

文章编号: 0253-2239(2009)09-2447-05

用时延估计法提高光纤光栅中心波长检测精度

吴艳群 胡永明 姜 暖 杨华勇

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 提出将雷达、声呐领域中的时延估计算法用于均匀应变场或温度场中任意形状的光栅反射谱中心波长的检测。分析了信噪比(SNR)对不同形状反射谱进行峰值提取的影响。分析结果表明,对均匀周期的单模光纤布拉格光栅,其长度越长,折射率变化越大,峰值检测受信噪比影响也越严重;实验结果表明,与常规算法相比,采用时延估计中的相位谱法进行中心波长偏移量的提取,估计精度不受波长扫描精度的限制,对噪声造成的中心波长随机漂移有很好的抑制作用,而且无需对反射谱的形状进行假设与曲线拟合,计算量小,检测精度可达到皮米量级。

关键词 光纤光栅; 波长检测; 峰值提取; 时延估计; 相位谱法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092909.2447

Improvement of Measurement Accuracy in Fiber Bragg Grating Sensors by Using Time Delay Estimation Techniques

Wu Yanqun Hu Yongming Jiang Nuan Yang Huayong

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract The Phase-spectrum method (PS), widely used in time delay estimation techniques in the fields of radar and sonar, is applied to detect the wavelength shift for any shape of reflection or transmission spectrum of fiber Bragg grating sensors in homogeneous strain or temperature fields. The peak detection sensitivity to noise is analyzed, and the results show that for single mode FBG sensors, the larger the fiber length and the refractive index is, the more seriously the SNR influences on the peak detection. The experimental results show that compared with conventional algorithms, the proposed method can effectively suppress the random excursion of the central wavelength, and its estimation accuracy is not limited by the wavelength accuracy. Besides, it needs no assumption of the spectrum shapes and no interpolations, and thus reduces the computational consumption. The wavelength detection accuracy is on a scale of pm.

Key words fiber grating; wavelength shift detection; peak detection; time delay estimation; Phase-spectrum method

1 引 言

光纤光栅传感器具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀性、易于复用等优点,在建筑、航天航空、石油检测等领域得到广泛应用^[1]。光纤光栅传感器利用外界应变或温度的变化引起光纤光栅的周期或折射率变化,使反射/透射光(以下仅涉及反射

型)的中心波长发生位移。如何高精度地检测出传感光栅中心波长皮米量级的偏移,是光纤光栅传感器实用化所面临的关键问题^[2]。外界环境的微扰、激光器输出光功率不稳定等因素都会给光纤光栅反射谱带来噪声,尤其在中心波长附近噪声干扰尤为严重,仅通过光谱峰值确定中心波长的位置误差很

收稿日期: 2008-10-27; 收到修改稿日期: 2008-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(60507010)资助课题。

作者简介: 吴艳群(1981-),女,博士研究生,主要从事光纤传感及相关信号处理方面的研究。

E-mail: wuyanqun@nudt.edu.cn

导师简介: 胡永明(1960-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤信息技术、光纤光栅方面的研究。

E-mail: huyongming_nudt@hotmail.com

大。因此,国内外学者提出了许多提高中心波长位移检测精度的方法,但这些方法在应用条件上受到各种不同的限制,如数字低通滤波器^[3]、数字匹配滤波器^[4]和 ADALINE 网络法^[5],可有效抑制光路中反射点造成的干涉信号对光纤光栅反射谱的影响;质心法^[6]、微分法^[6]、频谱相关法^[7]、高斯曲线拟合法^[8]、径向基函数网络法^[9]等均假设光纤光栅反射谱为高斯型;模拟退火法仅针对匹配光栅法改进波长检测精度^[10]。

本文定量讨论了噪声对峰值检测的影响,并利用雷达、声呐中的时延估计算法求解光纤光栅中心波长的偏移,避开反射谱具体形状的假设,估计精度不受波长扫描精度的限制,计算量小,求解精度高,具有很好的实用性。

2 基本原理

可调谐滤波器法是目前最具发展前景且技术较为成熟、实用的中心波长偏移解调方法之一。传感系统如图 1 所示, ASE 为放大自发辐射光源, FFP-TF 为可调谐光纤法布里-珀罗滤波器, PD 为光电探测器。对压电陶瓷加载扫描信号改变光纤法布里-珀罗(F-P)滤波器的腔长,实现对传感光栅反射波长的滤波调谐,经过光电探测器与 A/D 转换采集光栅的反射光谱。理论上,光栅反射谱在中心波长处幅值最大,常规峰值检测法(CPD 法)就是利用这一性质进行中心波长提取。但实际系统各种光噪声(光路反射点带来的干涉效应、光源光强波动等)造成光纤光栅反射谱的峰值随机漂移,给峰值检测带来很大的误差。

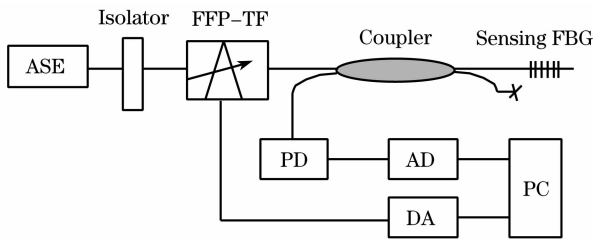


图 1 基于 F-P 滤波器的解调系统装置图

Fig.1 Experimental setup of the demodulation system based on F-P filter

2.1 峰值检测受噪声影响分析

信噪比(SNR)对光栅反射谱峰值提取的影响与反射谱的形状有关^[11]。如图 2 所示,在相同外界白噪声情况下,C 点的值超过 D 点的值的概率大于 A 点的值超过 B 点的值的概率,而且中心波长附近的反射谱曲线平坦区域越大,就存在更多可能超过中

心波长光功率的点。设光纤光栅反射谱为 $G(\lambda)$, 由于 $\left| \frac{dG(\lambda)}{d\lambda} \right|$ 描述了曲线变化趋势,那么正确判断相邻两点的大小所需信噪比反比于 $\left| \frac{dG(\lambda)}{d\lambda} \right|$, 故可定义“噪声敏感系数”为

$$S_n(\lambda) = 1 / \left| \frac{dG(\lambda)}{d\lambda} \right|, \quad (1)$$

当 $S_n(\lambda)$ 越大,在此波长邻近点的相对大小受到噪声影响越严重。

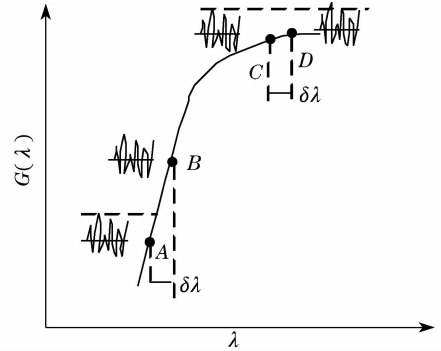


图 2 噪声对峰值检测的影响与反射谱形状的关系

Fig. 2 Relation between the influence of noise on accuracy of peak detection and the shape of reflection spectrum

已知均匀周期的单模光纤布拉格光栅(FBG)的反射率可表示为^[12]

$$R(\lambda) = \frac{\sinh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta L)^2}}{-\zeta^2 + \cosh^2 \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta L)^2}}, \quad (2)$$

式中 $\zeta = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{\text{eff}}$ 为自耦合系数,

$\kappa = \frac{\pi \Delta n_{\text{eff}}}{\lambda}$ 为互耦合系数, n_{eff} , Δn_{eff} 为纤芯平均折射率及其变化(在此为常数), $\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda$ 为理想光栅(即 $\Delta n_{\text{eff}} \rightarrow 0$ 时)的中心反射波长, L 为光栅长度, Λ 为光栅周期。

假设光栅 $n_{\text{eff}} = 1.46$, $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$, 图 3 分别给出以下 3 种情况的反射谱。曲线 A: $L = 1 \text{ mm}$, $\Delta n_{\text{eff}} = 5 \times 10^{-4}$; 曲线 B: $L = 3 \text{ mm}$, $\Delta n_{\text{eff}} = 5 \times 10^{-4}$; 曲线 C: $L = 3 \text{ mm}$, $\Delta n_{\text{eff}} = 4 \times 10^{-4}$ 。由图 3 可见,随着 L 的增加,反射谱带宽变窄,更接近矩形,反射峰越平坦;随着 Δn_{eff} 的增加,反射峰平坦区的范围越大。将中心波长移至原点时,3 种光栅对应的噪声敏感系数曲线如图 4 所示。为了比较不同光栅的噪声敏感系数,将 $R(\lambda)$ 进行归一化。由图 4 可知,光栅长度越长,折射率变化越大, $S_n(\lambda)$ 也就越大,意味着进行峰值检测受信噪比影响越严重。

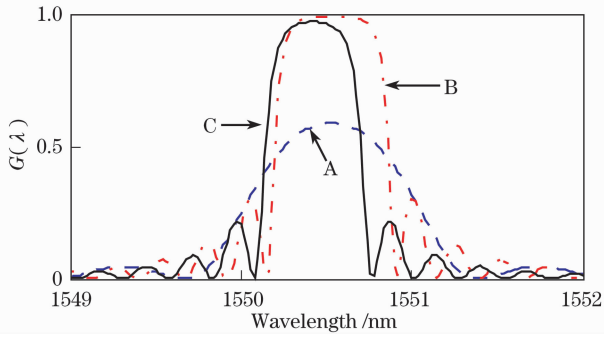


图3 不同FBG的反射谱

Fig. 3 Reflection spectrum for different FBG

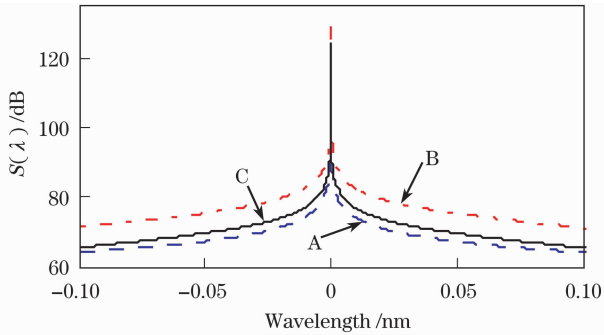


图4 不同FBG的噪声灵敏系数曲线

Fig. 4 Curves of noise sensitivity for different FBG

因此,即使在信噪比很高的情况下,中心波长附近较小的噪声都会导致峰值的位置漂移,给峰值检测带来很大的误差。选择合适的算法准确提取中心波长值,对提高光纤光栅传感器的性能至关重要。

2.2 互谱法提取中心波长

光纤光栅反射特性可通过耦合模理论计算,但耦合模式方程与光波长有关,形式复杂,而且其反射特性与制造、封装工艺有很大关系,难以从理论上进行描述。为减小噪声给峰值检测带来的误差,一般对反射谱进行高斯曲线拟合或多项式拟合。将雷达、声呐中的时延估计方法应用于光纤光栅中心波长偏移量的检测,从而避开了反射谱具体形状的假设,得到更通用的波长检测方法。

把已知环境条件下采集的光谱作为参考光谱,设 $F_1(\lambda) = G(\lambda) + N_1(\lambda)$, 其中 $N_1(\lambda)$ 为本底噪声谱。在非均匀温度或应变场下,反射谱展宽^[13~15]; 光纤光栅横向受力时,反射谱发生分裂^[16], 尤其当轴向存在较大的应变梯度时,反射谱形状扭曲,甚至出现多峰^[17]。这些情况下外界物理信息的提取不在本文的讨论范畴。研究结果表明,当光纤光栅在均匀应变场或均匀温度场作用下,光栅反射谱的形状基本保持不变,仅中心波长的位置发生偏移^[13,14,18]。因此在均匀温度或应力场中,设 λ_s 为被

测物理量改变时布拉格波长的改变量,此时扫描得到的光谱曲线可以写为

$$F_2(\lambda) = \alpha G(\lambda - \lambda_s) + N_2(\lambda), \quad (3)$$

式中 α 为不同时刻光功率的波动造成反射谱幅度变化; $N_2(\lambda)$ 为其本底噪声谱。

比较 $F_1(\lambda)$ 和 $F_2(\lambda)$ 表达式可知,波长偏移量 λ_s 的参数估计类似于雷达、声呐等领域中时延估计问题,这为其解决提供了丰富多样的处理手段。考虑到可调谐光纤 F-P 滤波器的扫描频率和扫描精度相互制约,借鉴了时延估计中的相位谱方法进行中心波长提取^[19]。

通常假设 $G(\lambda)$, 噪声 $N_1(\lambda)$, $N_2(\lambda)$ 三者互不相关,那么 $F_1(\lambda)$ 与 $F_2(\lambda)$ 的互相关函数为

$$\begin{aligned} R_{12}(\tilde{\lambda}) &= E[F_1(\lambda)F_2(\lambda + \tilde{\lambda})] = \\ &= \alpha E[G(\lambda)G(\lambda + \tilde{\lambda} - \lambda_s)] + E[G(\lambda)N_2(\lambda + \tilde{\lambda})] + \\ &+ \alpha E[N_1(\lambda)G(\lambda + \tilde{\lambda} - \lambda_s)] + E[N_1(\lambda)N_2(\lambda + \tilde{\lambda})] \approx \\ &\approx \alpha R_G(\tilde{\lambda} - \lambda_s). \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $R_G(\tilde{\lambda})$ 为 $G(\lambda)$ 的自相关函数,即 $R_G(\tilde{\lambda}) = E[G(\lambda)G(\lambda + \tilde{\lambda})]$ 。

由(4)式可知,互相关运算抑制了不相关噪声,提高了信噪比,有利于中心波长估计精度的提高。对(4)式进行傅里叶变换得到 $F_1(\lambda)$ 与 $F_2(\lambda)$ 的互功率谱

$$\begin{aligned} P_{12}(\nu) &= \int_0^{\infty} R_{12}(\tilde{\lambda}) \exp(-j2\pi\tilde{\lambda}\nu) d\tilde{\lambda} = \\ &= \alpha P_G(\nu) \exp(-j2\pi\lambda_s\nu), \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $P_G(\nu)$ 为 $R_G(\tilde{\lambda})$ 的傅里叶变换。

故相位谱为 $\phi(\nu) = 2\pi\lambda_s\nu$ 。通常采用最小二乘法得到 λ_s 的估计值

$$\hat{\lambda}_s = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\int \nu \phi(\nu) d\nu}{\int \nu^2 d\nu}. \quad (6)$$

相位谱法利用相位和频率在信号频段内的线性关系,在高信噪比的频带范围内使用最小二乘法估计直线的斜率,即 λ_s , 因此该算法的估计精度不受波长扫描精度的影响。通过中心波长偏移量 λ_s 可推算外界温度或应变场的改变量。当参考光谱测量环境对应的温度或应变值已知,将温度或应变场的改变量与参考温度或应变值相加,即可得到外界温度或应变场的绝对值。

3 实验结果及分析

实验采用 Finisar 公司的 ASE 光源模块与 Micron Optics 的 FFP-TP 模块,波长扫描精度为

5 pm. 将光纤光栅温度传感器置于恒温水箱,测得的反射谱如图 5 所示,可见外界噪声导致峰值漂移且反射谱曲线不光滑。在同一温度下多次测量其反射谱,使用常规峰值检测法得到谱峰随时间随机漂移的情况,如图 6 所示。对峰值的概率分布进行曲线拟合,由图 7 可见,峰值的随机漂移服从均方差为 20.31 pm 的高斯白噪声分布。

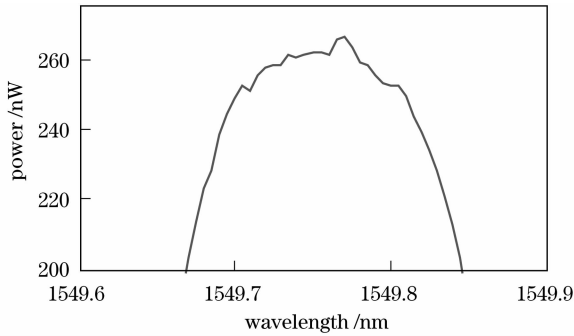


图 5 中心波长附近的 FBG 反射谱

Fig. 5 Reflection spectrum of FBG around central wavelength

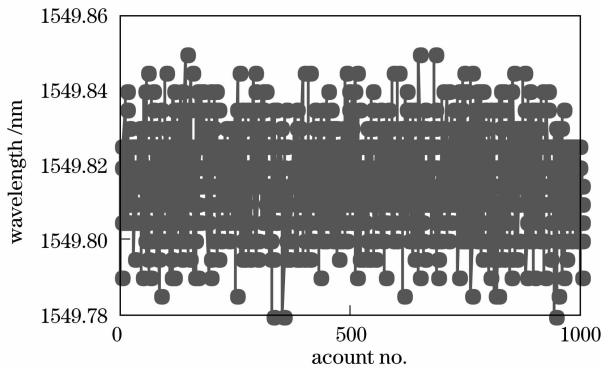


图 6 使用 CPD 法得到峰值随时间漂移情况

Fig. 6 Random excursion of the peak wavelengths with CPD method

将传感光纤光栅放入恒温水箱,将 24 °C 时采集得到的光功率谱作为参考谱,水温从 24 °C 上升到 33.6 °C,待光纤光栅稳定后采集 10 组光功率谱。任选其中 1 组光谱与参考反射谱中心波长对准。由图 8 可见,在均匀温度场中,除了峰值附近随机波动严重外,两反射谱形状几乎不变。

分别使用 CPD 法、谱相关法(SC 法)与本算法(PS 法)进行比较,如图 9 所示。直接提取(4)式的峰值获得波长改变量 λ ,得到曲线 SC(1)。受到波长扫描精度的限制,SC 法通常假设光栅反射谱为高斯型,使用高斯拟合对(4)式的相关峰进行插值以提高计算精度,得到结果如曲线 SC(2)所示。由于反射谱形状略偏离高斯型,故 SC(2)的结果小于相位

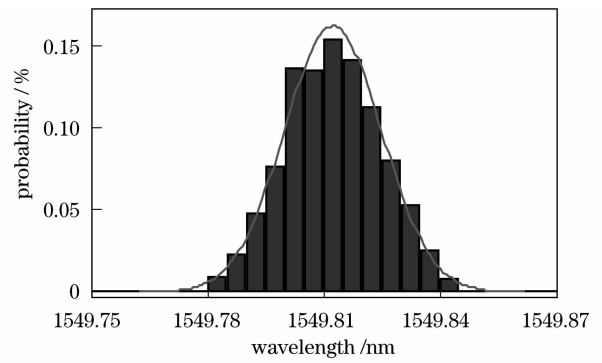


图 7 峰值分布的高斯曲线拟合

Fig. 7 Probability of the peak wavelengths from Gaussian simulation

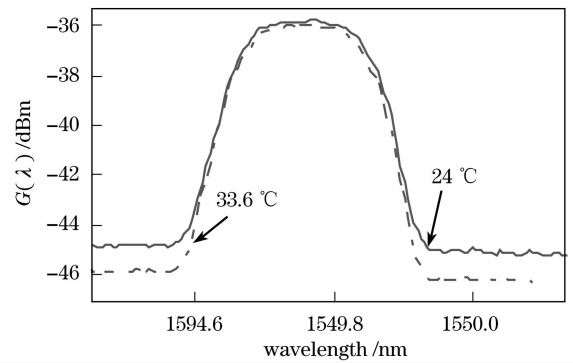


图 8 不同温度下采集的光功率谱

Fig. 8 Optic power spectrum at different temperatures

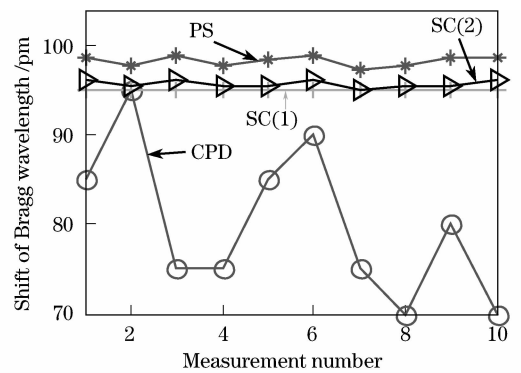


图 9 10 次独立测量得到的布拉格波长偏移的比较

Fig. 9 Comparison of results of Bragg wavelength shift from 10 independent measurements

由于传感光纤光栅温度灵敏度标称值为 10.36 pm/°C,因此温度升高 9.4 °C 时对应的波长移动量约为 97.38 pm。表 1 给出了各种算法多次测量得到的计算均值与估计方差。由表 1 可见,本文提出的算法(PS 法)的均值最接近理想值,且该算法多次计算的标准偏差较小,说明该算法对随机噪声干扰的稳定性好,而未经插值的谱相关法虽然结果稳定性好,但是估计精度受波长扫描精度的限制。

综合以上分析,受噪声影响,反射谱峰值并不是真实的中心波长,常规峰值检测法的估计值波动最严重,检测精度差;谱相关法的估计精度受到波长扫描精度的限制,必须进行曲线拟合以提高精度,计算量增加,而且不同光栅的反射谱需要采用不同的拟合方法,不具通用性。PS 法估计精度不受扫描波长分辨率的影响,而且不对反射谱形状作任何假设,无需进行高斯拟合,减少了计算量,检测精度大大提高。

表 1 均值与标准偏差

Table 1 Mean and standard deviation

Algorithm	PS	CPD	SC(1)	SC(2)
Mean /pm	98.2	80.0	95.0	95.70
Standard deviation /pm	0.97	8.50	0	1.58

4 结 论

光纤光栅传感器中心波长偏移量的准确提取是制约其实用化的关键技术。针对光纤光栅中心波长附近易受到噪声干扰的问题,定量分析了信噪比对不同形状反射谱进行峰值提取的影响。仿真结果表明,对均匀周期的单模光纤布拉格光栅,其长度越长,折射率变化越大,进行峰值检测受信噪比影响也越严重。针对均匀温度场或应变场的情况,提出将雷达、声呐中的时延估计的相位谱法应用到任意形状的光纤光栅反射/透射谱的中心波长偏移量的提取,该算法不受扫描波长精度的影响,估计精度高,多次估计的标准方差不到 1 pm,而且无需进行曲线插值拟合,计算量大大减小,适合光纤光栅中心波长的实时检测。

参 考 文 献

- Zhi Zhou, Thomas W. Graver, Luke Hsu *et al.*. Techniques of advanced FBG sensors: fabrication, demodulation, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges [J]. *Pacific Science Review*, 2003, **5**: 116~121
- Yang Jian, Zhao Yong, Ni Xingjie. Development of novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1575~1579
杨剑,赵勇,倪行洁. 新型光纤光栅水声传感器的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1575~1579
- C. C. Chan, W. Jin, M. S. Demokan. Enhancement of measurement accuracy in fiber Bragg grating sensors by using digital signal processing [J]. *Opt. Laser Technol.*, 1999, **31**: 299~307
- C. C. Chan, J. M. Gong, W. Jin *et al.*. Improving measurement accuracy of fiber Bragg grating sensor using digital matched filter[C]. *OFS*, 2002, **15**th, **1**: 183~186
- C. C. Chan, C. Z. Shi, W. Jin *et al.*. Improving the wavelength detection accuracy of FBG sensors using an ADALINE network[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(8): 1126~1128
- Fu Jianwei, Xiao Lizhi, Zhang Yuanzhong *et al.*. A new method for fiber Bragg grating wavelength demodulation with calibration [C]. *SPIE*, 2006, **6027**: 602744-1~602744-8
- J. M. Gong, C. C. Chan, W. Jin *et al.*. Enhancement of wavelength detection accuracy in fiber Bragg grating sensors by using a spectrum correlation technique [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **212**: 29~33
- Baiou Guan, Xinyong Dong, Zhiguo Liu *et al.*. An active demodulation system for multiplexed FBG sensors[C]. *SPIE*, 2001, **4357**: 13~16
- A. S. Paterno, J. C. C. Silva, M. S. Milczewski *et al.*. Radial-basis function network for the approximation of FBG sensor spectra with distorted peaks [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**: 1039~1045
- C. Z. Shi, N. Zeng, C. C. Chan *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
- Liu Yunqi, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun *et al.*. Theoretical and experimental researches on tunable filtering detection technique of fiber grating sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 88~92
刘云启,刘治国,郭转运等. 光纤光栅传感器的调谐滤波检测技术[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 88~92
- Wang Wei, Xin Li, Zhao Haifa *et al.*. Frequency spectrum properties of fiber Bragg gratings[J]. *Physics Experimentation*, 2007, **27**(2): 3~7
王伟,辛丽,赵海发等. 光纤 Bragg 光栅的频谱特性[J]. *物理实验*, 2007, **27**(2): 3~7
- Peng Weibin, Wu Delong, Li Haiyang. Analysis of response of optical fiber Bragg grating sensors in non-homogeneous strain fields[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(2): 188~193
彭伟斌,吴德隆,李海阳. 布拉格光纤光栅传感器在非均匀应变场中的响应分析[J]. *光学技术*, 2003, **29**(2): 188~193
- Peng Weibin, Wu Delong. Response of optical fiber Bragg grating sensors in temperature fields [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2003, **263**(3): 38~41
彭伟斌,吴德隆. 布拉格光纤光栅传感器的温度响应研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 2003, **263**(3): 38~41
- Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Light intensity referred and temperature insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 207~211
郭团,赵启大,刘丽辉等. 光强检测型光纤光栅温变不敏感动态压力传感研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 207~211
- Wu Fei, Li Lixin, Li Zhiqian. Theoretical analysis of fiber Bragg grating characterization by applying transverse force[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 472~476
吴飞,李立新,李志全. 均匀光纤布拉格光栅横向受力特性的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 472~476
- Zhang Rongxiang, Zheng Shijie, Xia Yanjun *et al.*. Application of support vector regression for reconstruction of non-uniform strain profile along the fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1513~1517
张荣祥,郑世杰,夏彦君等. 支持向量回归算法在光纤光栅非均匀应变重构中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1513~1517
- Shen Zhenqiang, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan. Frequency-division multiplexing technique of fiber Grating fabry-pérot 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
- Allan G. Piersol. Time delay estimation using phase data[J]. *IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1981, **29**(3): 471~477