

doi:10.3788/gzxb20164512.1207003

光纤法布里-珀罗传感器的条纹计数法解调误差研究

许亨艺,雷小华,陈伟民,陈涛

(重庆大学 光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:为探究光纤法布里-珀罗传感器条纹计数法的解调准确度,对基于波峰波谷复合算法的条纹计数法的腔长解调误差及其影响因素进行了理论推导、仿真分析和实验验证.结果表明:光纤法布里-珀罗传感器干涉光谱的干涉级次及干涉级次差、波峰波谷的位置准确度是影响解调准确度的主要因素;干涉级次随腔长的变化导致腔长解调结果产生周期性跳动误差,跳动周期约为光源中心波长的 $1/4$;周期性跳动误差的幅度受波峰波谷位置准确度的影响,波峰波谷位置准确度越低,周期性跳动误差幅度越大,腔长解调误差越大.

关键词:信号解调;光纤法布里-珀罗传感器;条纹计数法;腔长;误差

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)12-1207003-5

Demodulation Error of Fringe Counting Method for Optical Fiber Fabry-Perot Sensor

XU Heng-yi, LEI Xiao-hua, CHEN Wei-min, CHEN Tao

(Key Lab of Optoelectronic Technology & Systems Ministry of Education, College of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To investigate the demodulation accuracy of fringe counting method for optical fiber Fabry-Perot sensor, the cavity length demodulation error of the fringe counting method based on the composite algorithm of crest and trough, and its influence factors that may cause demodulation errors were studied theoretically and experimentally. Results show that, the main influencing factors are interference orders and location errors of spectral peaks and valleys. The variations of interference orders with the cavity length will cause periodic jitter demodulation errors, and the period equals a quarter of the center wavelength of light source. Location errors of spectral peaks and valleys determine the magnitude of demodulation errors, that is, the larger the location errors are, the larger the demodulation errors will be.

Key words: Signal demodulation; Optical fiber Fabry-Perot sensor; Fringe counting method; Cavity length; Error

OCIS Codes: 070.0070; 060.2370; 120.2230; 120.1880

0 引言

光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P, 简称光纤法-珀)传感器具有体积小、灵敏度高、稳定性好、免受电磁干扰等优点,被广泛应用于应变、温度、位移等测量领

域^[1-4]. 光纤法-珀传感器通过腔长变化感知被测量,腔长解调直接影响被测量的准确性.因此,研究光纤法-珀传感器的腔长解调准确度具有重要意义.

光纤法-珀传感器腔长解调的传统方法主要有条纹计数法^[5]、傅里叶变换法^[6-8]和相关解调法^[9-11]等.其

基金项目:国家自然科学基金(No. 51675068)和广东省光纤传感与通信技术重点实验室开放基金资助

第一作者:许亨艺(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术. Email: xhy_cqu@126.com

导师:陈伟民(1955-),男,教授,博士,主要研究方向为光电技术、光纤传感. Email: wmchen0802@126.com

通讯作者:雷小华(1980-),女,副教授,博士,主要研究方向为光电检测、光纤传感. Email: xhlei@cqu.edu.cn

收稿日期:2016-06-29; **录用日期:**2016-09-30

<http://www.photon.ac.cn>

中,傅里叶变换算法将包含腔长的信号从波长域转换到频率域分析,其解调速度快,但解调准确度较低.相关解调算法则通过构造包含可调谐腔长变量的相关因子,通过相关运算求传感器腔长,其解调准确度相对较高,但速度慢.

相对于上述两种解调算法,条纹计数法具有原理简单,解调速度快等优点,被广泛研究.研究学者从条纹计数法的双峰算法到波峰波谷复合算法,已大大提高了算法的解调准确度^[5, 12-13],但波峰波谷复合算法的解调误差以及实际解调效果的分析却鲜有报道.因此,有必要对基于波峰波谷复合算法的条纹计数法的腔长解调误差及其影响因素以及实际解调效果进行深入研究.

1 条纹计数法的解调误差

光纤法-珀传感器的基本结构如图 1. 当宽带光源 $I_0(\lambda)$ 入射到光纤法-珀传感器时,从法-珀腔两个端面

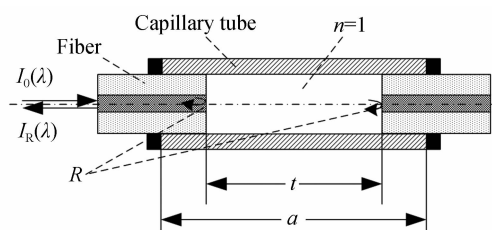


图 1 光纤法-珀传感器的基本结构
Fig. 1 Structure of an F-P sensor

反射回来的光相遇相干,根据双光束干涉理论,当法-珀腔内的介质为空气时,反射输出光强 $I_R(\lambda)$ 的表达式为^[14]

$$I_R(\lambda) = 2R(1 + \cos \frac{4\pi t}{\lambda}) I_0(\lambda) \quad (1)$$

式中, λ 为波长; R 为光纤端面反射率; t 为法-珀腔腔长.

由式(1)可知,当 t 和 λ 满足关系

$$\frac{2\pi}{\lambda_m} \cdot 2t = 2m\pi \quad (2)$$

$I_R(\lambda)$ 取得极大值,即波峰;当 t 和 λ 满足关系

$$\frac{2\pi}{\lambda_n} \cdot 2t = (2n-1)\pi \quad (3)$$

$I_R(\lambda)$ 取得极小值,即波谷,如图 2. 式(2)中 m 为波峰的干涉级次,式(3)中 n 为波谷的干涉级次.

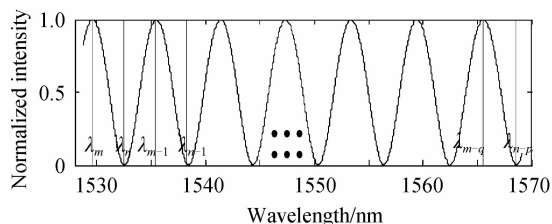


图 2 光纤法-珀传感器的反射光谱
Fig. 2 Reflective spectrum of an F-P sensor

根据 $I_R(\lambda)$ 的任意两个波峰或波谷所对应的波长,可求解光纤法-珀传感器的腔长,即

$$\begin{cases} t_p = \frac{q\lambda_m\lambda_{m-q}}{2(\lambda_{m-q} - \lambda_m)} \\ t_v = \frac{p\lambda_n\lambda_{n-p}}{2(\lambda_{n-p} - \lambda_n)} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4),可得基于波峰波谷复合算法的条纹计数法的法-珀腔长表达式^[15-16]

$$t = \frac{t_p + t_v}{2} = \frac{q\lambda_m\lambda_{m-q}}{4(\lambda_{m-q} - \lambda_m)} + \frac{p\lambda_n\lambda_{n-p}}{4(\lambda_{n-p} - \lambda_n)} \quad (5)$$

式中: $m, m-q$ 为波峰的干涉级次, q 为波峰的干涉级次差; $n, n-p$ 为波谷的干涉级次, p 为波谷的干涉级次差; λ_m, λ_{m-q} 为波峰所对应的波长; λ_n, λ_{n-p} 为波谷所对应的波长; t_p, t_v 分别为根据任意两波峰或波谷解调出的法-珀腔腔长.

由式(5),根据误差理论可得腔长测量结果的误差 δt 为

$$\delta t = \left[\left(\frac{\partial t}{\partial \lambda_m} \right)^2 \delta \lambda_m^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial \lambda_{m-q}} \right)^2 \delta \lambda_{m-q}^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial \lambda_n} \right)^2 \delta \lambda_n^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial \lambda_{n-p}} \right)^2 \delta \lambda_{n-p}^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

根据 $\lambda_m/\lambda_{m-q} = (m-q)/m, \lambda_n/\lambda_{n-p} = (n-p)/n$, 且假设波峰波谷的位置误差满足 $\delta \lambda_m = \delta \lambda_{m-q} = \delta \lambda_n = \delta \lambda_{n-p} = \delta \lambda$, 则

$$\delta t = \left[\frac{1}{4q} \sqrt{m^4 + (m-q)^4} + \frac{1}{4p} \sqrt{n^4 + (n-p)^4} \right] \delta \lambda \quad (7)$$

从式(7)可知,条纹计数法的腔长解调误差与以下几个因素有关:1)波峰的干涉级次 $m, m-q$ 及波峰的干涉级次差 q ; 2)波谷的干涉级次 $n, n-p$ 及波谷的干涉级次差 p ; 3)波峰波谷的位置准确度 $\delta \lambda$. 由式(1)~式(3)可知,式(7)中干涉级次 $m, m-q, n, n-p$ 及干涉级次差 q, p 会随着腔长的变化而变化,故要分析条纹计数法的腔长解调误差,需先分析式(7)中干涉级次及干涉级次差随腔长的变化规律,再结合波峰波谷的位置准确度加以分析.

2 误差分析

2.1 干涉级次及干涉级次差

由式(1)可知,对于光谱范围已知的人射宽带光源,当光纤法-珀传感器的腔长一定时,便可根据其反射输出光谱求得其波峰波谷所对应的波长,进而根据式(2)及式(3)求得波峰波谷的干涉级次,两干涉级次相减,便可得到相应的干涉级次差.基于上述方法,图 3 及图 4 分别给出了当入射宽带光源的光谱范围为 1 529~1 569 nm,腔长的变化范围为 215~220 μm 时,波峰的干涉级次 $m, m-q$ 及干涉级次差 q 随腔长 t 的变化情况和波谷的干涉级次 $n, n-p$ 及干涉级次差 p 随腔长 t 的变化情况.

图 3(a)中,随着腔长的增加,波峰的干涉级次呈周期性增加,周期约光源中心波长的 $1/2(1\ 549/2 = 774.5\ \text{nm})$,但波峰的干涉级次 $m, m-q$ 随腔长的增加不同步.波峰的干涉级次 $m, m-q$ 随腔长不同步的周期性增加导致其干涉级次差 q 随腔长变化时出现周期性跳动,周期同样约为光源中心波长的 $1/2(1\ 549/2 = 774.5\ \text{nm})$,如图 3(b).

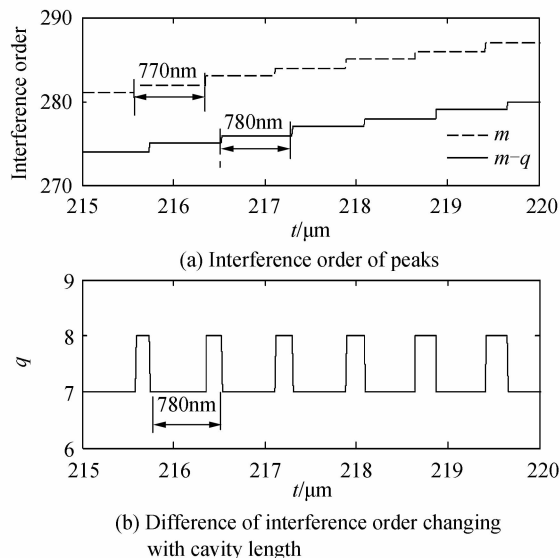


图 3 波峰的干涉级次及干涉级次差随腔长的变化
Fig. 3 Interference order of peaks and difference of interference order changing with cavity length

图 4 中,随着腔长的增加,波谷的干涉级次 $n, n-p$ 及干涉级次差 p 随腔长的变化规律与图 3 中波峰的干涉级次 $m, m-q$ 及干涉级次差 q 随腔长的变化规律相同.将波峰波谷的干涉级次及干涉级次差随腔长的变化情况分别绘制在同一坐标下,便可得到图 5.其中,波峰的干涉级次与波谷的干涉级次随腔长的变化不同步,且相邻的波峰波谷对应的干涉级次 m 与 n (或 $m-q$ 与 $n-p$) 随腔长的变化相差约半个周期,如图 5(a)所示;图 5(b)中波峰的干涉级次差 q 与波谷的干涉级次差 p 随腔长的变化也不同步,相差半个周期.

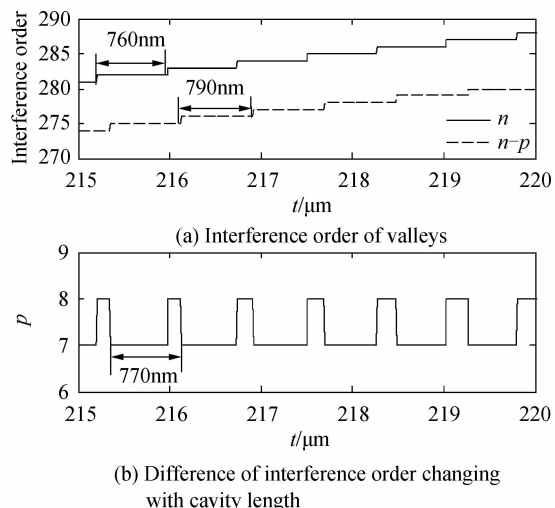


图 4 波谷的干涉级次及干涉级次差随腔长的变化
Fig. 4 Interference order of valleys and difference of interference order changing with cavity length

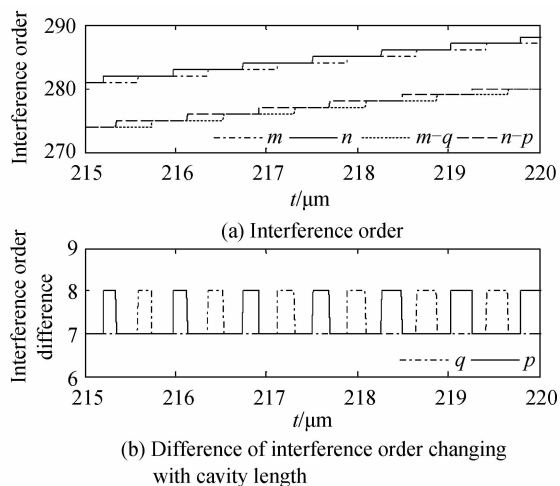


图 5 干涉级次及干涉级次差随腔长的变化
Fig. 5 Interference order and difference of interference order changing with cavity length

2.2 波峰波谷的位置准确度

波峰波谷的位置准确度,即式(7)中的 $\delta\lambda$, 主要由于实际获得的光纤法-珀传感信号为存在一定包络的非理想信号,使得波峰波谷的位置发生偏移,如图 6.

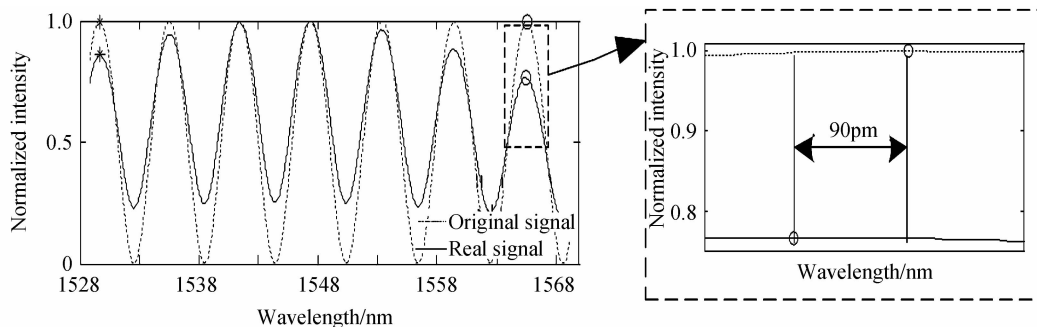


图 6 叠加包络的传感器信号与原始信号
Fig. 6 Signal superposed with envelope and original signal of the sensor

实际中,由于光纤法-珀传感器的制作以及测量系统中光源和噪声等的影响,获得的传感器信号始终存在包络,且包络的形状和大小不一,导致波峰波谷的位置准确度 $\delta\lambda$ 的大小不定,少则 pm 量级,多则 nm 量级。

虽然波峰波谷的位置准确度存在一定的不确定性,无法定量分析,但结合第 3.1.1 节中干涉级次及干涉级次差随腔长的变化,假定传感器的波峰波谷位置发生不同程度偏移,可仿真出在解调过程中条纹计数法的腔长解调误差 δt 随腔长 t 的变化情况,如图 7。其中,当波峰波谷的位置准确度 $\delta\lambda$ 为 100 pm 时,条纹计

数法的腔长解调误差约为 $0.75 \mu\text{m}$,即波峰波谷的位置准确度 $\delta\lambda$ 传递给腔长误差 δt 时将被放大几千倍,且随着腔长的增加,误差整体呈增大趋势;误差在变化过程中存在周期性跳动,周期约为光源中心波长的 $1/4$ ($1549/4=387.25 \text{ nm}$),与图 5 中干涉级次差 q 、 p 叠加之后的变化周期一致,即波峰或波谷干涉级次的变化都会导致误差 δt 发生变化,是腔长解调误差产生周期性跳动的原因;随着波峰波谷位置准确度 $\delta\lambda$ 的减小,误差 δt 增加且跳动越来越明显。

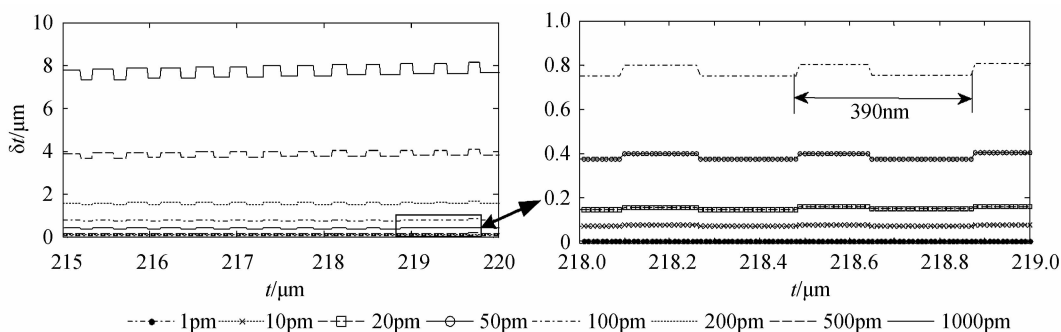


图 7 不同波峰波谷位置准确度下腔长测量误差随腔长的变化

Fig. 7 Error changing with cavity length in different position accuracy of peaks and valleys

3 实验

为验证上述理论分析,自制了两只不同信号包络的光纤法-珀传感器,用来模拟波峰波谷存在位置准确度差异的情况,其中 #1 光纤法-珀传感器的包络比 #2 光纤法-珀传感器明显,即 #1 光纤法-珀传感器的波峰波谷位置准确度相对较差,如图 8。

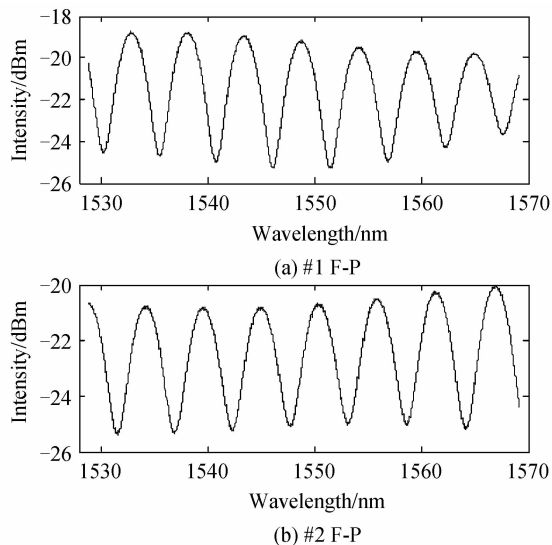


图 8 光纤法-珀传感器的输出信号

Fig. 8 Output signals of two F-P sensors

采用如图 9 所示的等强度梁连续加载实验系统对这两只光纤法-珀传感器进行应变实验。实验中,采用扫频激光源作为系统宽带光源(光谱范围为 $1529 \sim$

1569 nm),采用 Tspec1001 光谱仪(分辨率为 10 pm)对光纤法-珀传感器进行实时监测,实验结果如图 10。

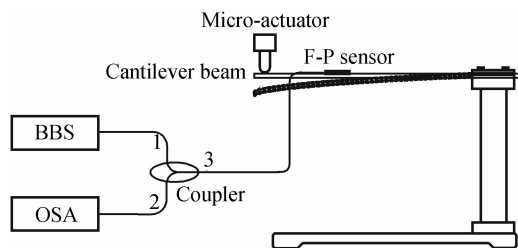


图 9 等强度梁连续加载示意图

Fig. 9 Continuous loading diagram of cantilever beam

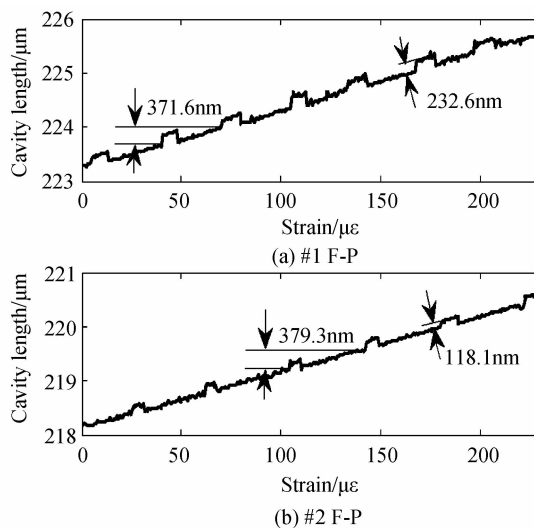


图 10 腔长解调结果

Fig. 10 Demodulation results of cavity length

随着等强度梁的加载,光纤法-珀传感器的腔长理论上应随之呈线性连续增加,但由于两只法-珀传感器的包络明显,波峰波谷位置偏离,图 10 中两只法-珀传感器的条纹计数法解调结果均出现了明显的周期性跳动,周期约为光源中心波长的 $1/4(1\ 549/4=387.25\ \text{nm})$,且由于#1法-珀传感器的包络比#2法-珀传感器明显,其波峰波谷的位置偏离相对严重,故在图 10 的解调结果中#1法-珀的跳动较#2法-珀明显.实验结果与仿真结果一致,验证了理论分析的正确性.

4 结论

本文对基于波峰波谷复合算法的条纹计数法的腔长解调误差及其影响因素进行了理论推导、仿真分析和实验验证,结果表明:采用基于波峰波谷复合算法的条纹计数法解调光纤法-珀腔长,由于波峰波谷的干涉级次在解调过程中会发生变化,导致解调结果存在周期性跳动,周期约为光源中心波长的 $1/4(1\ 549/4=387.25\ \text{nm})$;实际应用中,光纤法-珀传感器的包络越明显,波峰波谷的位置准确度越底,该周期性跳动越明显,解调误差越大.因此在用基于波峰波谷复合算法的条纹计数法解调法-珀腔长时,应尽量使用包络小的光纤法-珀传感器,保证信号平整度.

参考文献

- [1] WANG A. Optical fiber Fabry-Perot interferometry [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2014, **9083**(2): 90-98.
- [2] DING W, JIANG Y, GAO R, *et al.* High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric sensors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, **86**(5): 831100-79.
- [3] SUN H, ZHANG X, YUAN L, *et al.* An optical fiber Fabry-Perot interferometer sensor for simultaneous measurement of relative humidity and temperature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(5): 2891-2897.
- [4] ZHANG Y, HUANG J, LAN X, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and pressure with cascaded extrinsic Fabry-Perot interferometer and intrinsic Fabry-Perot interferometer sensors [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(6): 167-174.
- [5] WANG Ning, ZHU Yong, CHEN Wei-min, *et al.* Study of improved algorithm about influences of the wavelength quantization error on the accuracy of fiber optic F-P strain sensing system[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2002, **24**(3): 251-254.
王宁,朱永,陈伟民,等. 光纤法珀应变传感器量化误差及改进算法研究[J]. 压电与声光, 2002, **24**(3): 251-254.
- [6] ZHANG Peng, ZHU Yong, CHEN Wei-min. A study on fourier transformation demodulating theory of the gap of optical fiber Fabry-Perot sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1449-1452.
- [7] ZHANG Peng, ZHU Yong, TANG Xiao-chu, *et al.* Demodulation of the optical fiber Fabry-Perot sensor based on fourier transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 186-189.
章鹏,朱永,唐晓初,等. 基于傅里叶变换的光纤法布里-珀罗传感器解调研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 186-189.
- [8] LEI Xiao-hua, CHEN Wei-min, ZHANG Peng. Demodulation method based on fourier transform with cubic spline interpolation for optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 705-708.
雷小华,陈伟民,章鹏. 基于三次样条插值的光纤 F-P 传感器傅里叶变换解调研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(4): 705-708.
- [9] ZHANG Peng, ZHU Yong, LEI Xiao-hua, *et al.* Cross-correlation demodulation of optic fiber Fabry-Perot sensor multiplexed in parallel [J]. *Opto-electronic Engineering*, 2004, **31**(11): 70-72.
章鹏,朱永,雷小华,等. 光纤法-珀传感器并联复用的互相关解调[J]. 光电工程, 2004, **31**(11): 70-72.
- [10] ZHAO Yan, WANG Dai-hua. Mathematical model of optical wedges for cross-correlation demodulation of cavity length of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 01060071.
赵艳,王代华. 用于光纤法布里-珀罗传感器腔长互相关解调的光楔的数学模型研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 01060071.
- [11] LI Jun-shou, ZHU Yong, WANG Ning, *et al.* An algorithm for improving the signal stability of the fast fiber optic Fabry-Perot non-scanning correlation demodulation system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 01060051.
李钧寿,朱永,王宁,等. 一种提高快速光纤法-珀非扫描式相关解调系统信号稳定性的算法[J]. 光子学报, 2015, **44**(1): 01060051.
- [12] CHEN Wei-min, WANG Ning, ZHU Yong, *et al.* Experimental study on the affection of gaussian spectrum of light source on the optical fiber F-P strain sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(1): 88-92.
陈伟民,王宁,朱永,等. 实际光源光谱分布对相位型光纤法-珀应变传感器的影响及其实验研究[J]. 中国激光, 2003, **30**(1): 88-92.
- [13] ZHU Yong, FU Yu-mei, FENG Jun, *et al.* Study on advanced algorithm of EFPI strain sensing system [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2001, **13**(z1): 48-51.
朱永,符欲梅,封君,等. 提高光纤法珀应变传感器系统测量准确度的改进算法[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2001, **13**(z1): 48-51.
- [14] MA C, WANG A. Signal processing of white-light interferometric low-finesse fiber-optic Fabry-Perot sensors [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(2): 127-38.
- [15] 王宁. 基于波形分析的光纤法珀应变仪在桥梁应变监测中的应用[D]. 重庆:重庆大学, 2002.
- [16] 陈雨森. 光纤法珀应变传感器的解调算法改进和复用技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2003.