

用于体温心音检测的光纤布拉格光栅波长解调方法

张 诚 苗长云 甘晶萌 赵军发

(天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300160)

摘要 提出一种用于智能服装中体温与心音同步检测的光纤布拉格光栅(FBG)波长解调方法。基于可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器实现了分布式多光纤光栅的高精度静态波长解调和单光纤光栅的高速动态波长解调。利用梳状滤波器实现 F-P 控制电压与输出波长关系的实时校准,提高了静态波长解调的精度。通过在控制电压中加入扰动信号,使 F-P 滤波器中心波长在工作点处保持稳定,实现长时间的动态解调。实验结果表明所设计的解调系统静态波长解调精度可达 ± 5 pm,重复性在 5 pm 以内。动态波长解调范围理论值为 225 pm,实测可达 203 pm。系统频率响应 3 dB 带宽设计值为 1 kHz,实测值为 950 Hz 左右。在心音信号主要集中的 20~200 Hz 频段内,频率响应基本一致。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;静态波长解调;动态波长解调;光纤法布里-珀罗滤波器

中图分类号 TN253;TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1205001

Wavelength Demodulated Method of Fiber Bragg Grating for Human Temperature and Heart Sound Measuring

Zhang Cheng Miao Changyun Gan Jingmeng Zhao Junfa

(College of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract A wavelength demodulated method of fiber Bragg grating (FBG) is proposed to measuring human temperature and heart sound, which can achieve distributed static wavelength demodulation of multi-FBGs and dynamic wavelength demodulation for single FBG. The relation between control voltage of Fabry-Perot (F-P) filter and its output wavelength is rectified by pectinate filter, so the precision of static demodulation is improved. By adding dithering signal the center wavelength of F-P filter could be remained on work point so that it could demodulate dynamic wavelength for a long time. The experiment results indicate that the precision of static wavelength demodulation is ± 5 pm and the repeated error is about 5 pm. The theoretical dynamic demodulated range is 225 pm and the actual range is about 203 pm. The theory bandwidth of 3 dB of system frequency response is 1 kHz and the measured value is about 950 Hz. In the heart sound concentrated band of 20~200 Hz, frequency response are basically the same.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; static wavelength demodulation; dynamic wavelength demodulation; fiber Fabry-Perot filter

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 060.3735

1 引 言

随着人口老龄化程度的加深,用于监测人体生理参数的智能服装的发展倍受关注。它可在不影响

穿着者正常运动的情况下对其健康情况进行评估并及时反馈,在远程医疗、居家健康监护等领域具有重要的应用价值^[1]。目前具有代表性的智能服装主要

收稿日期: 2011-07-04; **收到修改稿日期**: 2011-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(60977059)、高等学校博士学科点专项科研基金(200800580006,20101201120001)和天津市高等学校科技发展基金(20100710)资助课题。

作者简介: 张 诚(1982—),男,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感和信号处理等方面的研究。

E-mail: zhangchengly730@yahoo.com.cn

导师简介: 苗长云(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光通信和光传感技术等方面的研究。

E-mail: miaochangyun@tjpu.edu.cn

有欧洲的 VTAMN, WEALTHY, magIC 原型^[2~4]和美国的 SmartShirt, LifeShirt 原型^[5,6]。它们均采用电传感器对体温、心电和呼吸等生理参数进行检测。光纤光栅具有体积小、质量轻和抗电磁干扰等特点,可应用于温度、应变、压力和振动等参数的测量^[7~9],将光纤光栅用于人体生理参数的检测不仅可以提高灵敏度,而且易于与织物结合,便于构成分布式传感网络,是智能服装领域最具潜力的敏感元件之一。

本文设计了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)的体温和心音检测系统。针对体温检测需要较高解调精度和心音检测需要较高解调速度的要求,提出一种可实现动、静态波长同步解调的方法。在静态模式下,利用梳状滤波器实现法布里-珀罗(F-P)滤波器控制电压与输出波长关系的实时校准,检测精度可达±5 pm,波长重复性在 5 pm 以内。在动态模式下,解调动态范围可达 203 pm,系统频率响应 3 dB带宽可达 950 Hz 左右。

2 系统组成及工作过程

波长解调系统结构如图 1 所示。利用放大自发辐射(ASE)光源、光隔离器 I1 和 F-P 滤波器构成可调窄带光源,其输出光由 3 dB 光耦合器 C1 分束。分束后的一路光进入 FBG 线阵,其反射光经 C1 后,由探测器 PIN1 进行光电转换。C1 分束后的另一路光经光隔离器 I2 进入梳状滤波器 PicWave,其透射光由探测器 PIN2 进行光电转换。PIN1 和 PIN2 转换后的电流信号经放大电路(AMP)、滤波电路(LPF)和模数转换(A/D)后进入数字信号处理器(DSP)。DSP 通过数模转换(D/A)及放大电路输出 F-P 控制电压 V_d ,采集包含 PIN1 和 PIN2 输入光强信息的电压 V_1 和 V_2 进行波长解调,解调出的温度值由液晶屏 LCD 显示,解调出的心音信号由电压 V_{out} 输出,以实现波长解调算法及对 F-P 输出波

长的控制。

系统分为静态和动态两种模式。在静态模式下,DSP 输出由高到低的 F-P 控制电压,用于多 FBG 的静态波长解调,实现体温检测。在动态模式下,DSP 输出由低到高的 F-P 控制电压,当 F-P 中心波长到达与某 FBG 匹配位置(工作点)时,F-P 控制电压保持不变,此时 V_1 可表示动态波长变化情况。动态波长检测完毕后,DSP 控制 F-P 继续扫描,从而完成一个工作周期。

3 波长解调原理

静态模式下,在输出 F-P 控制电压的同时,采集 V_1 和 V_2 电压得到 FBG 线阵的反射谱和 PicWave 透射谱数据,利用 F-P 滤波器输出波长与控制电压的关系实现多点 FBG 波长解调^[10~12]。每次扫描中,F-P 控制电压与输出波长关系曲线会发生平移^[13,14],利用 PicWave 实时获取 F-P 控制电压与输出波长关系(PicWave 各透射波长已知),实现高精度的波长解调。

通过重心法得到 FBG 中心波长和 PicWave 各中心波长所对应的 F-P 控制电压值^[15,16]。为减少计算的复杂性,采用分段线性插值法获取 F-P 控制电压与输出波长函数的关系。具体方法如下:首先确定某 FBG 反射波长 λ_i 相邻的两个 PicWave 中心波长 λ_j 和 λ_{j+1} ,然后利用 λ_j 和 λ_{j+1} 与分别对应的 F-P 控制电压 V_{dj} 和 V_{dj+1} 进行线性插值,得到该范围内 F-P 控制电压与输出波长的函数关系为

$$\lambda = \frac{(\lambda_{j+1} - \lambda_j)(V_d - V_{dj})}{V_{dj+1} - V_{dj}} + \lambda_j, \quad V_d \in (V_{dj}, V_{dj+1}) \quad (1)$$

最后,将 λ_i 对应的 F-P 控制电压 V_{di} 代入(1)式得到该 FBG 的中心波长。

在动态模式下,使 F-P 滤波器透射谱与待检测的 FBG 反射谱相交,相交部分的光被反射给 PIN1,其光强为 FBG 和 F-P 光谱函数的卷积。假设 FBG 反射谱和 F-P 透射谱为高斯型,则经调理电路处理后的电压 V_1 与 FBG 和 F-P 中心波长差 λ_{12} 的关系为

$$V_1 = kb_1 b_2 \sqrt{\frac{\pi}{4 \ln 2 (b_1^2 + b_2^2)}} \exp\left(-\frac{4 \ln 2}{b_1^2 + b_2^2} \lambda_{12}^2\right), \quad (2)$$

式中 k 为常数,与光路损耗、耦合器分束比、光源输出光强、FBG 反射系数、F-P 透射系数、光电探测器转换系数有关, b_1 和 b_2 分别为 FBG 和 F-P 的 3 dB 带宽。

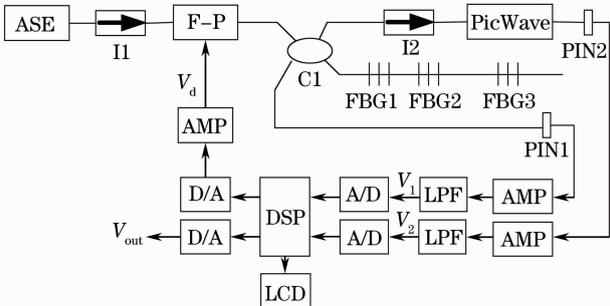


图 1 波长解调系统

Fig. 1 Wavelength demodulated system

对(2)式进行求导,得到动态波长解调灵敏度为

$$S = \frac{dV_1}{d\lambda_{12}} = -2kb_1b_2 \times \frac{\sqrt{4\ln 2\pi}}{(b_1^2 + b_2^2) \sqrt{b_1^2 + b_2^2}} \lambda_{12} \exp\left(\frac{-4\ln 2}{b_1^2 + b_2^2} \lambda_{12}^2\right). \quad (3)$$

图2为输出电压与灵敏度的归一化曲线。可见,当FBG中心波长与F-P中心波长重合时,输出电压达最大值。若F-P中心波长保持不变,且FBG中心波长在F-P中心波长一侧变化时,可建立FBG中心波长与输出电压的单值关系,从而实现FBG波长的动态解调。当 $\lambda_{12} = \pm 0.425 \sqrt{b_1^2 + b_2^2}$ 时,灵敏度达到最大,此时系统输出电压为最大值的0.6倍。

为获得较大的灵敏度且输出电压与FBG波长变化同相,将F-P的中心波长稳定在 $\lambda_{12} = -0.425 \sqrt{b_1^2 + b_2^2}$ 位置,称该位置为动态解调的工作点。在工作点附近,可将输出电压与FBG波长变化近似为线性关系,波长解调的动态范围为

$$\Delta\lambda_1 = 2 \times 0.425 \sqrt{b_1^2 + b_2^2}. \quad (4)$$

当F-P中心波长移至工作点后由于压电陶瓷的响应延时特性,F-P中心波长会继续沿原变化方向移动,远离工作点,影响动态解调范围。通过在F-P控制电压加入高频小幅扰动的方法实现了F-P中

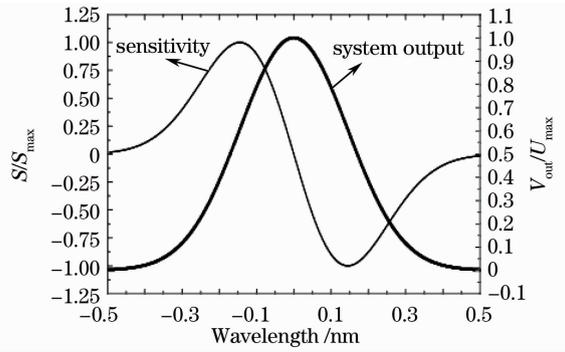


图2 动态波长解调模式下系统输出与灵敏度的曲线

Fig. 2 System output and sensitivity in dynamic wavelength demodulated mode

心波长在工作点附近的稳定。

4 实验与结果分析

用于温度检测的FBG放置在盛有水的烧杯中,利用分辨率为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度计读取FBG所处温度场的温度。控制烧杯水温和分别用SM130波长解调仪(精度为 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$,解调速度为 1 kHz)和所设计的实验系统进行波长解调。在 $35\text{ }^\circ\text{C} \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$,设置步进为 $1\text{ }^\circ\text{C}$,分别记录SM130的波长测量值和实验系统3次静态波长测量值,实验数据如表1所示,波长误差均小于 $5\text{ }\mu\text{m}$,重复性误差在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内。

表1 静态波长解调实验数据

Table 1 Experiment data of static wavelength demodulation

Temperature / $^\circ\text{C}$	1st measuring wavelength / nm	2nd measuring wavelength / nm	3rd measuring wavelength / nm	SM130 measuring wavelength / nm
40	1539.474	1539.474	1539.471	1539.476
39	1539.463	1539.460	1539.467	1539.464
38	1539.453	1539.448	1539.447	1539.452
37	1539.439	1539.443	1539.438	1539.440
36	1539.424	1539.433	1539.423	1539.428
35	1539.418	1539.418	1539.412	1539.417

以解调仪的测量值作为该温度下FBG中心波长的准确值,通过线性拟合,得到该FBG的温度 T 与波长 λ 的关系为

$$T = -129770.186 + 84.321\lambda, \quad (5)$$

将波长解调结果代入(5)式可得到所设计系统的3次温度检测值,其温度误差如图3所示。可见,温度检测精度约为 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。通过提高FBG温度传感器的灵敏度,可以进一步提高该解调系统的温度检测精度。

将自制的膜盒式FBG心音传感器(中心波长为 1551.12 nm , 3 dB 带宽为 210 pm)水平放置在振动台上,振动膜上放置一个重 10 g 的砝码。信号发生

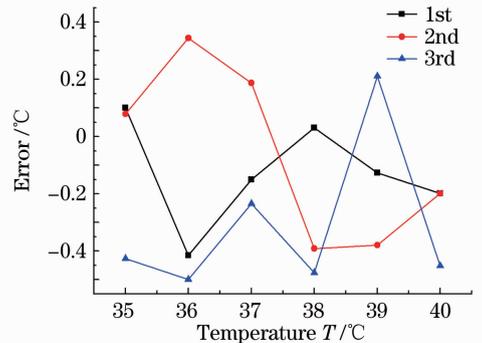


图3 静态解调模式下的温度误差

Fig. 3 Temperature error in static demodulated mode
器输出激励信号经功率放大器后驱动振动台产生振

动。设置信号发生器输出正弦信号频率为 50 Hz, 先利用 SM130 波长解调仪得到信号发生器输出峰峰值电压 V_{pp} 与 FBG 心音传感器波长变化 $\Delta\lambda$ 的关系。对记录数据进行线性拟合后得到其关系为

$$\Delta\lambda = 1.989 + 4.365V_{pp}, \quad (6)$$

然后保持信号发生器输出频率为 50 Hz, 利用实验系统进行动态波长解调。调节信号发生器 V_{pp} 范围为 20~40 mV, 以 2 mV 为步进, 观察波长解调结果。根据 (6) 式, FBG 的动态波长变化范围在 89~177 pm。图 4 为 3 次重复实验得到的 FBG 波长变化与解调结果的关系曲线。3 次解调结果具有较好的重复性, 且解调结果与 FBG 波长变化近似为线性关系。

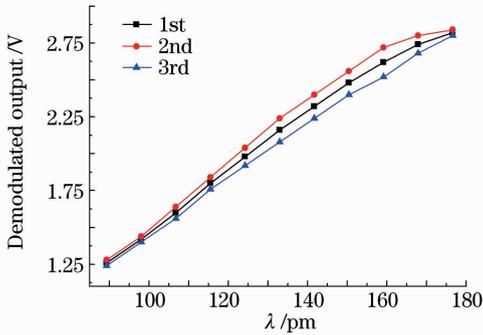


图 4 动态解调模式下波长变化与解调输出的关系
Fig. 4 Relation between wavelength and demodulated output in dynamic demodulated mode

实验中所使用的 F-P 滤波器的 3 dB 带宽约为 162 pm。根据 (4) 式可知, 该实验系统动态波长解调范围理论值为 225 pm。逐步增加信号发生器输出的峰峰值, 当增加到 46 mV 时, 解调波形出现微小失真, 其波形如图 5 所示, 此时对应 FBG 波长变化为 203 pm, 小于理论值。其原因主要是由于实际工作点与理想工作点存在偏差。

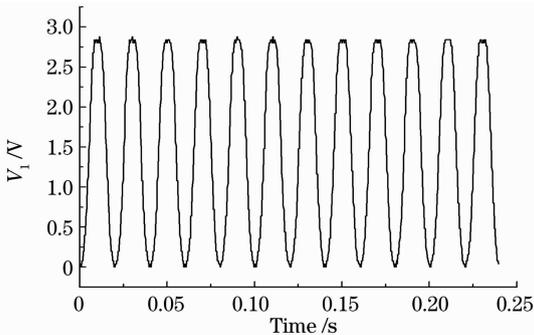


图 5 FBG 波长变化为 203 pm 时系统的解调输出
Fig. 5 System demodulated output when wavelength variation of FBG was 203 pm

为去除高频噪声, 在 A/D 转换前加入 1 kHz 低通滤波器, 理论上可实现 1 kHz 的动态波长解调。将信号发生器输出的峰峰值设定为 30 mV, 调节输出频率在 20 Hz~1 kHz 内变化, 记录 PIN1 输出信号通过滤波器后的放大倍数。图 6 为 3 次重复实验的结果。可见, 3 次实验数据具有较好的一致性, 随频率增加, 放大倍数在减小, 在 950 Hz 附近衰减约 3 dB, 与理论值基本一致。在心音主要成分集中的 20~200 Hz 内, 放大倍数基本一致, 从而确保心音有效频率分量不失真。

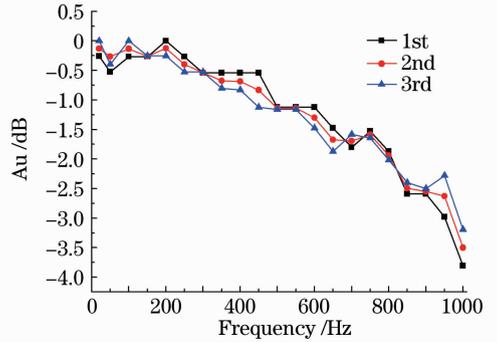


图 6 动态波长解调的频率特性
Fig. 6 Frequency characteristic of dynamic wavelength demodulation

为测试实验系统对心音信号的解调效果, 利用心音模拟器输出正常心音信号, 经功率放大后驱动振动台振动。振动台振动频率与 FBG 波长变化频率一致, 因此, 动态解调输出频率与心音模拟器输出信号频率相一致。图 7 为实验系统对模拟心音信号的解调结果, 可以看出解调波形与模拟心音波形基本一致。

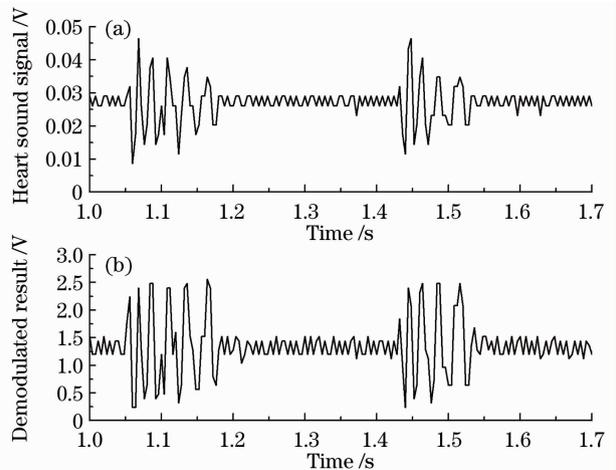


图 7 模拟心音信号的解调结果
Fig. 7 Demodulated result for simulated heart sound signal

5 结 论

针对体温和心音检测的要求,提出了基于 F-P 滤波器的 FBG 动、静态波长解调方法并构建实验系统。静态模式下,利用梳妆滤波器实现 F-P 控制电压与输出波长关系的实时校准,解调精度可达 ± 5 pm,重复性误差在 5 pm 以内。动态模式下,通过在 F-P 滤波器控制电压中加入扰动信号,使其中心波长在工作点处保持稳定,解调动态范围理论值为 225 pm,实际可达 203 pm。系统频率响应 3 dB 带宽设计值为 1 kHz,实测值为 950 Hz,对模拟心音信号具有较好的解调效果。

参 考 文 献

- Li Hongqiang, Yu Xiaogang, Miao Changyun *et al.*. Research of intelligent clothing for body temperature monitoring based on distributed optical fiber Bragg grating sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 208~212
李鸿强,于晓刚,苗长云等. 光纤布拉格光栅人体测温的关键问题研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 208~212
- N. Noury, A. Dittmar, C. Corroy *et al.*. VTAMN-A smart clothe for ambulatory remote monitoring of physiological parameters and activity[C]. Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS. San Francisco, USA, 2004. 3266~3269
- M. D. Rienzo, F. Rizzo, P. Meriggi. MagIC: a textile system for vital signs monitoring[C]. Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS. Lyon, France, 2007. 23~26
- M. Rienzo, F. Rizzo, G. Parati *et al.*. MagIC system: a new textile-based wearable device for biological signal monitoring[C]. Proceedings of the 27th Annual International Conference of IEEE EMBS on Applicability in Daily Life and Clinical Setting. Shanghai, China, 2005. 7167~7169
- R. Paradiso, G. Loriga, N. Taccini. A wearable health care system based on knitted integrated sensors [J]. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2005, **9**(3): 337~344
- S. Park, S. Jayaraman. Enhancing the quality of life through wearable technology [J]. *IEEE Eng. Med. Biol. Magng.*, 2003, **22**(3): 41~48
- Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 232~235
黄锐,蔡海文,瞿荣辉等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 232~235
- Gao Shecheng, Li Qianghua. Characterization of polarization dependent loss in reflection in uniform fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0306004
高社成,励强华. 均匀光纤布拉格光栅的反射偏振相关损耗特性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0306004
- Miao Yiping, Liu Bo, Zhao Qida *et al.*. Simultaneous measurement of bending-curvature and temperature using single tilted fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2388~2392
苗银萍,刘波,赵启大等. 用单一倾斜光纤光栅实现曲率和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2388~2392
- Li Zhiqian, Huang Lijuan, Wu Fei *et al.*. Study on a novel demodulation technique for a multiplexed fiber Bragg grating sensing system[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(5): 569~571
李志全,黄丽娟,吴飞等. 一种新型光纤光栅复用传感解调技术的研究[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(5): 569~571
- Chen Changyong, Qiao Xueguang, Wang Xiaofeng *et al.*. Demodulation system for fiber Bragg grating sensors based on a real-time calibration technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 825~828
陈长勇,乔学光,王小凤等. 基于实时校准技术的光纤光栅传感解调系统[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 825~828
- Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Lu Jiyun *et al.*. A high reliable optic fiber Bragg grating sensor network design[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105004
张晓丽,梁大开,芦吉云等. 高可靠光纤布拉格光栅传感器网络设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0105004
- Han Wei, Ni Jiangsheng, Jin Weiming. Fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on DSP[J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2007, **20**(1): 92~95
韩伟,倪江生,金伟明. 基于 DSP 的光纤布拉格光栅波长解调系统[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(1): 92~95
- Fu Jianwei, Xiao Lizhi, Zhang Yuanzhong *et al.*. Wavelength calibration method for distributed fiber Bragg grating[J]. *Optical Technique*, 2006, **11**(6): 903~905
付建伟,肖立志,张元中等. 分布式光纤 Bragg 光栅波长校准方法[J]. *光学技术*, 2006, **11**(6): 903~905
- Song Huichao, Miao Changyun, Zhang Cheng *et al.*. A new algorithm of body's temperature detection for embedded system based on FBG in smart clothing [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2009, **22**(7): 1045~1049
宋慧超,苗长云,张诚等. 一种新型用于智能服装的 FBG 嵌入式人体温度检测算法[J]. *传感技术学报*, 2009, **22**(7): 1045~1049
- 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