

EFPI 光纤传感器腔长解调方法研究^①

张振荣^{②*} 夏 霖^{**} 罗 洪^{③*}

(^{*}广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004)

(^{**}国防科学技术大学光电科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 研究了非本征型法布里-珀罗干涉(EFPI)光纤传感器系统的传感原理和腔长解调方法,考虑到 EFPI 传感器的腔长解调精度会直接影响到传感系统的稳定性和测量精确性,提出了一种新的基于傅里叶变换的腔长解调方法。该方法利用傅里叶变换的频移性,有效地消除了快速傅里叶变换的栅栏效应,提高了傅里叶变换的精度。理论和实践证明,相比传统的快速傅里叶变换方法,这种利用傅里叶变换频移特性的方法的解调精度至少提高 10 倍。

关键词 光纤传感器, 非本征型法布里-珀罗干涉(EFPI)腔, 解调技术, 傅里叶变换

0 引言

非本征型法布里-珀罗干涉(extrinsic Fabry-Perot interferometric, EFPI)光纤传感器结构简单、体积小、可靠性好、灵敏度高,因而具有广阔的工业应用前景。高温、高压、强电磁干扰等恶劣工业环境下的温度、压力测量是 EFPI 光纤传感器应用的一个重要方向^[1]。EFPI 光纤传感器在应变测量应用上具有数十微米的腔长动态范围,只要实现十纳米级的腔长分辨率就可以进行应变的测量。而 EFPI 光纤传感器在压力、温度测量应用上其传感器结构决定了腔长动态范围相对较小(通常小于 $5\mu\text{m}$),一般要求纳米级的腔长分辨率才可能进行实用化的温度、压力测量。这对 EFPI 光纤传感器的解调技术提出了更高的要求。EFPI 光纤传感器解调技术的测量分辨率和抗干扰能力是决定其能否胜任恶劣环境下压力、温度测量应用的关键。EFPI 光纤传感系统主要包括传感器和解调系统,在 EFPI 测量系统中,其他物理量作用在传感器上导致了腔长的变化,腔长解

调的精度关系到整个系统的稳定性和测量的精度。传感系统的性能在很大程度上通过解调出的信号来判定。因此,解调方法是整个传感系统的关键之一。目前主要的解调方法有快速傅里叶变换法、强度解调法、相位解调法和波长解调法^[2-5],其中快速傅里叶法具有大动态范围、不受相位噪声影响以及能实现绝对测量的优点。但由于傅里叶变换的栅栏效应影响了频率分辨率,导致最终的解调的精度优先。本文通过利用傅里叶变换的频移特性,消除了栅栏效应的影响,分析了解调的几个误差来源,在一定程度提高了解调的精度。

1 EFPI 光纤传感器的传感原理及解调方法

我们采用一个平行平面玻璃板模型分析 EFPI 光纤传感器的工作原理^[6]。图 1 为平面玻璃板模型结构图。假设入射光波电矢量振幅为 E ,并假设两反射面之间的距离为 d ,折射率为 n ,平板周围的介质折射率为 n_0 ,平板与空气间的反射率为 r ,透射

^① 863 计划(2013AA09A412-1)和国防科技大学重大应用基础研究(ZDYYJCYJ20140701)资助项目。

^② 男,1976 年生,博士;研究方向:光通信与光电子;E-mail: zrz76@xu.edu.cn

^③ 通讯作者,E-mail: luohongrong2000@163.com

(收稿日期:2015-06-02)

率为 t 。光从 In 侧入射,对应的玻璃板平面为 1 面;从 Out 侧透射,对应的玻璃板平面为 2 面。

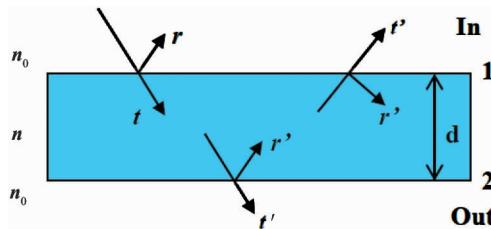


图 1 平面玻璃板模型结构图

光波从上往下到达 1 面以后,部分光反射回到 In 侧,部分透射到折射率为 n 的介质中。如图 1 所示,假设光波从介质 n_0 到玻璃板 n 的振幅反射比和透射比分别为 r 和 t ,反方向的振幅反射比和透射比分别为 r' 和 t' 。对应的光波的反射率和折射率分别为 T 和 R ,二者满足 $R + T = 1$ 。各光束经平板 1 反射或者透过平板 1 后回到 In 侧后相干,形成干涉条纹。回到 In 侧的光,除出射的振幅为 E 的光波直接经 1 面反射回到 In 侧的光束外,其他的光都为 1 面的透射光,且会在 1 面透射两次,并在两平板之间反射 $2(P - 1)$ 次(P 为回到 In 面的光束序列数)。反射回到 In 侧的相邻的光,由于平板厚度引起的相位差为 $\delta = 4\pi nd \cos(\theta_i / \lambda_0)$,其中 θ_i 表示折射角, λ_0 表示对应光波波长。因此,汇聚到 In 面形成干涉的光可以表示为

$$\begin{aligned} E_r &= rE + tr't'e^{-i\delta}E + tr'^3t'e^{-i2\delta}E + \dots \\ &\quad + tr^{(2p-3)}t'e^{-i(p-1)\delta}E + \dots \\ &= [r + (\sum_{n=0}^{\infty} (r'^2e^{-i\delta})^n)r'tt'e^{-i\delta}]E \\ &= \frac{r(1 - e^{-i\delta})}{1 - r^2e^{-i\delta}}E \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中等号右侧的各项表达式分别表示的是回到 In 侧的各个光束。可以看出,随着光在透明平行平面玻璃板之间反射次数的增加,光每在平板之间折返一次,都会引起 δ 的相位延迟,同时会增加两次反射 r'^2 ,故而除第一项外,其他各项是等比例分布的。因此对式(1)进行化简可得,反射干涉光谱的光强可以表示为

$$I_r = E_r E_r^* = \frac{4R \sin^2(\frac{\delta}{2})}{(1 - R)^2 + \sin^2(\frac{\delta}{2})} E E^* \quad (2)$$

其中 E^* 是入射光波电矢量振幅 E 的转秩,对于平板反射率较低 ($R \ll 1$) 的法珀腔而言,式(2)可以近似为

$$\begin{aligned} I_r(\lambda_i) &= 4R \sin^2(\frac{\delta}{2}) E E^* = 2R(1 - \cos(\delta)) I \\ &= 2R(1 - \cos(\frac{4\pi n d}{\lambda_i})) I(\lambda_i) \end{aligned} \quad (3)$$

强度解调法是基于白光干涉光谱强度的变化进行解调,其特点是运算量少、实时动态性能较好,但该方法要求工作点相对稳定。而实际的应用中,工作点受到环境的扰动影响较大,不适合在较为复杂的环境下使用。同时,该方法还存在着动态范围较小的缺点。综上几个因素,强度解调法并未得到广泛的研究。

相位解调法是利用传感器腔长与相位关系进行的信号解调。目前,主要采用白光采用路径匹配干涉仪进行解调^[7]。试验结果表明该方法具有相位噪声低、动态范围大等优点。

最基本的波长解调型光纤法布里-珀罗(F-P)传感系统结构如图 2 所示。光源发出的光经 2×2 耦合器传给 F-P 传感头,外界物理量的变化导致传感头的腔长发生变化,使得返回光信号的干涉光强分布发生变化,返回光再次经过耦合器传递给光谱分析仪测得外界信号的变化。由多光束干涉反射光强分布公式可知一定谱宽光源发出的光,在保持 F-P 腔长不变的前提下,输出光强相对于波长为一近似的正弦曲线。在 F-P 腔长发生变化时,对应的反射输出光强的波长曲线周期也将随之发生改变。从波长分布图上看,传感器输出光谱的波峰在移动,而且波峰间距也在变化。

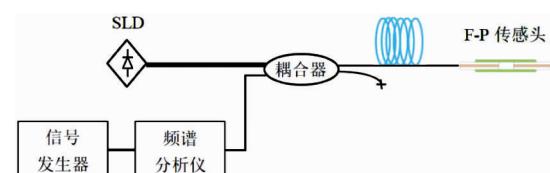


图 2 光纤 F-P 传感系统

2 EFPI 解调的傅里叶变换频移性算法

假设两个反射镜的反射率均为 R , 入射光强为 $I(\lambda)$, 忽略损耗的影响, 该双光束干涉系统等效为低精度的 EFPI 传感器, 其反射光可以用式(3)表示。式(3)中, π 的相位差是由于 1 臂中空气到反射镜的反射所产生的。信号的频率为 $2d/\lambda^2$, 这个非线性的调频信号, 会影响到最终的解调精度。而且随着腔长的增加, 主频的宽度的展宽会导致频率测量产生误差。所以, 有必要改变信号的分布使信号转化为单频信号。由于光频 $v = c/\lambda$, 式(3)可以改写成为

$$I_r = 2R \left(1 - \cos \frac{4\pi dv}{c} \right) I_0(\lambda) \quad (4)$$

式中, 信号的频率为 $2d/c$, 但由于光频 v 是光波长 λ 的倒数, 其分布也不是线性增加的。本文采取对光频进行等间距分布处理后, 再对反射信号进行三次样条插值。同时, 为了消除光源和噪声的影响, 反射减去本底噪声后除以归一化光源能量分布, 使信号更接近理想状态。该信号可以表示为

$$I_r = 2R \left(1 - \cos \frac{4\pi dv}{c} \right) \quad (5)$$

对式(2.2)进行傅里叶变换, 其结果可表示为

$$\begin{aligned} F(j\Omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} I_r e^{-j\Omega v} dv = \int_{-\infty}^{+\infty} 2R \left(1 - \cos \frac{4\pi dv}{c} \right) e^{-j\Omega v} dv \\ &= 2\pi R I_0 \left[2\delta(\Omega) - \delta\left(\Omega + \frac{4\pi L}{c}\right) - \delta\left(\Omega - \frac{4\pi L}{c}\right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中, 中括号内的前两项分别代表零频和负频信号, 只有第三项是所需的信号。根据离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 原理:

$$I(k) = \sum_{n=0}^{N-1} I(n) e^{-j2\pi nm/N} \quad (7)$$

式中 N 表示采样点, k 表示频率的分布, 根据 DFT 的理论, 角频率 $\Omega = 4\pi d/\lambda$, 假设傅里叶变换后的信号 $I(k)$ 的幅度最大处的频点为 k_d , 则数字频率 $\omega_d = 2\pi k_d/N$, 二者之间的关系为 $\Omega = \omega_d \delta v$, 则腔长可以表示为

$$d = \frac{ck_d}{2N\delta v} \quad (8)$$

式中 δv 表示光频分布的间隔, N 表示采样点数。根据现有的光纤光栅解调仪, 其解调精度 $\Delta d \approx 14\mu\text{m}$, 该测量精度远远不能满足实践的要求。本文利用傅里叶变换的频移特性改变反射信号的频移量, 当改变后的信号在 k_d 处达到最大值时认为该频移量正是解调的误差, 此时进行补偿以提高解调的精度。根据傅里叶变换的频移特性, 对原始信号乘以一个指数项以产生频移, 其公式可以表示为

$$I_r(v) \times e^{j\omega_0 v / (\delta v N)} \leftrightarrow X(\omega - \omega_0) \quad (9)$$

其中 $I_r(v)$ 的表达式如式(5)所示, ω_0 表示频移量, 通过改变 ω_0 的值, 并对箭头左边进行傅里叶变换, 当 $\omega = \omega_i$ 时在原频点 k_d 处的幅度最大, 则实际的频率应该为

$$k_{di} = k_d + \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (10)$$

式中 k_{di} 表示实际的最大频点。将式(10)的解调结果带入式(8)中, 就可以实现腔长的解调。

3 仿真与试验数据处理

EFPI 光纤传感器的验证试验系统原理图如图 3 所示。

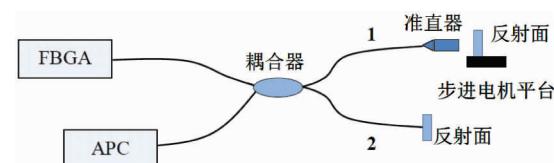


图 3 验证系统结构图

图 3 中 FBGA 表示 BaySpec 公司生产的高速布拉格光栅解调仪 (Fiber Bragg Grating Analyzer, FBGA), 采样率为 5kHz, 波长的采样点为 512 个, 大致分布在 1510nm 到 1590nm 之间, 宽谱光源峰值波长大约为 1540nm, 半高全宽大约为 70nm。试验中宽谱光源从 FBGA 中发出来以后经过 3dB 耦合器, 一束光经过 1 臂, 通过光纤准直器后反射回来, 另外一束光经过 2 臂后直接反射回来。两束光经过耦合器后产生干涉信号, 进入 FBGA 中检测输出。APC 端由于放在匹配液中, 并无光返回。图中, 通过步进电机改变 1 臂中反射镜和准直器之间的空气间隔, 仿

真低精细度 EFPI 传感器的腔长变化。试验探测器接收到的信号如图 4 所示, 其中光谱包络主要由光源包络引起的。光谱底部光强也不平坦, 主要是由干涉仪两臂反射光强度不一致引起的。光谱的密度随着波长的增加而变稀疏, 主要是由光谱的非线性调频展宽引起的。

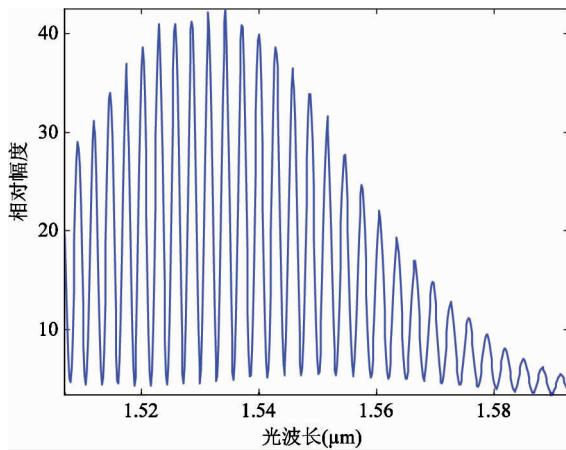


图 4 探测器接收的反射光信号分布

为了仿真与试验条件一致, 角频率的变化量都设置为 $0.01\pi\text{Hz}$ 。根据式(10)的处理方法, 对特定腔长的信号, 经过傅里叶的频移特性处理可以找到实际的频率值。

图 5 给出了简单傅里叶变换的频谱图, 其中方框对应的峰值的频率即是 K_d 。图 6 反映了不同频移下的幅度变化, 其中方框位置处表示最大幅度的点, 通过补偿该频移量, 能够很好地找到实际的频率, 即

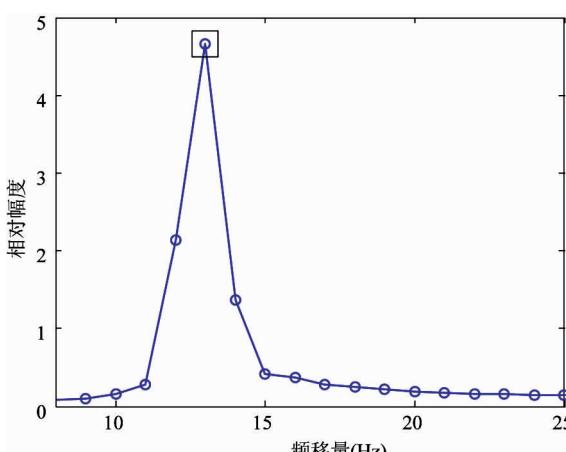


图 5 简单傅里叶变换的频谱图

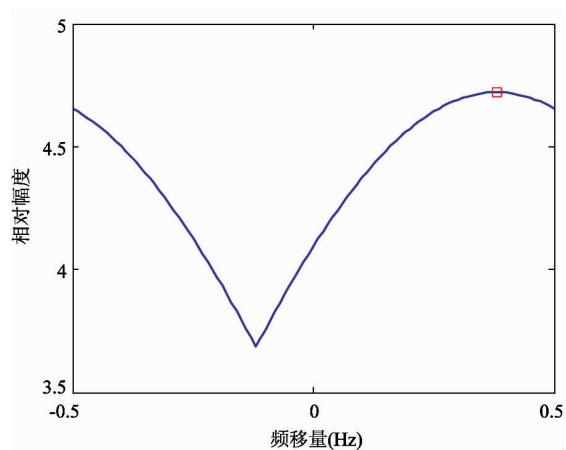


图 6 频率 K_d 处 1Hz 内幅度起伏

实现了频率的细分。而最终的精度在理论上与频移量有关, 采用游标算法不断逼近, 最终可以实现快速而准确的解调。

接收到的波长域的信号转变成光频域的信号后进行插值, 插值后的解调误差如图 7 所示。图 8 给出了直接探测到等间距的光频信号的解调误差。仿真证明了这两种方法的误差量是一致的, 说明使用三次样条插值的合理性。

实际的测试中, 步进电机的理论精度为 $2.5\mu\text{m}$, 可以细分成 256 等份, 也就是最小的变化量大约可以达到 10nm 。由于受到环境的影响, 该等效系统容易受温度及应力的影响而导致腔长产生附加改变量。该实验利用高速光纤光栅解调仪(FBGA)的连续采样的特性, 实现了腔长的动态改变和信号的动态测量, 测量的变化量约为每次 $1\mu\text{m}$ 。实测的数据解调结果如图 9 和图 10 所示。

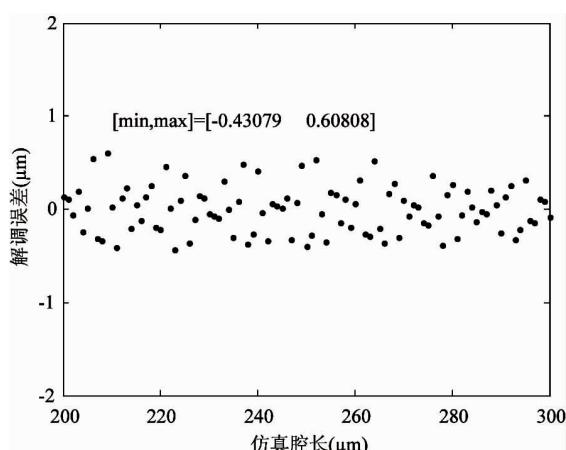


图 7 进行三次样条插值的误差

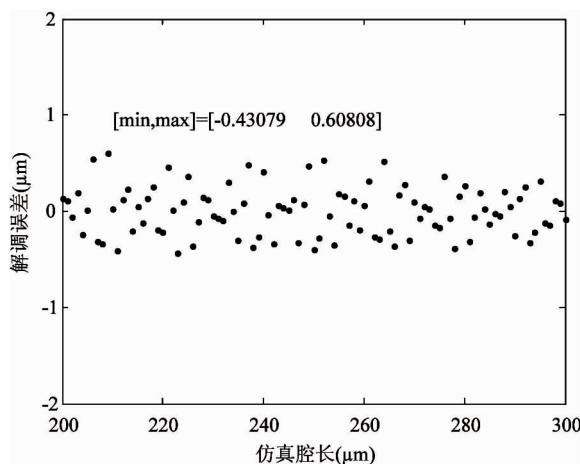


图 8 没有进行三次样条插值的误差

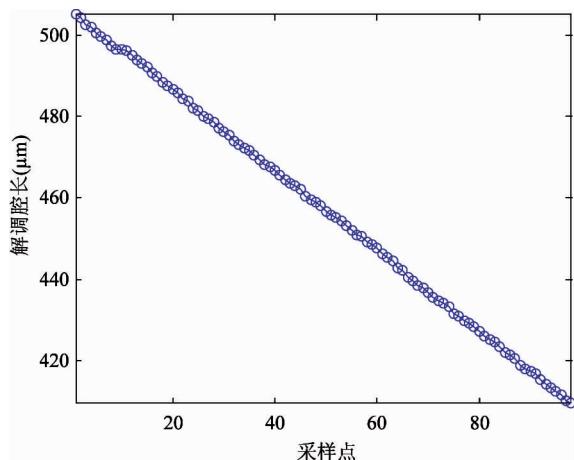


图 9 实测数据腔长解调结果

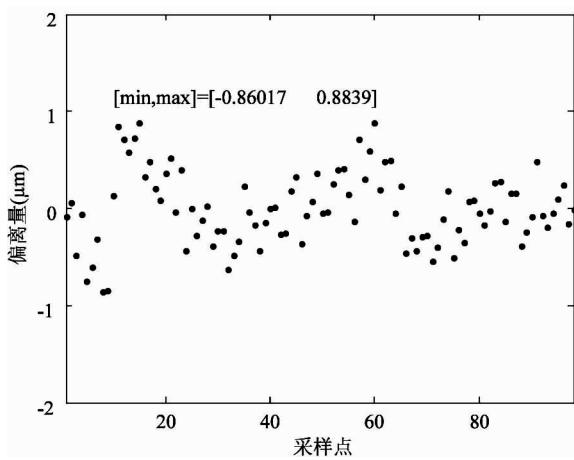


图 10 实测数据腔长解调误差

经分析可知,步进电机的运动抖动在一定程度上会影响到光纤长度的变化,同时,短时间内的温度波动也在一定程度上影响了腔长的解调精度。另

外,由于光源的波动没法完全消除,在一定程度上影响了最终信号的解调精度。试验中分别测试了不同状态下的信号起伏以及解调误差,证明了对光源的处理结果的好坏严重影响了解调的精度。图 11 和图 12 上方的图分别是在消除光源影响以后的反射信号,下方的图是解调的误差。试验证明,对光源处理的好坏直接影响到解调的精度。实际的数据显示,正确地消除光源的影响,能够有效提高腔长的解调精度。

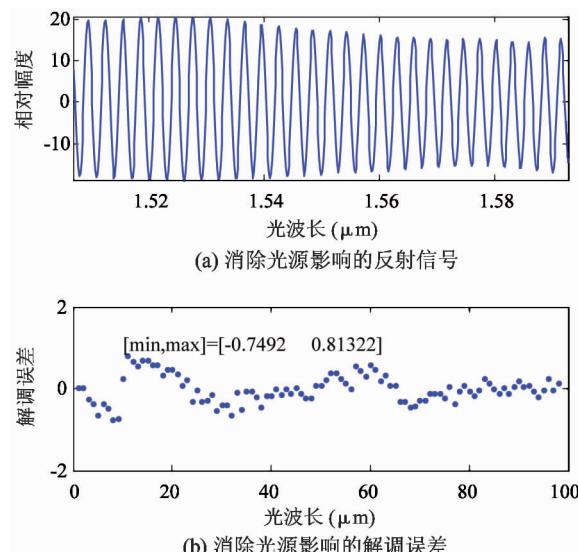


图 11 光源影响消除结果

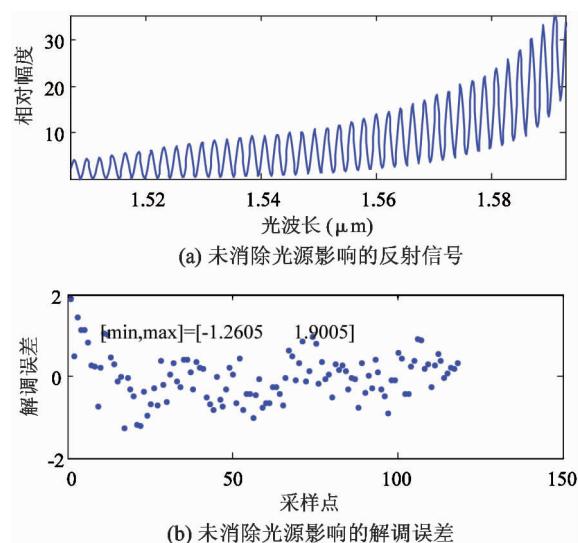


图 12 光源影响未消除结果

4 结 论

本文从白光非本征 F-P 干涉 (EFPI) 光纤传感器的多光束干涉原理出发,采用傅里叶变换的频移特性对信号解调的频谱进行细分,同时分析了从波长域到频率域转化的插值对信号解调误差的影响,最后分析了光源的影响。试验表明,利用傅里叶频移特性对传统的傅里叶变换进行改进,其解调结果有明显的提升,相比传统的快速傅里叶变换的解调精度提高了大约 10 倍,而且解调的精度主要与选择的频率的细分量有关,该方法在光纤 F-P 传感器的腔长解调的应用中具有较好的前景。

参考文献

- [1] Wang, Anbo, et al. Optical fiber sensors for harsh environments. In: Proceedings of the International Conference on Sensors and Control Techniques (ICSC2000). International Society for Optics and Photonics, 2000. 2-6
- [2] Ge Y X, Wang M, Chen X X, et al. A novel Fabry-Perot
- [3] Qi B, Pickrell G R, Xu J C, et al. Novel data processing techniques for dispersive white light interferometer. *Optical engineering*, 2003, 42(11): 3165-3171
- [4] Zhou X L, Yu Q X. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer for subnanometer measurement. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(7): 1602-1606
- [5] Liu T, Fernando G F. A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry-Pérot sensor system for strain and displacement measurements. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(3): 1275-1278
- [6] 江毅, 唐才杰. 光纤 Fabry-Perot 干涉仪原理及应用. 北京: 国防工业出版社, 2009
- [7] Wang F Y, Xie J H, Hu Z L, et al. Interrogation of miniature extrinsic Fabry-Perot sensor using path matched differential interferometer and phase generated carrier scheme. In: Proceedings of the OFS2014 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors, 2014, 915718

Study on the cavity length demodulation of intrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensors

Zhang Zhenrong^{*}, Xia Qi^{**}, Luo Hong^{**}

(^{*}School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004)

(^{**}College of Opto Electronics Science and Engineering, National University
of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract

The sensing principle and the cavity length demodulation of fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric (EFPI) sensors were studied. Considering that the accuracy of demodulating the cavity length of an EFPI optical fiber directly impacts on the stability and measuring accuracy of the sensor system, a new method for cavity-length demodulation based on fast Fourier transform (FFT) was proposed. The method uses the frequency shift property of Fourier transform to effectively eliminate the grating effect of the transform to improve the Fourier transform accuracy. It is proved theoretically and practically that the cavity-length demodulating accuracy of the proposed method using the frequency shift property is at least 10 times higher than that of the traditional method using FFT.

Key words: optical fiber sensor, Fabry-Perot interferometric (EFPI) cavity, demodulation technology, Fourier transform