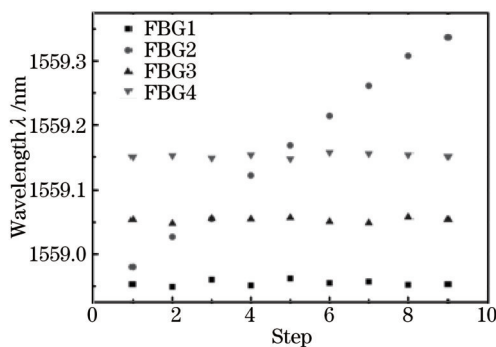


图5 不同的温度作用在FBG2时,4个FBG光谱的解调结果

Fig.5 Demodulation results of the four FBGs with different temperatures applied on the FBG2

## 5 结 论

增加光栅复用数量、提高复用率一直是光纤光栅复用解调技术中的一个重要问题。在大规模分布式光纤光栅传感系统中,随着光栅数量的增加,光栅波长间隔越来越窄,当被测物理量变化剧烈时相邻光栅很可能会出现光谱重叠,而传统的波长解调技术对邻近光栅的光谱重叠难以区分,从而限制了光栅复用数量。本尝试利用光谱形状复用技术和模拟退火算法对光栅光谱重叠现象进行了理论分析和实验研究,分别研究了2个、3个和4个光栅光谱部分重叠和完全重叠时的区分识别情况。研究表明,当光纤光栅反射谱发生部分重叠或完全重叠时,可以利用模拟退火算法实现光栅的区分识别。在本研究中,不多于4个光栅的光谱重叠能够被很好地区分识别开来,波长识别误差小于10 pm。搭建了实验系统,在实验室完成了4个光栅光谱重叠的识别,实验结果与理论能够很好地吻合。该方法为大规模光纤光栅传感网络中光栅解调问题提供了一种可供选择的解决方案。

但此方法依然存在不足和待改进的地方,如需要事先已知每个光栅初始状态的光谱特征,这在工程应用上是一个现实的挑战:光纤光栅重叠数量增加时退火迭代次数增加,计算效率下降,难以适应要求快速响应的应用环境,不同数量光栅光谱重叠时退火算法参数的选择不够优化。这些问题还有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 J M Gong, C C Chan, W Jin, *et al.*. A novel wavelength detection technique for fiber Bragg grating sensors[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2002, 14(5): 678-680.
- 2 C C Chan, C Z Shi, J M Gong, *et al.*. Enhancement of the measurement range of FBG sensors in a WDM network using a minimum variance shift technique coupled with amplitude-wavelength dual coding[J]. Opt Commun, 2003, 215(4-6): 289-294.
- 3 Ding Hui, Wu Xiangnan, Liang Jianqi, *et al.*. Application of PSO algorithm in wavelength detection of FBG sensors[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(2): 563-566.  
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中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 563-566.
- 4 Wang Feifei, Zhang Li, Yang Lingzhen, *et al.*. Quasi-distributed fiber Bragg grating sensing network based on fiber chaotic laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0806006.  
王斐斐, 张 丽, 杨玲珍, 等. 基于混沌光纤激光的准分子分布式布拉格传感网络[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0806006.
- 5 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Li Shujuan, *et al.*. Research on control technology of fiber grating wavelength by pulling force in grating fabrication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706009.  
宋志强, 祁海峰, 李淑娟, 等. 光纤光栅制作中波长拉力控制技术的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706009.
- 6 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength division multiplexing/time-division multiplexing [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2196-2201.  
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2196-2201.
- 7 Kang Shouqiang, Ju Hongbing, Yang Guangxue, *et al.*. Demodulation technique of FBG multiplexed sensing based on wave length division multiplexing and spectral shape multiplexing[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2009, 20(4): 466-469.

- 康守强, 巨红兵, 杨广学, 等. 波分复用加光栅光谱形状复用的FBG传感解调技术[J]. 光电子·激光, 2009, 20(4): 466-469.
- 8 Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study of fiber grating sensor monitoring the crack of concrete[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0114001.
- 田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器检测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114001.
- 9 Sai Yaozhang, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, *et al.*. Acoustic emission location technology research based on FBG sensor network and time reversal focusing imaging method[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805003.
- 赛耀樟, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于FBG传感网络和时间反转聚焦成像方法的声发射定位技术研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805003.
- 10 C Z Shi, C C Chan, W Jin, *et al.*. Improving the performance of a FBG sensor network using a genetic algorithm[J]. Sensors and Actuators A, 2003, 107(1): 57-61
- 11 C Z Shi, C C Chan, W Jin, *et al.*. Improving the performance of FBG sensors in a WDM network using a simulated annealing technique [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(1): 227-229.
- 12 Zhao Xuezheng, Li Pingchuan. Tabu search algorithm used to enhance the multiplexing capacity of FBG sensing system[J]. Journal of Optoelectronics · 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.
- 13 L Ingber. Very fast simulated annealing[J]. Math Comput Modeling, 1989, 12(8): 967-973.
- 14 Chen Huagen, Wu Jiansheng, Wang Jialin, *et al.*. Mechanism study of simulated annealing algorithm[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(6): 802-805.
- 陈华根, 吴健生, 王家林, 等. 模拟退火算法机理研究[J]. 同济大学学报, 2004, 32(6): 802-805.
- 15 Shen Zhenqiang, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan. Frequency-division multiplexing technique of fiber grating Fabry-Perot sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1173-1177.
- 沈震强, 赵建林, 张晓娟. 光纤光栅法布里-珀罗传感器频分复用技术[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1173-1177.
- 16 Zhu Haodong, Zhong Yong. A kind of renewed simulated annealing algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(6): 32-35.
- 朱颢东, 钟 勇. 一种改进的模拟退火算法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(6): 32-35.
- 17 Chen Huagen, Li Lihua, Xu Huiping, *et al.*. Modified very fast simulated annealing algorithm[J]. Journal of Tongji University, 2006, 34(8): 1121-1125.
- 陈华根, 李丽华, 许惠平, 等. 改进的非常快速模拟退火算法[J]. 同济大学学报, 2006, 34(8): 1121-1125.

栏目编辑: 王晓琰