

多峰光纤布拉格光栅传感信号的自适应寻峰处理

陈 勇¹ 杨 凯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 针对寻峰算法不能自适应检测光纤布拉格光栅(FBG)多峰值光谱的问题,提出了一种多峰自适应寻峰算法。采用滑动均值滤波法对光谱信号进行去噪预处理,并结合希尔伯特变换对多峰光谱自适应峰值区域分割;分析了谱峰的不对称特性,对单峰光谱采用基于非对称广义高斯模型的峰值修正策略,实现了峰值的精确定位。实验结果表明,与对比算法相比所提算法寻峰精度最高,稳定性最好,检测误差在1 pm以下,对分布式传感网络中的多峰值检测具有借鉴意义。

关键词 光纤光学;多峰寻峰算法;光纤布拉格光栅;自适应;非对称光谱

中图分类号 TP212 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0805008

A Self-adaptive Peak Detection Algorithm to Process Multi-peak Fiber Bragg Grating Sensing Signal

Chen Yong¹ Yang Kai¹ Liu Huanlin²

¹Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Network Control, MOE, 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 To the problem of the peak detection that could not be adaptively solved in the multi-peak fiber Bragg grating (FBG) signal, a self-adaptive multi-peak detection algorithm is proposed. This algorithm uses the sliding mean filtering method to remove the noise in spectral signal, and combines with the Hilbert transform to adaptively segment the peak area of the multi-peak spectrum. By analyzing the asymmetric characteristic of spectral peak, a peak value is compensated by the strategy based on the asymmetric generalized Gaussian model for improving position precision of spectral peak. Experimental results show that the proposed algorithm could gain higher accuracy and better stability than the comparing algorithms, and the detection error is under 1 pm. The proposed algorithm impacts on the multi-peak detection of distributed sensor networks.

Key words fiber optics; multi-peak detection algorithm; fiber Bragg grating; self-adaptive; asymmetric spectrum

OCIS codes 060.3735; 070.2025; 070.4790

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)作为一种光纤传感器件,由于其具有易弯曲、耐腐蚀、耐高温、安全性高、易串接复用、对宿主材料结构性能影响小等特点,被广泛应用于土木工程、石油化工、航空航天等工程领域。工程中将FBG传感器复用构成分布式传感网络,以实现恶劣环境下大型复杂工程结构的实时在线监测^[1-3]。FBG传感系统是通过建立其反射谱中心波长漂移量与待测物理参量间的函数关系,间接实现对待测参量变化量的

收稿日期: 2015-03-12; 收到修改稿日期: 2015-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61275077)、重庆市研究生科研创新项目(CYS14151)

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等方面的研究。

E-mail: chenrong@cqupt.edu.cn

*通信联系人。E-mail: liuhl@cqupt.edu.cn

检测^[4-5],而中心波长漂移量是由相应的寻峰方法解调获得,因此,FBG传感网络的检测精度与其解调系统的寻峰精度密切相关。

目前,FBG反射光谱的寻峰算法主要有直接寻峰算法、半峰检测算法、蒙特卡洛算法、概率统计算法、高斯拟合算法、多项式拟合法、三点寻峰算法及基于Steger的寻峰算法^[6-8]。直接寻峰算法及半峰检测算法^[9-10]计算复杂度低、响应时间短,由于其抗噪性能差,不适合复杂工程环境下的FBG光谱寻峰;蒙特卡洛算法、概率统计算法线性度不理想,寻峰精度有限;高斯拟合算法及多项式拟合法寻峰精度较高^[11],对谱型要求严格;三点寻峰算法较传统算法^[12],其寻峰精度有了大幅度提高,在寻峰过程中未考虑谱峰的不对称特性;基于Steger的寻峰算法^[13]引用提取图像灰度曲线峰值,并结合超高斯模型实现了不对称峰型的寻峰,但模型参数的选择对寻峰精度影响较大,寻峰算法的应用受到限制。同时,上述算法并未考虑分布式传感网络反射谱中多个峰的寻峰问题。目前FBG光谱多峰寻峰方法是在已知FBG原始中心波长的前提下,截取特定频谱范围内的单峰进行寻峰操作,而对于复杂的大型分布式FBG传感网络该方法并不适用。因此,设计一种FBG光谱多峰自适应精确寻峰算法对分布式传感网络的应用研究意义重大。

本文针对FBG传感网络寻峰算法存在的不足,提出了一种多峰自适应寻峰算法。采用五点滑动均值滤波法处理原始光谱信号,选用希尔伯特变换实现自适应多峰值区域分割,结合非对称广义高斯模型对高斯拟合寻峰位置进行校正,完成对谱峰的精确定位。

2 寻峰原理

2.1 FBG反射谱平滑处理

FBG传感系统在工程应用中会受到电器件及外界环境的影响,导致反射光谱中会含有一定的噪声,影响寻峰精度。因此,在寻峰操作前需要对FBG反射光谱信号进行平滑处理,以消除由信号噪声引起的“毛刺”和“假峰”对寻峰精度的影响^[14]。针对FBG光谱信号的平滑处理方法主要有三点滑动均值滤波法、五点滑动均值滤波法及七点滑动均值滤波法。图1所示为选用不同平滑滤波法进行平滑处理效果对比。

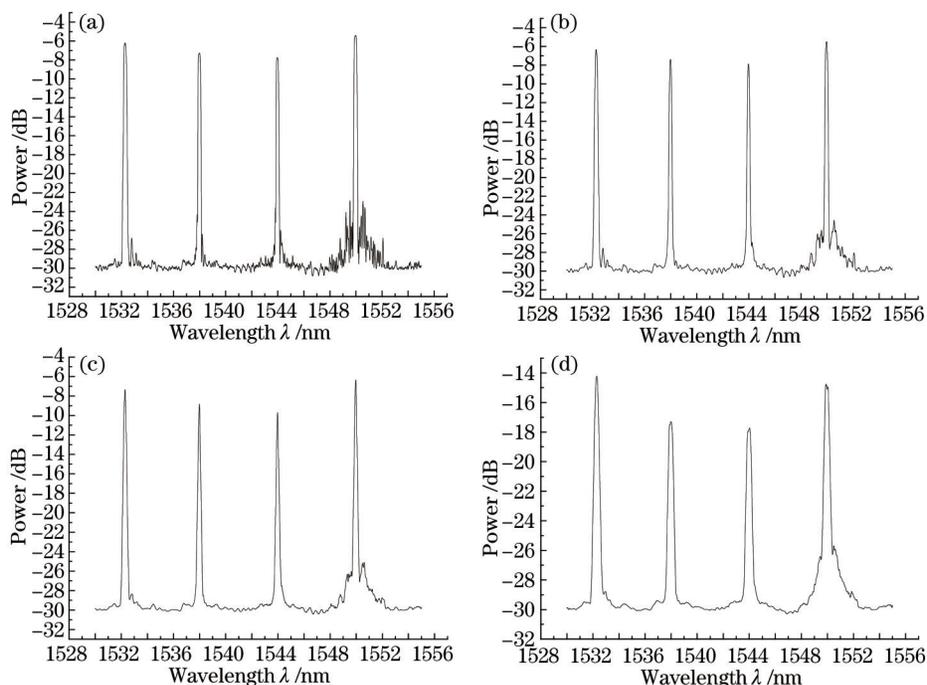


图1 不同平滑滤波法平滑处理效果图。(a)原始光谱;(b)三点滑动均值滤波处理;(c)五点滑动均值滤波处理;(d)七点滑动均值滤波处理

Fig.1 Results of different smoothing filtering methods. (a) Original spectrum signal; (b) three points smoothing filtering method; (c) five points smoothing filtering method; (d) seven points smoothing filtering method

分析可知,三点滑动均值滤波法并不能完全消除光谱信号中的“毛刺”,平滑效果较差;七点滑动均值滤波法平滑效果明显,但存在“过平滑”现象,丢失了一部分信号特征。而五点滑动均值滤波避免了上述方法

的不足,有效地剔除光谱信号中含有的“毛刺”和“假峰”。

现有的FBG光谱寻峰算法中,以拟合方法为基础的寻峰方法精度较高,但拟合方法难以拟合多峰信号。为了达到较高的寻峰精度,同时实现多峰光谱的自适应寻峰操作,需要对多峰信号的峰值区域进行分割预处理。

2.2 自适应峰值区域分割

对多峰光谱信号进行拟合寻峰,在采用五点滑动均值滤波法平滑预处理的基础上,将各个谱峰分割出来,以满足拟合寻峰的基本条件。希尔伯特变换在处理低频序列信号时能够有效抑制低幅度波动噪声干扰,信号经变换后具有奇函数性质^[15]。对于一个时域信号 $x(t)$,其希尔伯特变换为

$$\hat{x}(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \frac{1}{t-\tau} d\tau, \quad (1)$$

式中 $\hat{x}(t)$ 与函数 $x(t)$ 呈线性函数关系,且该变换可以表示为 $x(t)$ 与 $(\pi t)^{-1}$ 卷积的形式:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi t} * x(t), \quad (2)$$

可知 $\hat{x}(t)$ 可利用卷积与傅里叶变换间的关系计算获得,同时降低了计算的复杂度。

光谱信号经预处理并通过希尔伯特变换,其相位谱做 90° 相移,如图2所示原始信号的拐点对应于其希尔伯特变换信号两个突变极值点之间,其两个相邻的负、正极值所对应的波长位置分别作为原始光谱信号谱峰的左、右分割点,以此确定多峰光谱信号的峰值区域即为图2中A、B、C和D。

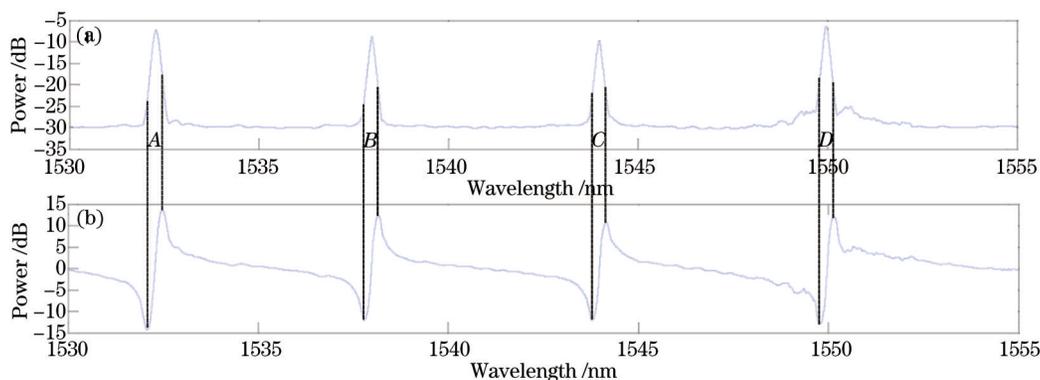


图2 希尔伯特变换效果图。(a) 平滑后的光谱; (b) 希尔伯特变换后的光谱

Fig.2 Result of Hilbert transform. (a) Smoothed spectrum signal; (b) Hilbert transformed spectrum signal

2.3 峰值定位

由于FBG谱峰在多数情况下并非完全对称^[16-17],需引入非对称广义高斯模型对拟合寻峰结果进行校正。标准的FBG光谱高斯拟合函数为:

$$f(x) = A \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda'_B}{\Delta \lambda_B} \right)^2 \right], \quad (3)$$

式中 λ 为FBG波长, λ'_B 为FBG中心波长, $\Delta \lambda_B$ 为反射谱的3 dB带宽, A 为反射谱的幅值。针对图2中FBG光谱分割获得的区域(即A、B、C和D光谱区域)分别进行高斯拟合寻峰,可获得各谱峰的峰值点 $\lambda'_{B0}, \lambda'_{B1}, \dots, \lambda'_{Bn}$ 。

非对称广义高斯模型的修正量可由左右方差的2个二阶参数 δ_l 、 δ_r 确定^[18],其计算公式如(4)式与(5)式:

$$\delta_l^2 = \frac{1}{N_l - 1} \sum_{\lambda_k < \lambda'_B}^{N_l} [f(\lambda_k) - f(\lambda'_B)]^2, \quad (4)$$

$$\delta_r^2 = \frac{1}{N_r - 1} \sum_{\lambda_k > \lambda'_B}^{N_r} [f(\lambda_k) - f(\lambda'_B)]^2, \quad (5)$$

式中 λ'_B 为由高斯拟合获得的峰值位置(即 $\lambda'_{B0}, \lambda'_{B1}, \dots, \lambda'_{Bn}$); λ_k 为分割获得各峰值区域内的采样点; N_l 和 N_r 分别表示 $\lambda_k < \lambda'_B$ 和 $\lambda_k > \lambda'_B$ 的样本数量。定义修正因子 α ,其表达式如(6)式:

$$\alpha = \frac{\delta_r^2}{\delta_l^2}, \begin{cases} \alpha < 1, & \text{spectrum shifted to the left} \\ \alpha = 1, & \text{spectrum completely symmetrical} \\ \alpha > 1, & \text{spectrum shifted to the right} \end{cases} \quad (6)$$

结合非对称广义高斯模型中,方差与函数谱型偏移量间的关系,可推导出峰值修正函数为

$$\lambda_B = \begin{cases} \lambda'_B - \frac{1}{1+\alpha} \Delta\lambda, & \alpha < 1 \\ \lambda'_B, & \alpha = 1 \\ \lambda'_B + \frac{\alpha}{1+\alpha} \Delta\lambda, & \alpha > 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中 λ_B 为修正后的中心波长, λ'_B 为由高斯拟合获得的中心波长; $\Delta\lambda$ 为半峰波长间隔。由此,可获得各个谱峰的精确定位位置 $\lambda_{B0}, \lambda_{B1}, \dots, \lambda_{Bn}$ 。

3 实验及结果分析

3.1 实验系统搭建

实验系统构成:宽带光源(SuperK Compact-ns/KHz),其波长覆盖范围 500~2400 nm;光谱分析仪(Si720),其波长扫描范围为 1510~1590 nm,波长分辨率 0.25 pm,解调精度 ± 1 pm;温控箱;3 dB 耦合器;4 个中心波长不同的 FBG 传感器(25 °C 环境温度下中心波长分别为 1532、1538、1544 和 1550 nm)。传感系统原理图如图 3 所示。

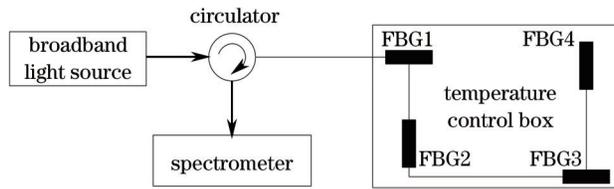


图 3 传感系统原理图

Fig.3 Principle diagram of the sensor system

3.2 光谱数据采集

实验中,4 个 FBG 传感器尾纤相熔接串联,组成传感阵列,并将其放置于温控箱中。由宽带光源提供稳定的光,经耦合器传输至传感阵列(FBG1-4),传感阵列反射光经耦合器传送至光谱仪,通过分析光谱仪检测到的光谱信息间接获得传感器所处环境温度值。将温控箱温度由 20 °C 调节至 60 °C(步长为 5 °C),待温控箱温度稳定后,由光谱仪记录获得不同温度时传感阵列的反射光谱数据。

3.3 寻峰精度对比分析

为了验证所提算法的寻峰精度,选用直接寻峰算法、高斯拟合寻峰算法及基于 Steger 的寻峰算法作为对比算法,通过对比不同寻峰算法在定温及变温条件下的寻峰精度,分析所提算法的寻峰性能。考虑到所选对比算法均不适用于多峰自适应寻峰,将所得多峰光谱进行手动峰值区域分割,以满足对比算法的寻峰条件。

3.3.1 恒温条件下寻峰精度对比

将温控箱温度调节至 25 °C,待温度稳定,记录并保存 4 个 FBG 的反射光谱。由于实验室环境的测量误差较小,以光谱仪检测获得的中心波长作为理论峰值,并利用不同的算法对实验所得光谱信号进行寻峰计算,得到测量峰值,以测量峰值与理论峰值作差的绝对值为寻峰误差如表 1 所示。

表 1 25 °C 下不同寻峰算法检测误差

Table 1 Result of peak search in different algorithms (25 °C)

	FBG1/(error/pm)	FBG2/(error/pm)	FBG3/(error/pm)	FBG4/(error/pm)
Direct	11.62	11.23	12.45	13.03
Gaussian	5.12	4.94	4.62	4.81
Steger ^[13]	1.31	1.23	1.05	1.42
Our method	0.55	0.62	0.73	0.61

分析表 1 可知,直接寻峰算法(Direct)仅以光谱曲线分峰截幅后,其一阶微分值为零的点作为峰值位置,寻峰精度受光谱峰型的影响严重,导致寻峰精度不高;高斯拟合寻峰算法(Gaussian)其寻峰精度较直接寻峰

算法有了大幅度提高,由于该算法并未考虑FBG谱峰的不对称问题对寻峰精度的影响,故寻峰精度有待提高;基于Steger算法的寻峰方法,其引入亚步长修正量和非对称量进行峰值修正,非对称量仅通过简化的分段三值模型进行估计,导致修正量计算精度有限;本文所提算法利用希尔伯特变换,在准确判断了各谱峰的区域,并考虑分析了谱峰的偏移情况的基础上结合非对称广义高斯模型进行峰值修正,测量精度得到提高。

3.3.2 变温条件下寻峰精度对比

采集不同温度下光谱仪检测到的各传感器的光谱数据,并利用不同的寻峰算法对光谱信号进行寻峰操作。不同温度条件下各寻峰算法检测误差对比图如图4所示。

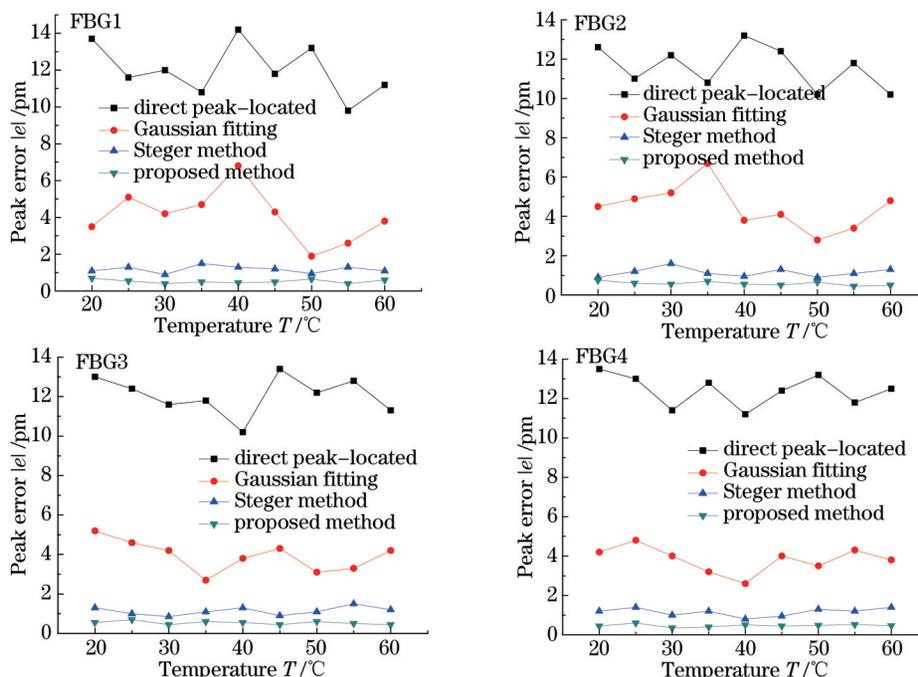


图4 不同寻峰方法误差对比图

Fig.4 Peak detecting error of different methods

分析图4可知,直接寻峰算法平均检测误差为12.03 pm,且算法稳定性较差;高斯拟合算法平均检测误差为4.08 pm,寻峰精度较高,但该算法未考虑谱峰不对称性对测量精度的影响,寻峰精度有限;基于Steger的寻峰算法平均检测误差为1.16 pm,优于高斯拟合算法;与对比算法相比,本文所提算法平均检测误差为0.53 pm,且算法稳定性最好,同时,在未获得各传感器谱峰范围的条件下,该算法可较精确的自适应检测出多峰光谱信号的所有峰值,证明所提算法具有较好的寻峰性能。

本文算法测试试验平台:AMD速龙2处理器,2 GB内存,WIN7专业版操作系统,Matlab7.0仿真软件。利用所提算法对光谱仪获得的四个谱峰光谱数据进行自适应寻峰操作,经计算其平均处理时间为1.75 s,能满足工程应用中FBG传感系统波长解调实时性要求。

4 结 论

分析了传统寻峰算法在处理分布式FBG传感网络多峰光谱信号时存在的缺陷,算法选用五点滑动均值滤波法对光谱信号进行平滑处理,有效消除了噪声扰动对传感精度影响;采用希尔伯特变换实现了多峰光谱的自适应峰值区域分割,解决了传统寻峰算法多峰寻峰时须预知各峰值范围的缺陷;充分考虑了FBG光谱峰型不对称问题,提出非对称广义高斯模型的峰值修正方法,有效提高了寻峰精度。仿真实验结果表明,本文所提方法寻峰稳定性较高,寻峰误差在1 pm以下,对分布式传感网络中的多峰值检测具有一定的参考价值。

参 考 文 献

1 Pang Dandan. Investigation on the Novel Fiber Bragg Grating Sensing Technology[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
 庞丹丹. 新型光纤光栅传感技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.

- 2 Lu Jiyun, Wang Bangfeng, Liang Dakai. Wavelet packet energy characterization of low velocity impacts and load localization by optical fiber Bragg grating sensor technique[J]. Applied Optics, 2013, 52(11): 2346–2352.
- 3 Tian Shizhu, Wen Ke, Wang Dapeng. Study on damage location of steel beam based on long-gage fiber Grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040603.
田石柱, 温 科, 王大鹏. 基于长标距光纤光栅传感器的钢梁损伤定位研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040603.
- 4 Ricchiuti A L, Barrera D, Nonaka K, *et al.*. Temperature gradient sensor based on a long-fiber Bragg grating and time-frequency analysis[J]. Optics letters, 2014, 39(19): 5729–5731.
- 5 Ren Liang, Jia Ziguang, Ho M S C, *et al.*. Application of fiber Bragg grating based strain sensor in pipeline vortex-induced vibration measurement[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(9): 1714–1720.
- 6 Zhu Haohan, Qin Haikun, Zhang Min, *et al.*. Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(6): 893–897.
朱浩瀚, 秦海琨, 张 敏, 等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 893–897.
- 7 Wu Zhaoxia, Yue Haili. Fiber Bragg grating peak wavelength detection technique based on wavelet analysis[C]. International Conference on Internet Computing and Information Services, 2011, 11: 462–464.
- 8 Chen Pengfei, Tian Di, Qiao Shujun, *et al.*. An automatic peak detection method for LIBS spectrum based on continuous wavelet transforms[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(7): 1969–1972.
陈鹏飞, 田 地, 乔淑君, 等. 一种基于连续小波变换的 LIB 光谱自动寻峰方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1969–1972.
- 9 Liu Quan, Cai Linjun, Li Zhengying, *et al.*. Research on peak-detection algorithm for high-precision FBG demodulation[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(7): 1233–1239.
刘 泉, 蔡林均, 李政颖, 等. 高速度高精度光纤布拉格光栅解调的寻峰算法研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(7): 1233–1239.
- 10 Linjun Cai, Zhengying Li, Zhihao Tang, *et al.*. A novel peak-seek algorithm used in FBG sensor demodulation system for vibration monitoring[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 160: 135–139.
- 11 Yu Youlong, Wang Xuwei, Wang Hao. Analysis of peak-detection algorithms in fiber Bragg grating by different sampling methods[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(11): 1274–1278.
余有龙, 王雪微, 王 浩. 不同采样方式下光纤布拉格光栅反射谱寻峰算法的分析[J]. 光子学报, 2012, 41(11): 1274–1278.
- 12 Chen Yong, Wang Kun, Liu Huanlin, *et al.*. Processing FBG sensing signals with three-point peak-detection algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2751–2756.
陈 勇, 王 坤, 刘焕淋, 等. 三点寻峰算法处理光纤布拉格光栅传感信号[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2751–2756.
- 13 Wang Qiaoni, Yang Yuanhong. A FBG spectrum peak detection technique based on Steger image algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0810004.
王巧妮, 杨远洪. 基于 Steger 图像算法的光纤布拉格光栅寻峰技术[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0810004.
- 14 Frederic C J, Cicero F M. Peak detection algorithm for fiber Bragg grating sensors[C]. Latin America Optics and Photonics Conference, 2012: LM2A.8.
- 15 M Sabarimalai Manikandan, K P Soman. A novel method for detecting R-peaks in electrocardiogram (ECG) signal[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2012, 7(2): 118–128.
- 16 Wu Fei, Kuang Minmin, Zhao Jing, *et al.*. Application of ant colony algorithm in analyzing of traverse uniform strain reflective of fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(2): 477–483.
吴 飞, 邝敏敏, 赵 静, 等. 蚁群算法在光纤布拉格光栅横向均匀受压反射谱分析中的应用[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 477–483.
- 17 Wang Yongjun, Liu Yongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.
王拥军, 刘永超, 张靖涛, 等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- 18 Li Zhiming, Wang Taiyue, Li Hongwei. Application to locally optimum detection based on asymmetric generalized Gaussian distribution[J]. Journal of Hainan University, 2009, 27(1): 73–77.
李志明, 汪太月, 李宏伟. 基于非对称广义高斯模型的局部优化检测中的应用[J]. 海南大学学报, 2009, 27(1): 73–77.

栏目编辑: 刘丰瑞