

# 干涉型光纤法布里-珀罗传感系统抗噪方法的 实验研究

牛嗣亮 廖毅 饶伟 胡永明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 对于干涉型光纤法布里-珀罗 (FFP) 传感系统, 外界环境对解调干涉仪的扰动是其主要噪声源之一。在光纤布拉格光栅构成的 FFP 传感系统中, 对比分析了采用参考传感器和参考光源两种抗噪方法。实验结果表明, 对于单频和宽带干扰, 两种方法均可提高信噪比到 40 dB。而且由于采用窄线宽光纤激光器作为参考光源的噪声水平较低, 其差分探测结果具有更好的抗噪效果。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 法布里-珀罗腔; 差分探测; 抗噪方法

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0106003

## Experimental Investigation on Antinoise Technique of Interferometric Fiber Fabry-Perot Sensor System

Niu Siliang Liao Yi Rao Wei Hu Yongming

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** In interferometric fiber Fabry-Perot (FFP) sensor systems, environmental disturbances in interrogation interferometers are a dominant source of noise. In a fiber Bragg grating defined FFP sensor system, the antinoise techniques utilizing reference sensor and reference wavelength are compared with each other. Signal-to-noise ratio improvements of 40 dB have been achieved experimentally for both single-frequency and broadband disturbances. Moreover, because of the lower noise level of the reference fiber laser with a narrow linewidth, the differential result of the reference wavelength approach exhibits a better antinoise effect.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; Fabry-Perot cavity; differential detection; antinoise technique

**OCIS codes** 060.2310; 050.2230; 060.3735; 280.4788; 060.2370; 050.2770; 140.4780

### 1 引 言

光纤光栅具有体积小、结构简单、制造方便和复用性能优良等优点, 近年来迅速发展并取得了令人瞩目的成果<sup>[1~3]</sup>。用两个光纤布拉格光栅 (FBG) 作为反射镜, 可构成法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪<sup>[4,5]</sup>。本征型光纤法布里-珀罗 (FFP) 传感器, 相对于非本征型的有限复用能力和耗散式短腔决定的低灵敏度, 其探测性能具有明显的优势<sup>[6,7]</sup>。由于采用强度调制的 FFP 传感器动态范围较小, 通常利用路径

匹配干涉仪来构建干涉型 FFP 传感系统<sup>[8~11]</sup>。理论研究表明, 30 cm 长的 FFP 干涉仪就可以实现对  $10^{-12}$  量级微小应变的测量<sup>[10]</sup>。而且在曲率传感器的相关实验中, 采用腔长为 6 cm 的 FFP 传感器在高于 1 Hz 的频带获得了  $0.6 \text{ ne}/\text{Hz}^{1/2}$  的探测精度<sup>[11]</sup>。此外, 基于 FBG 的 FFP 传感器在振动<sup>[12]</sup>、温度<sup>[13]</sup>、浓度<sup>[14]</sup> 和热膨胀<sup>[15]</sup> 等参量传感方面都有相关研究。

在基于 FBG 的干涉型传感系统中, 外界环境对

收稿日期: 2011-06-30; 收到修改稿日期: 2011-08-12

作者简介: 牛嗣亮 (1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感和信号处理等方面的研究。

E-mail: liusiliang12345@yahoo.com.cn

导师简介: 胡永明 (1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: huyongming\_nudt@hotmail.com

解调干涉仪的扰动是一个主要噪声源。为了提高传感系统的稳定性,通常采用两种抗噪方法。一种是对解调干涉仪的光路进行设计或者控制。如在单FBG传感系统中,Ning等<sup>[16]</sup>提出采用一个辅助光源构建一个反馈控制系统,通过对解调干涉仪臂差实时控制来补偿环境对其的影响,在实验中提高系统信噪比约25 dB。该方法增加了系统的复杂度,而且臂差的控制系统也会引入额外的噪声。另一种是基于参考传感器的差分探测方法。Cranch等<sup>[11,17]</sup>分别在基于单FBG和采用FFP的干涉型传感系统中利用波分和空分复用的参考传感器实现了约40 dB的抗噪效果。而且,在商用地震探测的FFP传感器阵列中,每个传感基元都配置一个参考干涉仪来提高系统稳定性<sup>[18]</sup>。这种方法的关键是在空间位置和光学结构中靠近传感阵列处放置一个屏蔽(被测量不敏感)的参考基元来监测共同光路的噪声。虽然在解调干涉仪中引入的校正信号可以实现削减40 dB的降噪效果,但是从统计信号处理的角度,在其他频带的噪声水平会由于两个同强度不相关噪声的相减而抬高3 dB。而且对于组建参考传感器阵列,该方法会增加探测阵列的复杂度,同时也对光源能量的分配提出更高的要求。

本文对减小解调干涉仪受环境影响的抗噪方法进行了实验研究。在基于FBG的FFP干涉型传感系统中,利用一个远离FBG中心波长的光纤激光器

监测解调干涉仪受环境的扰动,进而实现差分探测,并且与参考传感器方法进行对比分析。

## 2 差分探测原理

采用非平衡马赫-曾德尔(M-Z)型干涉仪解调的干涉型FFP传感系统如图1所示,其中不包含参考光源和参考传感器部分(图1中虚线部分)。考虑到低反射率FBG构成的F-P腔中多次反射光每经过一个往返,其光强会成数量级递减,所以该类谐振腔光谱通常近似为双光束干涉<sup>[13]</sup>。因此系统中宽带光源发出的光通过M-Z干涉仪后变为两束,然后在两个FBG处分别发生反射,使入射光变为4部分,最后通过环形器被光电探测器PD2接收。常用的FBG带宽为0.1 nm左右,在1550 nm中心波长处的反射光相干长度约1.7 cm,远小于FFP腔长和M-Z干涉仪的臂差(通常为几厘米至几十米量级)。因此,探测器处4束光中只有路径匹配的2束光会发生干涉,PD2接收到的光强可以表示为<sup>[19]</sup>

$$I \approx R \{2 + \cos[\beta(2h + 2L - L_{MZ})]\}, \quad (1)$$

式中 $L_{MZ}$ 是M-Z型解调干涉仪的臂差, $h$ 是两个光栅的间距, $L$ 和 $R$ 分别是FBG的长度和反射率, $\beta = 2\pi n/\lambda_s$ 为传播常数, $n$ 和 $\lambda_s$ 分别为FBG的折射率和中心波长。当两个干涉仪的臂差匹配时,即 $L_{MZ} = 2(h + L)$ ,系统可以实现最大干涉条纹可见度50%。

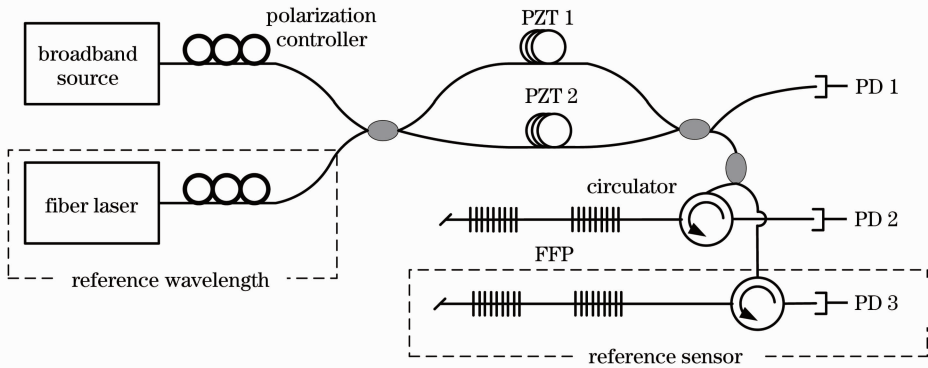


图1 采用参考传感器和参考光源的干涉型FFP传感系统

Fig.1 Interferometric FFP sensor system with a reference sensor and a reference wavelength

当解调干涉仪受到环境扰动时,由(1)式,PD2接收到的干涉信号相位变化可以表示为

$$\Delta\phi_{T1} = \Delta\phi_{FFP} - \frac{2\pi n L_{MZ}}{\lambda_s} \left( \frac{\Delta L_{MZ}}{L_{MZ}} + \frac{\Delta n}{n} - \frac{\Delta\lambda_s}{\lambda_s} \right), \quad (2)$$

式中 $\Delta\phi_{FFP}$ 为被测参量引起的FFP干涉仪信号的相位变化(即传感信号), $\Delta L_{MZ}$ , $\Delta n$ 和 $\Delta\lambda_s$ 分别表示M-Z干涉仪的臂差、光纤折射率和FBG中心波长的受外界环境扰动发生的变化。如图1中右下虚线框

图部分所示,采用空分复用方式,把一个FBG中心波长为 $\lambda_R$ 的FFP干涉仪作为参考传感器,其干涉信号由光电探测器PD3接收,PD3探测到的干涉信号相位变化与 $\Delta\phi_{T1}$ 基本相同。假设参考传感器对被测参量不敏感,即(2)式中 $\Delta\phi_{FFP} = 0$ ,那么其探测结果即表示M-Z干涉仪受外界扰动的影响。因此,为了消除解调干涉仪受环境扰动的影响,可以采用

两个传感器探测结果相减的方式实现差分探测,考虑到两个 FFP 传感器中心波长不同,差分探测结果可以表示为

$$\Delta\phi_{\text{FFP1}} \approx \Delta\phi_{\text{T1}} - (\lambda_{\text{R}}/\lambda_{\text{S}})\Delta\phi_{\text{R}}, \quad (3)$$

式中  $\Delta\phi_{\text{R}}$  为参考传感器测量到的相位变化。

如图 1 中左下虚线框图部分所示,采用一个远离 FBG 中心波长的光纤激光器作为参考光源,它发出的光通过非平衡 M-Z 干涉仪被光电探测器 PD1 接收,对 M-Z 干涉仪受外界的扰动进行监测。具体地,M-Z 干涉仪受环境扰动的影响可以表示为

$$\Delta\phi_{\text{MZ}} = \frac{2\pi n L_{\text{MZ}}}{\lambda_{\text{FL}}} \left( \frac{\Delta L_{\text{MZ}}}{L_{\text{MZ}}} + \frac{\Delta n}{n} \right), \quad (4)$$

式中  $\lambda_{\text{FL}}$  表示光纤激光器的波长。假设 FBG 中心波长变化很小,那么采用参考光源的差分探测结果可以表示为

$$\Delta\phi_{\text{FFP2}} \approx \Delta\phi_{\text{T1}} + \frac{\Delta\phi_{\text{MZ}}\lambda_{\text{FL}}}{\lambda_{\text{S}}}. \quad (5)$$

由于 FBG 中心波长和光纤激光器的波长不能保持固定,(3)式和(5)式中解调干涉仪受环境的扰动不能完全消除。通过上述分析可见,采用参考传感器和参考光源都是为了监测解调干涉仪受外界扰动的影响,但是由于采用的光源与差分结果中涉及的参数不同,实际差分抗噪效果有所差别。下面对两种方法进行实验分析。

### 3 实 验

采用 4 个相同的 FBG 构成两个臂差约 60 mm 的 FFP 干涉仪,FBG 的反射率为 10%,中心波长为 1549.3 nm,带宽为 0.1 nm。系统的探测精度由噪声等效信号决定,其与解调干涉仪臂差与 FFP 腔长的匹配程度密切相关<sup>[10]</sup>。为了优化传感系统性能,需要尽可能平衡两个串联的 FFP 和 M-Z 干涉仪的臂差。通过测量 FBG 的反射谱,由理论拟合估计得到 FBG 长度为 11.6 mm。最终,在实验中搭建了臂差为 143 mm 的 M-Z 型匹配干涉仪,系统实现了优于 45% 的干涉条纹可见度。两个 FFP 传感器干涉信号时域波形如图 2 所示。

在图 1 中,宽带光源和光纤激光器发出的光最先通过起偏器(包含在光源中,未标出)和偏振控制器,利用输入偏振态控制方法来减小偏振衰落的影响<sup>[20]</sup>。把 M-Z 干涉仪的两个臂分别缠绕在两个压电陶瓷(PZT)上,其中在 PZT1 上加载频率为 12.5 kHz 的正弦信号实现数字相位载波(PGC)解调方法消除相位衰落的影响,在 PZT2 上加载单频

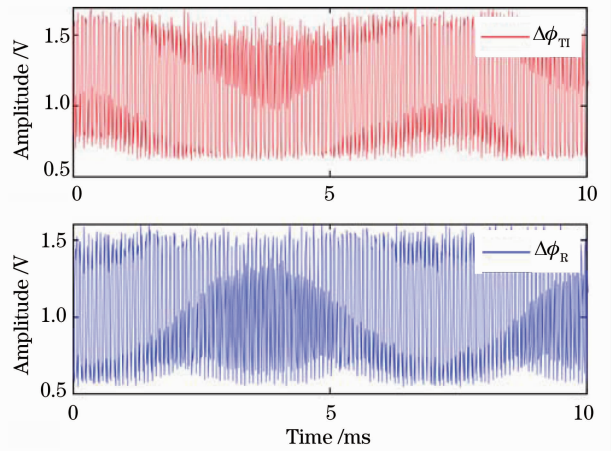


图 2 两个 FFP 传感器干涉信号的时域波形  
Fig. 2 Temporal waveforms of the interferometric signals related to the two FFP sensors

或者宽带信号用于模拟解调干涉仪受到的环境扰动。实验中,采用 1 个中心波长为 1553 nm、线宽为千赫兹量级的光纤激光器作为参考光源,其相位噪声水平优于  $-100$  dB ( $0$  dB =  $1$  rad/Hz<sup>1/2</sup>)。

下面对当解调干涉仪受到单频、线性调频和宽带扰动时,采用参考光源和参考传感器方法的差分探测结果进行比较分析。把 1 个 FFP 传感器放置于铝制夹具中,加载 400 Hz 振动信号,同时在 PZT2 上加载 150 Hz 单频信号模拟环境扰动对解调干涉仪的影响,3 个光电探测器 PD1、PD2 和 PD3 接收的干涉信号通过 PGC 解调后,得到的相位变化分别为  $\Delta\phi_{\text{MZ}}$ 、 $\Delta\phi_{\text{T1}}$  和  $\Delta\phi_{\text{R}}$ ,其频谱对比如图 3 所示。可以看到,由于 PZT2 的非理想单频振动,使得 150 Hz 周围频带的频谱被抬高。3 个通道的解调信号在 150 Hz 中心频率附近具有相同的频谱成分,在较高频段两个 FFP 传感器的测量结果噪声水平相当,而采用参考光源的测量结果  $\Delta\phi_{\text{MZ}}$  噪声水平最

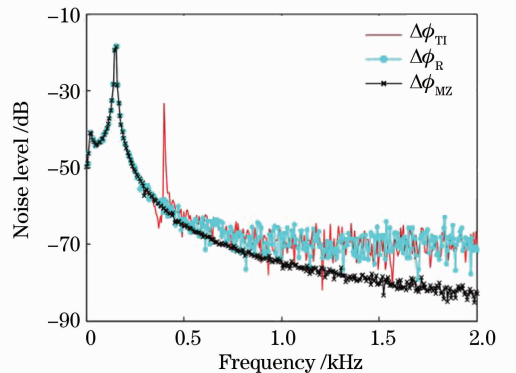


图 3 带有 150 Hz 扰动的 400 Hz 信号解调结果对比  
Fig. 3 Comparison of demodulated signals at 400 Hz with a 150 Hz perturbation

低。此时,  $\Delta\phi_{MZ}$  的噪声水平是由宽带光源的相对强度噪声决定的, 测量为  $-90$  dB, 但这不影响参考光源方法的有效性, 而且可以采用 1 个中心波长为 1553 nm 的带通滤波器, 进一步改善  $\Delta\phi_{MZ}$  的噪声特性。

采用参考传感器和参考光源的差分探测结果分别为  $\Delta\phi_{FFP1}$  和  $\Delta\phi_{FFP2}$ , 频谱如图 4 所示。可以看到, 两个差分结果都实现了对 150 Hz 扰动约 40 dB 的削减效果, 而且对 400 Hz 信号的幅度没有影响。由于采用参考光纤激光器测量的解调干涉仪受环境的扰动  $\Delta\phi_{MZ}$  具有更低的噪声水平, 其差分结果在全频段没有对原解调结果  $\Delta\phi_{TI}$  引入额外的噪声。相比而言, 由于采用参考传感器测量的结果  $\Delta\phi_R$  具有与  $\Delta\phi_{TI}$  相当的噪声水平, 差分运算使得其结果在 400 Hz 信号以外的其他频段的噪声水平增大。这一结果符合统计信号处理的相关理论, 即两个强度相当的不相关噪声的加减运算会使其强度增大大约 3 dB。

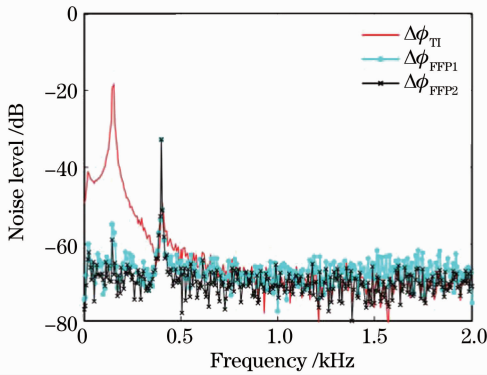


图 4 带有 150 Hz 扰动的差分测量结果对比曲线  
Fig. 4 Comparison of the two differential results with a 150 Hz perturbation

为了比较两种方法对不同频率扰动的抗噪效果, 在 PZT2 上加载 100~1000 Hz 的线性调频信号, 两种方法的差分结果对比如图 5 所示。可以看到, 在 100~1000 Hz 频率范围的解调干涉仪噪声都被削减掉了, 而且采用参考波长方法的结果降噪效果显著, 具有更低的噪声谱。

进一步, 为了验证两种方法对宽带扰动的抗噪效果, 在 FFP 传感器加载 400 Hz 信号的同时敲击 M-Z 干涉仪。解调信号和差分结果时域波形对比如图 6 所示, 采用参考光源的差分探测方法很好的恢复了 FFP 干涉仪的 400 Hz 单频信号。差分结果频谱对比如图 7 所示, 通过敲击引入的对解调干涉仪的宽带扰动被削减, 且在低频段降噪幅度大于 40 dB。

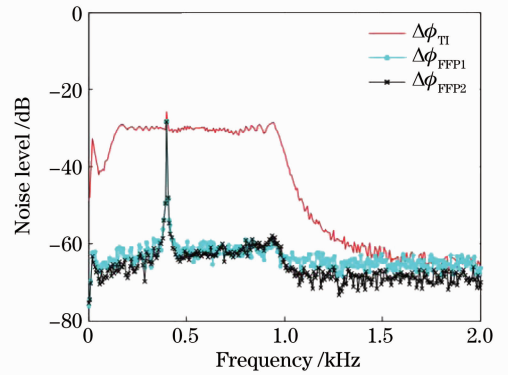


图 5 带有线性调频扰动的差分测量结果对比曲线  
Fig. 5 Comparison of the two differential results with a chirp perturbation

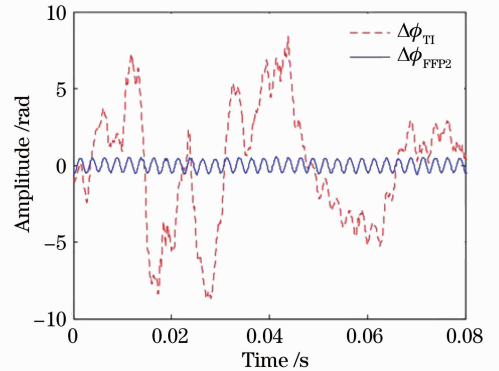


图 6 带有敲击扰动的 400 Hz 信号解调结果  
Fig. 6 Demodulated signals at 400 Hz with a perturbation by knock

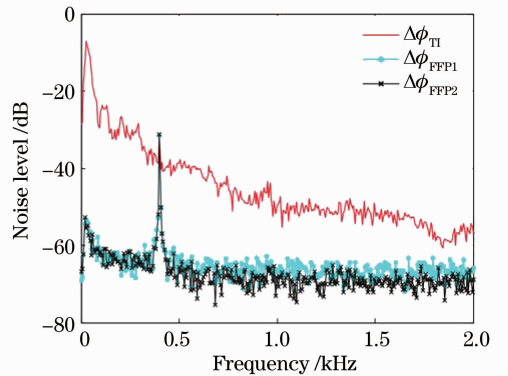


图 7 带有敲击扰动的差分测量结果对比曲线  
Fig. 7 Comparison of the two differential results with a perturbation by knock

## 4 结 论

在基于 FBG 的 FFP 干涉型传感系统中, 实验研究了减小解调干涉仪受环境扰动的抗噪方法。当解调干涉仪受到单频、线性调频和宽带扰动时, 对比分析了采用参考传感器和参考光源的差分探测方

法,两种方法都可提高信噪比约 40 dB。由于作为参考光源的光纤激光器具有更低的噪声水平,其差分结果没有对原 FFP 传感结果引入额外的噪声,在不相关噪声的频带比采用参考传感器的差分结果的噪声水平低约 3 dB。采用参考光源的差分探测方法在不降低系统探测精度和不增加阵列复杂性的同时,能提高干涉型 FFP 传感系统在嘈杂环境中应用的性能,特别适用于解调干涉仪受环境扰动为主要噪声源的传感应用。如采用 FFP 干涉仪的海底水声探测阵列,该方法可以减小“湿端”的复杂度,便于阵列的制造和维护。

### 参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 2 Wang Chunbao, Zhang Weigang, Liu Zhuolin *et al.*. Research on character of the cascade of fiber cavity and connection with fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1485~1489  
王春宝, 张伟刚, 刘卓琳等. 光纤微腔级联性质及布拉格光栅特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1485~1489
- 3 Li Wenbo, Zhou Wangmin, Wei Zhiwu *et al.*. Analysis of edge characteristics of grating and cavity of fiber grating-based Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2355~2360  
李文博, 周王民, 魏志武等. 光纤光栅法布里-珀罗腔的腔、栅边缘特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2355~2360
- 4 Niu Siliang, Rao Wei, Jiang Nuan *et al.*. Investigation on phase spectra of fiber Bragg gratings and the constructed Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0806007  
牛嗣亮, 饶伟, 姜暖等. 光纤布拉格光栅及其构成的法布里-珀罗腔的相位谱特性研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0806007
- 5 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406006  
张乐, 吴波, 叶雯等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406006
- 6 Rao Yunjiang. Recent progress in fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, **12**(3): 227~237
- 7 Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling *et al.*. SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensors based on chirped fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 631~635  
饶云江, 周昌学, 冉曾令等. 啁啾光纤光栅法布里-珀罗传感器波分频复用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 631~635
- 8 Fan Fan, Zhao Jianlin, Wen Xixing *et al.*. Sensitivity analysis on strain sensor based on Fabry-Perot interferometer with intensity interrogation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1525~1531  
樊帆, 赵建林, 文喜星等. 强度解调型光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的应变传感灵敏度分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1525~1531
- 9 Yin Guolu, Lou Shuqin, Peng Wanqing *et al.*. Sensitivity of fiber Bragg grating-based Fabry-Perot interferometric sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1490~1495  
尹国路, 娄淑琴, 彭万敬等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗干涉式传感器灵敏度[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1490~1495
- 10 C. Z. Shi, H. L. Ho, W. Jin *et al.*. Noise limit in heterodyne interferometer demodulator for FBG-based sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(10): 2287~2295
- 11 G. A. Cranch, G. M. H. Flockhart, W. N. MacPherson *et al.*. Ultra-high-sensitivity two-dimensional bend sensor [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(9): 520~521
- 12 S. P. Christmas, D. A. Jackson, P. J. Henderson. High-resolution vibration measurements using wavelength-demultiplexed fibre Fabry-Perot sensors [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(7): 901~905
- 13 S. V. Miridonov, M. G. Shlyagin, D. Tentori. Twin-grating fiber optic sensor demodulation [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **191**(3): 253~262
- 14 F. Wu, G. F. Zhu, X. Chen. Study of the characteristics of concentration sensing based on FBG Fabry-Perot cavity [J]. *Optoelectron. Lett.*, 2009, **3**(5): 138~142
- 15 P. L. Swart, A. A. Chtcherbakov, A. J. v. Wyk. Multiplexed fibre Bragg grating Fabry-Perot interferometers for measuring the coefficients of thermal expansion of anisotropic solids[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(5): 1146~1151
- 16 Y. N. Ning, W. J. Shi, K. T. V. Grattan. Interferometric detection scheme for measuring wavelength shift using a stabilized interferometer with an additional reference wavelength[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **138**(1): 27~30
- 17 J. He, F. Li, H. Xiao. Elimination of environmental noise in interferometric wavelength shift demodulation for dynamic fiber Bragg grating sensor array[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(14): 2836~2840
- 18 J. T. Kringlebotn, H. Nakstad, M. Eriksrud. Fibre optic ocean bottom seismic cable system; from innovation to commercial success[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 75037U
- 19 G. A. Cranch, G. M. H. Flockhart, C. K. Kirkendall. Efficient fiber Bragg grating and fiber Fabry-Perot sensor multiplexing scheme using a broadband pulsed mode-locked laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(11): 3798~3807
- 20 A. D. Kersey, M. J. Marrone, A. Dandridge *et al.*. Optimization and stabilization of visibility in interferometric fiber-optic sensors using input-polarization control[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(10): 1599~1609

栏目编辑:谢婧