

基于 FBG 实际反射谱匹配的 FBG 峰值波长 偏移量的高精度确定方法

崔 剑^{1,3} 董小鹏¹ 吴兆喜² 苏 娟¹ 林淦斌¹ 王水生²
 $\left[\begin{array}{l} \text{}^1 \text{ 厦门大学信息科学与技术学院光波技术研究所, 福建 厦门 361005} \\ \text{}^2 \text{ 厦门出入境检验检疫局检验检疫技术中心, 福建 厦门 361022} \\ \text{}^3 \text{ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100} \end{array} \right]$

摘要 针对目前光纤布拉格光栅(FBG)解调方案中采用低分辨率 CCD 测量 FBG 峰值波长时存在的问题,提出一种采用基于 FBG 实际反射谱构建基函数匹配 CCD 测量获得的有限测量点确定 FBG 峰值波长偏移量的新方法。分别在理论和实测上对这种方法的有效性和可行性进行了研究,证明这种采用 FBG 实际反射谱函数匹配有限测量数据的方法比采用特定函数拟合测量数据的方法能够更准确地获得 FBG 峰值波长的偏移量。实现了在 CCD 采样点数少、光谱分辨率较低的情况下对 FBG 峰值波长偏移量的高精度确定,有效地提高了实际工程应用中基于低成本 CCD 解调 FBG 峰值波长及其微小偏移量的准确性。

关键词 光纤光学; 光纤光栅传感; 波长解调; 最小二乘法; 峰值波长偏移

中图分类号 T N247; T N253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0705001

A High-Precision Method for Determining the FBG Peak Wavelength Shift Based on FBG Actual Reflection Spectrum Match

Cui Jian^{1,3} Dong Xiaopeng¹ Wu Zhaoxi² Su Juan¹ Lin Ganbin¹ Wang Shuisheng²
 $\left[\begin{array}{l} \text{}^1 \text{ Institute of Lightwave Technology, School of Information Science and Technology,} \\ \text{Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China} \\ \text{}^2 \text{ Inspection and Quarantine Technology Center, Xiamen Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau,} \\ \text{Xiamen, Fujian 361022, China} \\ \text{}^3 \text{ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China} \end{array} \right]$

Abstract Referring to the problems in using low resolution charge coupled device (CCD) to measure fiber Bragg grating (FBG) peak wavelength, a high precision method for determining the FBG peak wavelength shift by matching basis function based on the FBG actual reflection and sampling data measured by CCD is proposed. The effectiveness and feasibility of the new method are studied theoretically and experimentally. It is proved that compared with fitting sampling data by specific functions, the matching method based on FBG actual reflection spectrum can determine FBG peak wavelength shift more accurately. In the case of few sampling data and low resolution of CCD measurement, the high precision determination of FBG peak wavelength shift is achieved. The accuracy of demodulation of FBG peak wavelength shift using low cost CCD in the practical applications is improved effectively.

Key words fiber optics; fiber grating sensing; wavelength demodulation; least square method; peak wavelength shift

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 120.5700

收稿日期: 2011-03-21; 收到修改稿日期: 2011-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(61077031)和国家质检总局科技计划项目(2010IK077)资助课题。

作者简介: 崔 剑(1980—),女,博士研究生,主要从事光纤传感等方面的研究。E-mail: jiancui@sdu.edu.cn

导师简介: 董小鹏(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信与光纤传感等方面的研究。

E-mail: xpdong163@163.com(通信联系人)

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)是当前具有代表性的光纤无源器件,在光纤通信和传感领域都有广泛的应用。在光纤光栅的传感应用中,为了能够准确获得被测物理量的信息,FBG波长的解调是决定传感系统性能的关键技术之一。目前FBG波长解调方法大致可分为两类:1)通过波长可调的扫描光源,或基于光栅衍射的光谱测量方法检测FBG的反射谱从而得出FBG峰值波长的偏移量,例如采用光谱仪直接测量,采用CCD检测^[1,2]、扫描滤波器^[3]及扫描激光法^[4,5]等;2)使用固定滤波器,如边沿滤波法^[6,7],利用滤波器上升或下降边沿光强透射率与波长呈线性关系的特性将FBG峰值波长的偏移转换为输出光强度的变化。采用高波长精度的扫描光源和光谱仪存在系统应用成本高、检测速度慢的问题;边沿滤波法虽然系统简单,但存在要求滤波器与FBG严格匹配、测量范围与精度存在矛盾、多点复用不便等问题。

采用平面光栅或体光栅对FBG反射光衍射并结合线性CCD测量FBG的反射谱,从而获得FBG峰值波长变化的方法具有光谱测量快速、可测波长范围宽、成本较低等优点。但这种方法得到的FBG峰值波长的精确度与FBG反射谱测量的分辨率和CCD的像素数目有很大关系。例如,对于目前常见的采用512 pixel的长波长CCD测量1520~1570 nm波长范围的检测系统来说,相邻像素点对应的光谱分辨率约为0.1 nm;而对于采用普通FBG的温度或应变传感系统来说,温度或应变对应的FBG峰值波长偏移量仅为0.01 nm/℃和0.012 nm/με(设光源波长为1550 nm)。因此,为了得到FBG峰值波长的微小变化,通常需要将CCD获得的若干个离散的FBG采样数据通过已知函数的曲线拟合估算出FBG反射谱的峰值。这种算法存在的缺点有:首先,由于受到CCD像素数目的限制,扫描FBG反射谱获得的采样点数十分有限,精确重构FBG反射谱的难度较大;其次,如果用于重构FBG反射谱的已知函数,如高斯函数^[8]、洛伦兹函数、弗高特函数、样条函数、径向基函数网络^[9]等与FBG实际的反射谱有较大差异时,这种算法将大大降低FBG峰值波长解调的准确度。而FBG在实际制作和封装过程中的不完善都会使其反射谱与理论设计有较大差别。为此,本文提出不采用特定形状的已知函数,而将FBG实际的反射谱(可以预先通过高精度光谱仪测量获得)作为基函数,匹配实际

系统CCD测量所得的采样数据,获得FBG峰值波长的偏移量。这种新的方法可以克服采用常规函数重构FBG反射谱的弊端,有效地提高FBG峰值波长解调的准确度,从而在CCD采样点数少、光谱分辨率低的情况下实现FBG峰值波长偏移量的高精度解调。

2 FBG 波长检测的基本原理

根据模式耦合理论,单模光纤中满足相位匹配条件的FBG反射波的布拉格波长 λ_{Bragg} 为

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 Λ 为FBG的栅距, n_{eff} 为纤芯有效折射率。FBG传感器将外界待测物理量(温度、压力、应变、加速度等)的信息调制到FBG反射光谱的波长量上,当待测物理量发生变化时,热光效应和弹光效应引起纤芯折射率的变化,热膨胀和机械效应引起光栅周期的变化,从而导致布拉格波长的偏移,对应的光栅布拉格波长偏移量 $\Delta\lambda_{\text{Bragg}}$ 为

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg}} = 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

3 FBG 峰值波长偏移量的确定方法

3.1 基函数的构建

采用FBG实际反射谱作为基函数拟合CCD光谱仪测量所得的数据,需假设被测物理量发生变化时FBG反射谱的形状基本保持不变。采用其他已知函数(如高斯函数)拟合测量数据一般也要作此假设。当被测物理量(如温度、应变)在FBG线性响应范围内时,这一假设符合FBG反射谱实际发生的情况。特别是在小范围、高精度温度测量的应用情况下(例如温度变化范围小于30℃,温度测量分辨率高于0.1℃),FBG反射谱的形状随温度变化基本保持不变。

为准确获得FBG的实际反射谱,可以先采用高精度光谱仪测量FBG在常温下的反射谱。设反射谱上最大光功率为 P_{max} ,取反射谱上所有光功率大于 $20\% \times P_{\text{max}}$ 的实测数据点构建基函数,基函数的宽度用波长最大值与最小值的差 $\Delta\lambda$ 表示。以 $96\% \times P_{\text{max}}$ 为基准将用来构建基函数的实测数据做功率归一化处理,然后采用多项式分段拟合归一化之后的FBG反射谱数据得出基函数的表达式 $F(\lambda)$ 。基于FBG实际反射谱构建的基函数可以适应实际FBG反射谱偏离理想函数(如高斯函数),为一般形状的情况。

3.2 有效采样点的选取

设 CCD 对 FBG 反射谱进行采样的测量点波长间隔为 $\Delta\lambda_s$, 与基函数 $F(\lambda)$ 进行匹配运算的有效采样点为 CCD 在 FBG 反射谱上获得的所有采样点中光功率大于 $20\% \times P_{max}$ 且彼此相邻的 m 个点, 设 $E(\cdot)$ 为取整函数, $m = E(\Delta\lambda_s / \Delta\lambda)$ 。并以采样点中的光功率最大值为基准, 对选取的 m 个采样点做功率归一化。

3.3 基函数与有效采样点的匹配

将经过功率归一化的 m 个有效采样数据点 $(\lambda_i, P_i) (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ 与基函数 $F(\lambda)$ 进行对比, 根据最小二乘法, 即采样点的功率值与基函数平移至采样点的波长时对应的功率值之差的平方和 I 达到最小时, 基函数与采样点达到匹配, 这时基函数峰值对应的波长为实际的 FBG 峰值波长, 基函数在波长上的平移量 $\Delta\lambda$ 为实际 FBG 峰值波长偏移量。

I 的表达式为

$$I = \sum_{i=1}^m [P_i - F(\lambda - \Delta\lambda)]^2. \quad (3)$$

当待测物理量 (如温度) 引起 FBG 峰值波长漂移, 基函数与采样点达到匹配时对应的基函数波长平移量也将随之变化, 因此, 可以由基函数波长的平移量得到实际 FBG 峰值波长的变化。

4 实验结果与对比分析

4.1 仿真结果与分析

为使仿真更接近 FBG 的实际工程应用, 选用高精度光谱仪测量得到的 FBG 实际反射谱进行 FBG 反射谱波长平移的仿真。FBG 实际反射谱上光功率大于 $20\% \times P_{max}$ 的部分如图 1 中虚线所示, FBG 峰值波长 1540.273 nm。基于 FBG 实际反射谱确定的高斯曲线如图 1 中实线所示, 高斯函数的表达式为

$$y = 8.35387 \times 10^{-7} + \frac{1.41817 \times 10^{-5}}{0.22428 \times \sqrt{\pi/2}} \times \exp\left[-2 \frac{(x - 1540.273)^2}{0.22428^2}\right]. \quad (4)$$

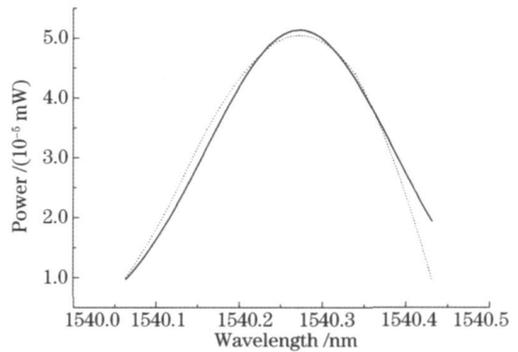


图 1 FBG 反射谱 (虚线) 和基于此反射谱构建的高斯函数曲线 (实线), 高斯函数曲线与 FBG 反射谱曲线的确定系数为 0.9615

Fig.1 FBG reflection spectrum (dotted line) and Gauss curve (solid line) based on the FBG reflection spectrum on the FBG reflection spectrum, the coefficient of determination of the Gauss curve and FBG reflection spectrum curve is 0.9615

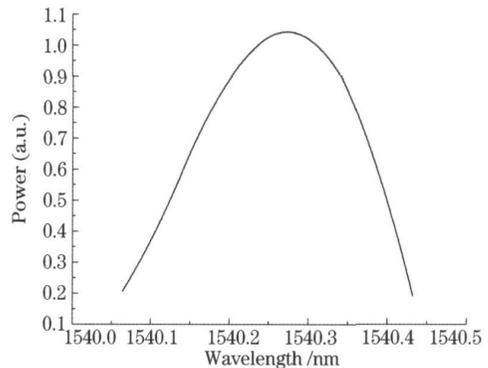


图 2 光功率归一化的 FBG 反射谱 (虚线) 和基于此反射谱构建的基函数曲线 (实线), 基函数曲线与 FBG 反射谱曲线的确定系数为 0.9999

Fig.2 FBG reflection spectrum (dotted line) after power normalization and basis function curve (solid line) based on the FBG reflection spectrum, the coefficient of determination of the basis function curve and FBG reflection spectrum curve is 0.9999

图 2 中虚线为光功率归一化的 FBG 反射谱, 采用多项式分段拟合的方法构建的基函数曲线如图 2 中实线所示, 基函数的表达式为

$$F(\lambda) = \begin{cases} 12.73405\lambda^2 - 39218.39537\lambda + 30196255.8856649, & (1540.064 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1540.139 \text{ nm}) \\ -19.98983\lambda^2 + 61580.42367\lambda - 47425972.2836065, & (1540.139 \text{ nm} < \lambda \leq 1540.239 \text{ nm}) \\ -30.55505\lambda^2 + 94126.2389\lambda - 72490052.5614709, & (1540.239 \text{ nm} < \lambda \leq 1540.339 \text{ nm}) \\ -27.60793\lambda^2 + 85045.98571\lambda - 65495851.7196769, & (1540.339 \text{ nm} < \lambda \leq 1540.432 \text{ nm}) \end{cases} \quad (5)$$

图 1 中高斯函数曲线与 FBG 反射谱曲线的确定系数为 $R^2 = 0.9615$, 图 2 中基函数曲线与 FBG 反射谱曲线的确定系数为 $R^2 = 0.9999$ 。对比图 1, 2 可见, 通过多项式分段拟合构建的基函数比高斯函数更能适应实际 FBG 反射谱偏离理想函数为一般形状的情况。

数值仿真 FBG 反射谱在波长方向上的平移, 并以 0.1 nm 的波长间隔在固定波长上对平移后的 FBG 反射谱进行采样。图 3 为数值仿真 FBG 反射谱波长平移 0.001~0.150 nm 时分别采用高斯拟合与基函数匹配的方法得出的 FBG 峰值波长偏移量的对比图。由基函数匹配采样点得出的 FBG 峰值波长偏移量 $\Delta\lambda_b$ 与波长偏移量真实值 $\Delta\lambda_r$ 的绝对误差 $\varepsilon_e = \Delta\lambda_b - \Delta\lambda_r$ 在 -0.0017~0.0006 nm 范围内, 与之对应的相对误差 $\varepsilon_r = (\Delta\lambda_b - \Delta\lambda_r) / \Delta\lambda_r \times 100\%$ 见图 4; 而高斯函数拟合采样点得出的 FBG 峰值波长偏移量与波长偏移量真实值的绝对误差在 -0.0103~ -0.0126 nm 范围内, 与之对应的相对误差也在图 4 中给出。基函数匹配采样点得出的 FBG 峰值波长偏移量与其真实值之间存在误差的主要原因是: 构建基函数的 FBG 反射谱的功率归一化是以 $96\% \times P_{\max}$ 为基准, 而采样点的功率归一化

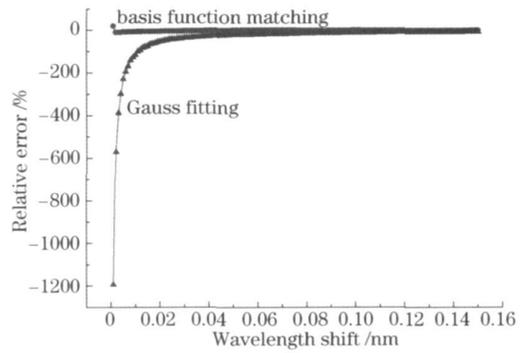


图 4 仿真的 FBG 峰值波长偏移量相对误差对比图

Fig. 4 Comparison of simulated relative error of wavelength shift

是以每次采样点中的功率最大值为基准, 即基函数和采样点进行功率归一化处理的功率基准值存在微小差别。高斯拟合采样点得出的 FBG 峰值波长偏移量与其真实值之间存在误差的主要原因是: 1) FBG 实际反射谱不是理想的高斯形状; 2) 采样点波长间隔较大, 在 FBG 反射谱上取到的采样点数量极为有限, 降低了高斯拟合的准确度。

仿真结果表明, 相比于高斯拟合采样点重构 FBG 反射谱得出 FBG 峰值波长偏移量的传统方法, 采用基于 FBG 实际反射谱的基函数匹配采样点的新方法得出的 FBG 峰值波长偏移量的准确度大幅度提高。

4.2 实测结果与分析

采用高精度光谱仪(型号 AQ6317B) 测量 25.2 °C 水浴 FBG 的实际反射谱, FBG 峰值波长为 1540.273 nm。基于 FBG 实际反射谱确定的高斯函数表达式为

$$y = 8.94441 \times 10^{-7} + \frac{1.41539 \times 10^{-5}}{0.22387 \times \sqrt{\pi/2}} \times \exp\left[-2 \frac{(x - 1540.273)^2}{0.22387^2}\right]. \quad (6)$$

基于功率归一化之后的 FBG 反射谱构建的基函数表达式为

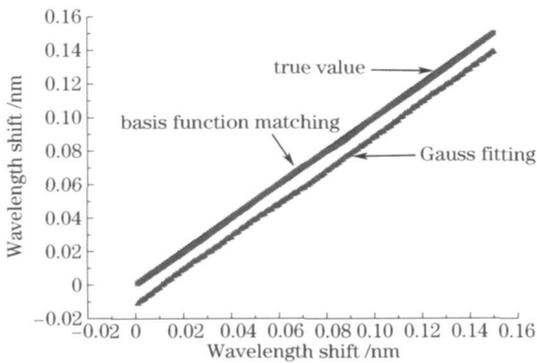


图 3 仿真的 FBG 峰值波长偏移量对比图

Fig. 3 Comparison of simulated FBG peak wavelength shift

$$F(\lambda) = \begin{cases} 10.46211\lambda^2 - 32221.51187\lambda + 24809188.445544, & (1540.064 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1540.139 \text{ nm}) \\ -15.38832\lambda^2 + 47405.07805\lambda - 36508880.7545227, & (1540.139 \text{ nm} < \lambda \leq 1540.239 \text{ nm}) \\ -23.08753\lambda^2 + 71122.21408\lambda - 54773824.218105, & (1540.239 \text{ nm} < \lambda \leq 1540.339 \text{ nm}) \\ -19.55139\lambda^2 + 60227.37055\lambda - 46382074.0121932. & (1540.339 \text{ nm} < \lambda \leq 1540.432 \text{ nm}) \end{cases} \quad (7)$$

水浴实验测量 FBG 峰值波长随温度变化产生的漂移, 历时约 180 min, 水浴温度由 35 °C 自然冷却

至 25 °C, 使用温度计(型号 UT71C) 测量并记录水浴温度, 使用在 1520~1570 nm 波长范围内有

512 pixel 的 CCD 测量随水温变化产生波长漂移的 FBG 实际反射谱, CCD 对 FBG 反射谱的测量点波长间隔约为 0.098 nm, 波长精度为 ± 30 pm。图 5 为 25.4~35.5 °C 高精度光谱仪测量、基函数匹配以及高斯拟合的方法得出的 FBG 峰值波长偏移量的对比图。由基函数匹配采样点得出的 FBG 峰值波长偏移量与光谱仪测量的波长偏移量的绝对误差在 -0.0056~0.0059 nm 范围内, 与之对应的相对误差见图 6; 而由高斯函数拟合采样点得出的 FBG 峰值波长偏移量与光谱仪测量的波长偏移量的绝对误差在 -0.0048~ -0.0177 nm 范围内, 与之对应的相对误差也在图 6 中给出。

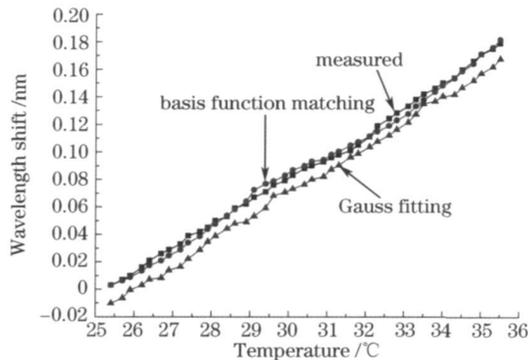


图 5 实测的 FBG 峰值波长偏移量对比图

Fig. 5 Comparison of measured FBG peak wavelength shift

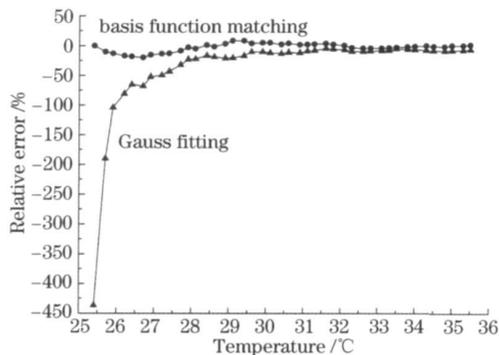


图 6 实测的 FBG 峰值波长偏移量相对误差对比图

Fig. 6 Comparison of measured relative error of FBG peak wavelength shift

实测结果表明, 相比于高斯拟合采样点重构 FBG 反射谱得出 FBG 峰值波长偏移量的传统方法, 采用基于 FBG 实际反射谱的基函数匹配采样点的新方法得出的 FBG 峰值波长偏移量的准确度大幅度提高。

5 结 论

提出了一种采用基于 FBG 实际反射谱构建基

函数匹配 CCD 测量获得的有限测量点确定 FBG 峰值波长偏移量的新方法, 适用于小范围、高精度测量 FBG 峰值波长偏移量的应用情况(例如温度变化范围小于 30 °C, 温度测量分辨率高于 0.1 °C)。与传统的曲线拟合采样点重构 FBG 反射谱获得 FBG 峰值波长的方法相比, 新方法的优势在于: 1) 通过多项式分段拟合实测 FBG 反射谱构建的基函数, 能够适应实际 FBG 反射谱偏离理想函数为一般形状的情况, 避免了使用常规函数重构任意形状的 FBG 反射谱造成的 FBG 峰值波长解调偏差, 有效地提高了确定 FBG 峰值波长的准确度; 2) 显著增强了解调算法对光谱测量点波长间隔的不敏感性, 在 CCD 采样点数少、光谱分辨率较低的情况下实现了高精度的 FBG 峰值波长解调。

参 考 文 献

- 1 D. F. Murphy, A. Flavin, Roy McBride *et al.*. Interferometric interrogation of ir fiber Bragg grating sensors without mechanical path length scanning [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(7): 1004~ 1009
- 2 K. Zhou, A. G. Simpson, X. Chen *et al.*. Fiber Bragg grating sensor interrogation system using a CCD side detection method with superimposed blazed gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(6): 1549~ 1551
- 3 M. A. Davis, D. G. Bellemore, M. A. Putnam *et al.*. Interrogation of 60 fibre Bragg grating sensors with microstrain resolution capability [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(15): 1393~ 1394
- 4 S. H. Yun, D. J. Richardson, B. Y. Kim. Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength swept fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11): 843~ 845
- 5 Zhou Weilin, Yang Huayong, Hu Yongming. Wavelength shift detection system of fiber Bragg grating with tunable narrow linewidth scanning [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, **24**(1): 58~ 59
周伟林, 杨华勇, 胡永明. 基于可调谐窄带扫描法 FBG 波长移位检测系统[J]. *传感器技术*, 2005, **24**(1): 58~ 59
- 6 R. W. Fallon, L. Zhang, L. A. Everall *et al.*. All fibre optical sensing system: Bragg grating sensor interrogated by a long period grating [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**(12): 1969~ 1973
- 7 X. P. Dong, B. C. B. Chu, B. Yi *et al.*. Novel method for the demodulation of wavelength shift of fiber Bragg gratings [C]. *SPIE*, 2001, **4579**: 184~ 187
- 8 Wu Fugang, Zhang Qingshan, Jiang Desheng *et al.*. Method of Gaussian curve fitting for measuring fiber Bragg wavelength [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, **29**(12): 116~ 118
吴付岗, 张庆山, 姜德生等. 光纤光栅 Bragg 波长的高斯曲线拟合求法[J]. *武汉理工大学学报*, 2007, **29**(12): 116~ 118
- 9 Yang Guangxue, Yin Lijing, Kang Shouqiang. Reconstruction of FBG spectrum based on radial basis function network [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, **26**(10): 12~ 14
杨广学, 尹丽静, 康守强. 基于径向基函数网络的 FBG 传感器光谱的重构[J]. *传感器与微系统*, 2007, **26**(10): 12~ 14