

文章编号 1004-924X(2013)11-2751-06

三点寻峰算法处理光纤布拉格光栅传感信号

陈 勇^{1*}, 王 坤¹, 刘焕淋², 陈丽娟¹, 杨 雪¹

- (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:为了精确获得光纤布拉格光栅(FBG)传感系统的中心波长,提出了一种新的峰值检测算法,即三点寻峰法。研究了该算法的流程,在此基础上确定了影响峰值检测精度的三要素,即窗口大小、稀疏数据个数和波长间隔。考虑窗口大小的合理选取是提高寻峰精度的关键,本文采用求导法来确定光谱处理窗口大小。然后,设置采样间隔对窗口内光谱进行重采样,获得稀疏光谱数据并进行多项式拟合。最后,根据拟合结果选取合适的波长间隔,从而确定三点坐标并对 FBG 反射谱进行峰值检测。仿真实验结果表明:当光谱处理窗口大小为 0.4 nm、重采样间隔为 0.18 nm 时获得了 3 个光谱数据;其波长间隔取 0.22 nm 时,所提方法的峰值误差为 0.4 pm,好于其他寻峰算法,满足精确解调 FBG 传感系统的要求。

关键词: 光纤布拉格光栅;峰值检测;光谱窗口;稀疏光谱数据;采样间隔

中图分类号: TN929.11; TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132111.2751

Processing FBG sensing signals with three-point peak-detection algorithm

CHEN Yong^{1*}, WANG Kun¹, LIU Huan-lin², CHEN Li-juan¹, YANG Xue¹

- (1. *Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Network Control, Ministry of Education(MOE), Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*
 2. *Key Laboratory of Optical Fiber Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: chen Yong@cqupt.edu.cn*

Abstract: To obtain the center wavelength of a Fiber Bragg Grating(FBG) sensing system, an improved peak detecting method, three-point peak-detection, was proposed. After researching on the process of algorithm, three elements(window sizes, sparse data and wavelength intervals)that impact the accuracy of peak-detection were determined. As selecting window sizes reasonably would enhance the accuracy of peak-detection, a derivation method was used to determine the size of the spectral processing window. Then, by setting sampling intervals, spectral window data were re-sampled to obtain sparse spectrum data and perform a polynomial fitting for the sparse data. Finally, the wavelength interval was chosen to determine the coordinates of three points and to search the peak of FBG wavelength. The results of experiment and simulation indicate that the number of spectrum data is three, when the size of processing window is chosen to be 0.4 nm and the re-sampling interval is 0.18 nm.

收稿日期:2013-04-28;修订日期:2013-05-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61275077)

Moreover, when the wavelength interval is chosen to be 0.22 nm, the peak error of proposed method is 0.4 pm, better than that of other methods. It will meet the requirements of FBG sensing systems for demodulating precisely.

Key words: Fiber Bragg Grating(FBG); peak detection; spectral window; sparse spectral data; sample interval

1 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器已广泛应用于测量温度、应变等场合^[1]。波长编码的光纤光栅传感器可埋入智能结构且不受电磁干扰,具有体积小、灵敏度高、动态范围宽、可靠性高等优点,可用于航空航天、土木工程和医学工程等领域^[2-3]。解调是光纤光栅传感系统的核心。光纤光栅传感器主要通过获取波长漂移来判断待测量的变化,而波长漂移对应的是反射谱的峰值位置变化,因此准确寻峰对于提高测量系统的准确度至关重要^[4]。

目前的寻峰算法主要有直接寻峰法、质心法、高斯拟合法、一般多项式法、高斯-多项式法、基于径向基函数网络算法、遗传算法以及蚁群算法^[5-7]。其中,直接寻峰法适合曲线光滑的情况,当光谱波动大且含有一定量的噪声时,此方法寻峰精度很低。一般多项式拟合方法简单、易于实现,但是寻峰准确度有限^[8-9]。高斯-多项式拟合算法是将观测得到的数据带入多项式,先计算系数,再做反对数变换,其寻峰精度介于高斯拟合算法和一般多项式算法之间;但是此方法的拟合曲线过分依赖观测数据,抗噪性能差,且如果峰值不在观测点内,峰值误差较大^[10-11]。基于径向基函数网络算法及遗传算法等优化方法虽然可以提高寻峰准确度,但是需要较长的训练时间才能确定参数中的参量,不适合实时运算^[12-14]。蚁群算法计算量大,求解速度慢。FBG传感器常采用高斯切趾的均匀光纤光栅,其反射谱近似为高斯型,通常采用高斯拟合算法对FBG进行峰值检测,能够得到较好的寻峰精度。高斯拟合方法简单,抗噪性能好,且当波长分辨率、信噪比变化时,误差变化较小^[15-16]。在此基础上,文献[5]提出非均匀采样方法确定数据采样间隔,并结合高斯拟合对FBG寻峰,其误差减小,但此方法受采样点数的限制;文献[6]提出用求导方法确

定窗口大小,然后结合高斯拟合寻峰,其精度有所提高,但是该方法处理数据多、采样间隔小,对器件的要求高。

本文针对上述方法存在的不足,在分析了影响寻峰的3个因素,即窗口大小、稀疏数据个数和波长间隔 $\Delta\lambda$ 的基础上,通过实验仿真获取3因素的值,并以此确定三点寻峰方法。此方法不仅能够减少数据量,还能提高寻峰精度。

2 三点寻峰策略

FBG光谱近似表示为^[4]:

$$I(\lambda) = A \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\lambda_B} \right)^2 \right], \quad (1)$$

其中: λ 为FBG波长, λ_B 为FBG中心波长, $\Delta\lambda_B$ 为3 dB带宽, A 为反射谱的幅值。对式(1)两边取对数可得:

$$\begin{aligned} \ln I(\lambda) = & - (4 \ln 2 \frac{\lambda_B^2}{\Delta\lambda_B^2} - \ln A) + \\ & 8 \ln 2 \frac{\lambda_B}{\Delta\lambda_B} \lambda - \ln 2 \frac{1}{\Delta\lambda_B^2} \lambda^2, \end{aligned} \quad (2)$$

令:

$$\begin{aligned} y(\lambda) = \ln I(\lambda); c = & - \left(4 \ln 2 \frac{\lambda_B^2}{\Delta\lambda_B^2} - \ln A \right), \\ b = 8 \ln 2 \frac{\lambda_B}{\Delta\lambda_B}; a = & - 4 \ln 2 \frac{1}{\Delta\lambda_B^2}, \end{aligned}$$

则式(2)可化简为:

$$y(\lambda) = a\lambda^2 + b\lambda + c. \quad (3)$$

通常采用最小二乘法来确定式(3)中 a 、 b 和 c 的值,中心波长为:

$$\lambda_B = -b/2a. \quad (4)$$

通过式(4)可确定多项式的最大值点,但仅仅通过一个点来确定峰值,误差较大。

本文采用稀疏光谱数据来拟合曲线,并在拟合曲线图1中选取3个点来确定峰值位置。

寻峰时, B 点为理论峰值 λ_B ; D 点为通过式(4)计算得到的最大值点。将它带入稀疏光谱数据拟后得到的函数,可确定 D 点坐标 (λ_m, y_2) ;然

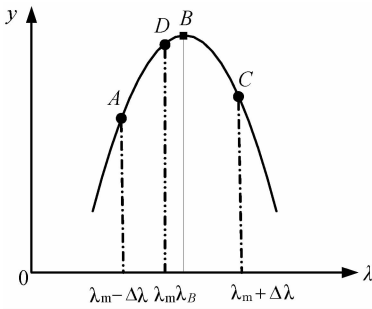


图 1 寻峰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of peak detection

后以 λ_m 为标准,选取数据间隔 $\Delta\lambda$,选择 D 的两个相邻数据点,即 A 点和 C 点,其坐标分别为 $(\lambda_m - \Delta\lambda, y_1), (\lambda_m + \Delta\lambda, y_3)$ 。将 A, D 和 C 点分别带入式(3)可得:

$$\begin{cases} a(\lambda_m - \Delta\lambda)^2 + b(\lambda_m - \Delta\lambda) + c = y_1 \\ a\lambda_m^2 + b\lambda_m + c = y_2 \\ a(\lambda_m + \Delta\lambda)^2 + b(\lambda_m + \Delta\lambda) + c = y_3 \end{cases} \quad (5)$$

解方程组式(5)可得 a, b, c 的值,将这 3 个值带入式(4)可得:

$$\lambda_B = \lambda_m - \Delta\lambda \frac{y_3 - y_1}{2(y_3 + y_1 - 2y_2)} \quad (6)$$

由式(6)计算可得中心波长,由此知道中心波长值取决于 A, D 与 C 点的坐标。这种算法被称为三点寻峰法。为了确定 3 点坐标的准确值,需对具体寻峰流程进行分析。

3 寻峰三要素提出

如图 2 为三点寻峰处理流程。具体描述如下:

(1)输入 FBG 反射谱,确定数据处理窗口大小。文献[6]证明,窗口大小不同寻峰精度也不同。

(2)设定重采样分辨率,对窗口内光谱重采样,得到稀疏光谱数据。分辨率的大小决定得到稀疏光谱数据的个数。

(3)采用多项式对稀疏光谱数据进行拟合。稀疏光谱数据个数不同,多项式拟合的结果也不一样。

(4)根据多项式拟合的结果得到最大值 λ_m 。

(5)选取合适的 $\Delta\lambda$,以 $\lambda_m - \Delta\lambda$ 和 $\lambda + \Delta\lambda$ 为横坐标选取相邻数据点 A 和 C 。

(6)然后根据选取的 3 点坐标及式(6)计算出中心波长 λ_B 。

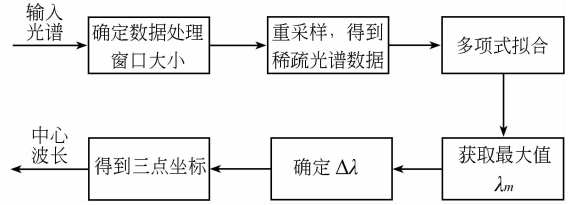


图 2 寻峰过程图

Fig. 2 Process of peak detection

值得注意的是,数据处理窗口大小、稀疏光谱数据个数和 $\Delta\lambda$ 的确定是影响寻峰精度的关键。因此,本算法的重点是通过实验仿真分析来确定三要素的值。

4 仿真实验与分析

4.1 光谱数据获得

实验系统由宽带光源(BBS)、耦合器、光纤布拉格光栅(FBG)、温控箱和光谱仪(OSA)组成,如图 3 所示。BBS 发出的光经耦合器到达 FBG 处,FBG 有波长选择透过性,符合 FBG 中心波长的光被反射,通过光谱仪观测其反射谱。

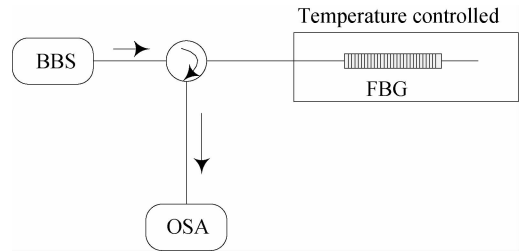


图 3 实验系统

Fig. 3 Experiment system

利用 Si720 传感分析仪采集 FBG 光谱,扫描为 1 510~1 590 nm,中心波长为波长 1 532.504 nm。

4.2 窗口大小选取

本文选用文献[6]中求导的方法来确定窗口大小,共分为两步:

(1)平滑处理。平滑处理是为了消除“毛刺”及“假峰”。本文选用五点滑动平均法处理 FBG 信号,其原理为将 5 个邻近的数据点进行加权平均,其计算如式(7)所示:

$$\begin{cases} y_1 = 1/5(3x_1 + 2x_2 + x_3 - x_4) \\ y_2 = 1/10(4x_1 + 3x_2 + 2x_3 + x_4) \\ y_i = 1/5(x_{i-2} + x_{i-1} + x_i + x_{i+1} + x_{i+2}), \\ y_{n-1} = 1/10(x_{n-3} + 2x_{n-2} + 3x_{n-1} + 4x_n) \\ y_n = 1/5(-x_{n-3} + x_{n-2} + 2x_{n-1} + 3x_n) \end{cases} \quad (7)$$

式中： n 为数据点个数， $i=1,2,\dots,n$ 。设平滑次数为 1 000。

(2)求导。一阶导数反映原光谱曲线斜率的变化，而高斯型函数在峰值附近斜率变化较大，因此可通过对平滑处理后的光谱进行一次求导来找出导数的两个极值点，从而确定窗口的大小。

窗口大小选取过程如图 4 所示。图 4(a)为 FBG 反射谱，其中心波长为 1 532. 504 nm；图 4(b)为平滑处理后的效果图，经平滑处理后消除了光谱“旁瓣”；在此基础上求导得到如图 4(c)的曲线，并从图中确定最大值点和最小值点对应的光谱范围，再根据斜率变化确定中心波长的范围。通过计算，在 1 532. 3 nm 处取得的最大值，在 1 532. 7 nm 处取得最小值，光谱为 1 532. 3~1 532. 7 nm，如图 4(d)所示。窗口大小为 0.4 nm。

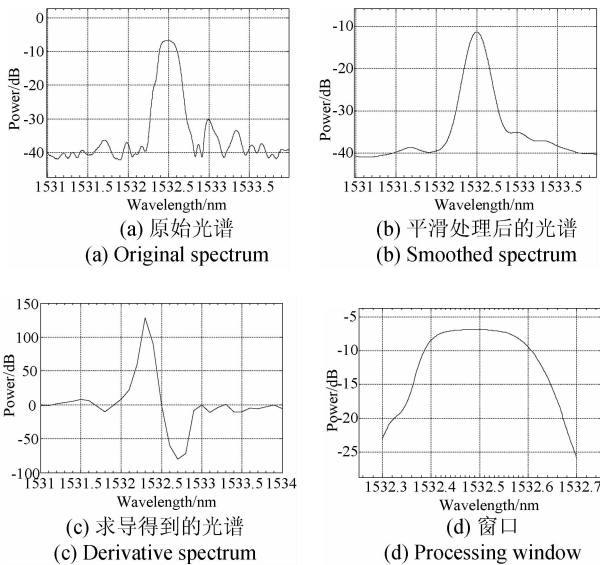


图 4 窗口大小选取过程

Fig. 4 Process of window chosen

4.3 稀疏光谱数据的获得

窗口大小确定后要对窗口内的数据进行重采样，重采样间隔决定了稀疏数据的个数。但是，稀疏数据个数的不同会导致拟合结果不同，取的最大值就不同，从而 3 点的坐标也不同，最终的中心

波长会随着数据个数的变化而变化。

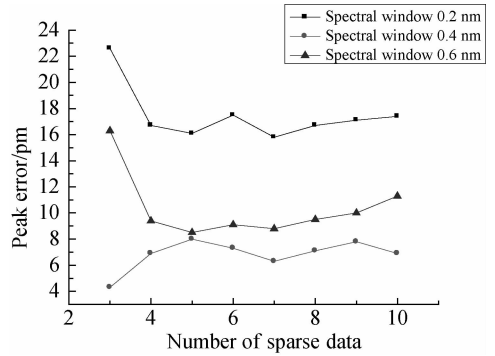


图 5 稀疏光谱数据对寻峰精度的影响

Fig. 5 Effect of sparse spectral data on peak detecting accuracy

为了验证窗口大小对寻峰精度的影响，窗口大小分别取 0.2, 0.4 和 0.6 nm。由图 5 可知，当窗口大小为 0.4 nm 时，其寻峰误差整体比其它两种情况小，说明求导方法选取窗口的可行性；同时，峰值误差在 10 pm 以下，且当稀疏光谱数据的个数为 3 时，峰值误差为 4 pm。因此，为了获得 3 个光谱数据，重新设置采样间隔为 0.18 nm，这样就可对 3 个数据采用多项式拟合得到式(8)，其拟合曲线为图 6。根据式(8)求得最大值点坐标，其横坐标即为 λ_m 。

$$y = -410.80247\lambda^2 + 1.25911 \times 10^6\lambda - 9.64791 \times 10^8. \quad (8)$$

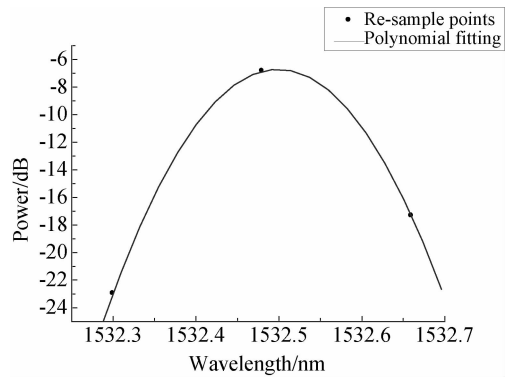


图 6 多项式拟合曲线

Fig. 6 Polynomial fitting curve

4.4 $\Delta\lambda$ 的确定

窗口大小为 0.4 nm，重采样点数为 3，根据多项式拟合得到的二次曲线，从而得到二次曲线的最大值 λ_m ，即 D 点的坐标。然后，需要确定 $\Delta\lambda$ 才能得到 D 点的相邻点 A 和 C。 $\Delta\lambda$ 的取值决定了 A 点和 C 点的位置。

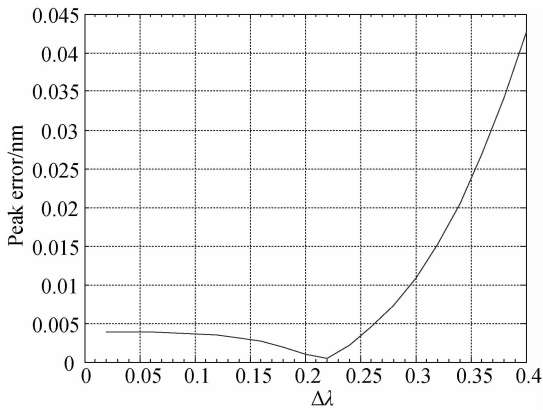
图 7 $\Delta\lambda$ 的取值对寻峰精度的影响Fig. 7 Effect of $\Delta\lambda$ on peak detecting accuracy

图 7 为 $\Delta\lambda$ 在 0.02~0.4 nm 不同取值下的峰值误差。由图 7 可知,随着 $\Delta\lambda$ 的增大,峰值误差先减小后增大,并且在 0.22 nm 处峰值误差达到最小,此时的峰值误差为 0.4 pm。

4.5 算法对比验证

为了验证此方法的精度,本文选用直接寻峰算法、多项式拟合算法和高斯拟合算法为对比算法,结果如表 1 所示。

由表 1 可知,直接寻峰算法因原光谱峰顶处波动较大而寻峰误差最大;多项式拟合算法能够改善峰值波动造成的影响;因 FBG 反射谱近似高斯型,因此高斯拟合算法能够达到较好的精度,但是本文提出的方法的寻峰精度在 1 pm 以下,远远高于其它方法。

参考文献:

- [1] WADA A, TANAKA S, TAKAHASHI N. Optical fiber vibration sensor using FBG Fabry-Perot interferometer with wavelength scanning and Fourier analysis[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(1): 225-229.
- [2] WU F, ZHAN J, LIU B, et al.. Study on local temperature characteristics of fiber Bragg gratings [J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, 6(2): 98-102.
- [3] 徐国权,熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013,6(3): 306-317.
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013,6(3): 306-317. (in Chinese)
- [4] 尚秋峰,林炳花. 光纤 Bragg 光栅传感系统典型寻峰算法的比较分析[J]. *电测与仪表*, 2010, 47(2): 1-4.

表 1 不同方法的寻峰误差

Tab. 1 Peak errors of different methods

算法	峰值误差/pm
直接寻峰	19
多项式拟合	11
高斯拟合	4
本文算法	0.4

5 结 论

本文根据 FBG 传感系统测量精度高、实时性好的要求,结合 FBG 波长的编码特性,提出了基于稀疏光谱数据的三点寻峰算法;分析了寻峰过程,得到了影响精度的 3 个因素,即数据处理窗口大小、稀疏数据个数和波长间隔 $\Delta\lambda$,3 个因素的值不同,寻峰结果也不同。本文采用求导法确定窗口大小为 0.4 nm;为了获得稀疏光谱数据,对窗口内光谱进行重采样处理,当设置重采样间隔为 0.18 nm 时,得到 3 个稀疏光谱数据;由于三点的坐标受波长间隔 $\Delta\lambda$ 的影响,从而直接决定寻峰精度,本文 $\Delta\lambda$ 取 0.22 nm。仿真实验结果表明,本文所提方法的寻峰误差为 0.4 pm,提高了寻峰精度,满足光纤传感系统精确解调的需要,在光纤传感信号处理中有一定的应用价值。

SHANG Q F, LIN B H. The comparison and analysis of typical peak-detecting algorithms in fiber bragg grating sensor system[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2010, 47(2): 1-4. (in Chinese)

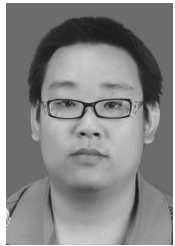
- [5] 余有龙,王学薇,王浩. 不同采样方式下光纤布拉格光栅反射谱寻峰算法分析[J]. *光子学报*, 2012, 41(11): 1274-1278.
- [6] YU Y L, WANG X W, WANG H. Anaysis of peak-detecting algorithms in fiber bragg grating by different sampling methods [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(11): 1274-1278. (in Chinese)
- [7] FREDERIC C J, CICERO F M. Peak detection algorithm for fiber bragg grating sensors[C]. *Latin America Optics and Photonics Conference, Sao Sebastiao, Brazil: LAOP*, 2012: LM2A. 8.
- [7] 李敏,盛毅. 高斯拟合算法在光谱建模中的应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(10): 2352-2355.

- LI M, SHENG Y. Study on application of Gaussian fitting algorithm to building model of spectral analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10): 2352-2355. (in Chinese)
- [8] 韩屏, 周祖德. 高速高精光栅解调器的反馈式相对寻峰算法[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(1): 10-12.
- HAN P, ZHOU Z D. Feedback relative peak-detection algorithm for high-speed and high-precision grating demodulator[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(1): 10-12. (in Chinese)
- [9] LUCAS N, ADEMIR N, HYPOLITO K, *et al.*. Benchmark for peak detection algorithms in fiber bragg grating interrogation and a new neural network for its performance improvement [J]. *Sensors*, 2011, 11(2): 3466-3482.
- [10] LIU Q, WANG H. Research on the peak-detection algorithm in the high-frequency demodulation for the fiber gating [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010, 32(2): 59-61.
- [11] LI Y Q, XIE Y, YAO G Z. Comparison of peak searching algorithms for wavelength demodulation in fiber bragg sensors[C]. *Information Engineering and Computer Science, Shanghai, P. R. China: ICIECS*, 2010: 1-4.
- [12] LI M, YAO J P. Multichannel arbitrary-order photonic temporal differentiator for wavelength-decision-multiplexed signal processing using a single FBG [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(17): 2506-2511.
- [13] 王氏, 曹绘, 要趁红. 一种改进的小波变换基音检测算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2012, 24(3): 283-302.
- WANG M, CAO H, YAO CH H. Improved arithmetic of wavelet transformation for pitch frequency detection[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2012, 24(3): 283-302. (in Chinese)
- [14] SASTRY S S, MALLIKA K, RAO B G, *et al.*. Liquid crystal textural analysis based on histogram homogeneity and peak detection algorithm [J]. *Liquid Crystals*, 2012, 39(4): 415-418.
- [15] SADHUKHAN D, MITRA M. R-peak detection algorithm for cg using double difference and RR interval processing [J]. *Procedia Technology*, 2012, 12(4): 873-877.
- [16] 王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心算法[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
- WANG H Y, FEI ZH H, WANG X L. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1672-1677. (in Chinese)

作者简介:



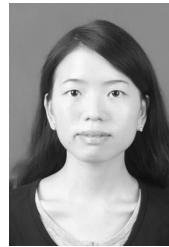
陈勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士,1995年,2003年于重庆大学分别获得硕士、博士学位,主要研究方向为光纤传感检测及其信号处理。E-mail: chen Yong@cqupt.edu.cn



王坤(1989—),男,山东潍坊人,硕士研究生,2011年于沈阳大学获得学士学位,主要研究方向为光纤传感检测及其信号处理。E-mail: cqpt-wangkun@163.com



刘焕淋(1970—),女,重庆市人,博士,教授,主要从事全光网络,光纤通信技术和信息获取与处理及宽带通信网的研究工作。E-mail: liuhl@cqupt.edu.cn



陈丽娟(1988—),女,四川达州人,硕士研究生,2011年于西安科技大学获得学士学位,主要研究方向为光纤传感检测及其信号处理。E-mail: chenlijuan625@163.com



杨雪(1989—),女,湖北荆州人,硕士研究生,2012年于长江大学获得学士学位,主要研究方向为光纤语音传感检测及信号处理。E-mail: xuey20080730@163.com