

基于动态法布里-珀罗腔的光纤光栅温度传感

范刘静¹ 马力² 韩道福² 何水¹

(¹南昌大学理学院物理系, 江西 南昌 330031)
(²南昌大学物理实验中心, 江西 南昌 330031)

摘要 提出一种动态非本征法布里-珀罗(F-P)腔对波长的解调方法。利用压电陶瓷(PZT)构建的动态非本征 F-P 腔调制光纤布拉格光栅(FBG)反射光,理论分析得到调制光强随 F-P 腔的腔长改变呈类余弦变化。经数值模拟,当 PZT 在正弦电压驱动下,F-P 腔调制输出的类余弦信号因 FBG 波长的变化产生了信号曲线的位移,且位移量与 FBG 波长的变化量呈线性关系,此关系可用于 FBG 波长的解调。通过动态 F-P 腔与光纤光栅构建的温度测量实验系统,对不同温度下的液体进行实验测试,在 35 ℃~80 ℃温度变化范围内验证了液体温度变化量与类余弦信号的位移量呈线性关系,其线性拟合度达 99.5%。

关键词 光纤光学;光纤光栅温度传感;动态非本征法布里-珀罗腔;类余弦信号;曲线位移

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1005003

Fiber Bragg Grating Temperature Sensor Based on Dynamic Fabry-Pérot Cavity

Fan Liuqing¹ Ma Li² Han Daofu² He Shui¹

(¹Department of Physics, School of Science, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)
(²Basic Physics Experiment Center, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

Abstract A method of demodulation wavelength with the dynamic extrinsic Fabry-Pérot (F-P) cavity is proposed. The reflected light of fiber Bragg grating (FBG) is modulated by the F-P cavity which is constructed of a piezoelectric ceramics (PZT). By the theoretical analysis, the modulated intensity varies with the length of F-P cavity as cosine-like. When PZT has a vibration driven by a sine voltage, the cosine-like signal moves, and a linear relationship between the signal curve shift and FBG wavelength offset is numerically simulated, which can be applied to FBG wavelength of demodulation. Utilizing a temperature measurement system made up of the F-P cavity and a FBG, the liquid temperature measurement is carried out at different temperatures. Linear relationship between variation of the liquid temperature and the displacement of cosine-like signal is proved when the temperature changes from 35 ℃ to 80 ℃, and the linear fitting degree reaches to 99.5%.

Key words fiber optics; fiber optic temperature sensor; dynamic extrinsic Fabry-Pérot cavity; cosine-like signal; curve displacement

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 120.6780; 130.6010

1 引 言

光纤传感技术是目前人们非常关注的一项测试技术^[1,2],具有易实现小型化,成本低等优点。光纤布拉格光栅(FBG)作为当前光纤无源器件的代表,在传感测量方面占有及其重要的地位^[3]。针对传统

的光谱仪分析存在设备较贵、体积较大、光谱响应较慢等问题,人们采用将信号波长的变化量转换成光强或相位变化量的方法^[4],通过检测光强或相位来解调出波长的信息^[5]。由于 FBG 采用波长编码来反映被测物的变化信息,因此精确解调出 FBG 反射

收稿日期: 2012-05-15; 收到修改稿日期: 2012-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(60808019,61168001)资助课题。

作者简介: 范刘静(1987—),女,硕士研究生,主要从事近代光学测试技术方面的研究。E-mail: xiaosi061@163.com

导师简介: 马力(1957—),男,教授,主要从事近代光学测试技术方面的研究。E-mail: lma@ncu.edu.cn

波长的微小偏移量已成为解调技术的关键。解调方法依据检测器件工作原理主要可以分为:边缘滤波法^[6]、可调谐滤波器法^[7,8]、干涉仪扫描法^[9]和双腔干涉仪扫描法^[10]。然而,这些解调方法没有解决滤波器件与FBG严格匹配的问题,人们又研究出串联实时校正方法^[11]和并联实时校正方法^[12],并且发现选择适合的信号处理算法也有助于减小系统的测量误差,但是这些方法计算复杂且精度没有明显提高,其中常用的寻峰算法有插值法、多项式拟合法、高斯多项式拟合法和高斯非线性曲线拟合法^[13]等。

本文利用压电陶瓷(PZT)搭建动态非本征法布里-珀罗(F-P)腔作为滤波器调制FBG的反射信号,通过建立F-P腔腔长 L 与调制信号强度 I 的对应关系得到类余弦信号。通过寻找此余弦信号的位移量

来解调FBG反射波长,解调波长分辨率达0.01 nm,可以实现光纤光栅反射波长的高精度解调。这种波长解调办法具有系统简单易搭建、设备价格适中、运算方法简洁易实现、抗外界电磁干扰和高精度等优点。

2 动态 F-P 腔的信号调制与解调

图1是动态非本征F-P腔解调波长的系统。光纤端面与贴有硅片的PZT端面构成动态非本征F-P腔,压电陶瓷控制电源驱动PZT做微位移运动,同时驱动电压实时输入示波器的CH1通道;初始光 I_0 被F-P腔调制后变成 I_R 由光电探测器(PD)接收,输入至示波器的CH2通道。

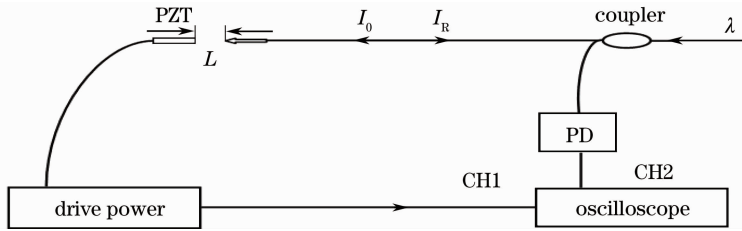


图1 动态非本征 F-P 腔

Fig. 1 Dynamic extrinsic F-P cavity

图1中,PZT由压电陶瓷驱动电源产生的正弦波驱动,使PZT产生伸缩微位移,从而改变由PZT与光纤端面构成的F-P腔的腔长,形成一个动态且腔隙中间为空气介质的F-P腔,因此又称为动态非本征F-P腔。为了提高F-P腔调制信号的反馈强度,在PZT表面贴了薄硅片来提高F-P腔一端端面的反射率。假设光纤端面的反射率为 r_1 ,硅片反射率为 r_2 ,FBG反射信号的光强为 I_0 ,经动态非本征F-P腔调制后的反馈信号输出为 I_R ,表达式如下^[14]:

$$I_R = \frac{I_0 \left[r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) \right]}{1 + (r_1 r_2)^2 - 2r_1 r_2 \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right)}, \quad (1)$$

式中 L 为F-P腔的腔长, λ 为FBG的反射波长。从(1)式可以看出,F-P腔反馈信号的强度受F-P腔腔长 L 和FBG反射波长 λ 两个参量的影响。已知PZT的驱动电压,根据PZT输出位移与驱动电压的关系,可得到F-P腔的实时腔长 L 。因此,F-P腔反馈信号的强度只受FBG反射波长 λ 单一参量的影响。

由于PZT的控制电压设置为正弦波,因此F-P腔的腔长 L 也随控制电压做正弦变化。 L 的计算

公式为

$$L = b - a \sin(2\pi f t), \quad (2)$$

式中 b 为F-P腔的初始腔长, a 为PZT的微位移, f 为PZT驱动正弦波的频率, t 为PZT振动时间。由(2)式可以看出, b, a 会影响F-P腔的腔长变化。

用Matlab软件对(1)式所表示的F-P腔反馈信号进行模拟得到信号形式如图2所示。

图2中 $\lambda = 1535.0 \text{ nm}$, $r_1 = 0.2$, $r_2 = 0.5$, $b = 7.6750 \times 10^5 \text{ nm}$, $a = 4000 \text{ nm}$, $f = 10 \text{ Hz}$, 采样点 $N = 1000$, 采样率 $f_s = 10000$ 时的非本征F-P腔反馈信号形式。可以看出,反馈信号光强 I 随时间变

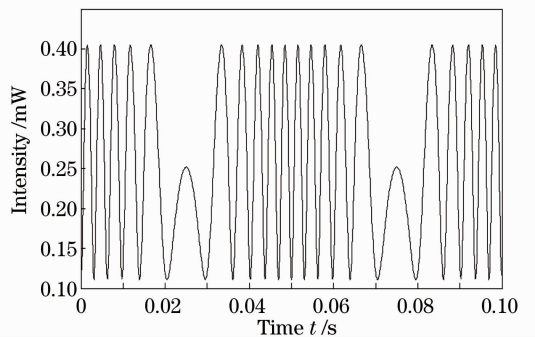


图2 非本征 F-P 腔反馈信号

Fig. 2 Feedback signal of the extrinsic F-P cavity

化在 PZT 伸缩处有换向,且此时信号为一个周期的样式。

图 3 是通过建立非本征 F-P 腔的反馈信号强度 I 与腔长 L 的对应关系得到的曲线。可以看出,信号强度 I 随腔长 L 变化呈类余弦关系,极值点(A、B)出现在腔长 L 等于 $\lambda/4$ 的整数倍位置处。

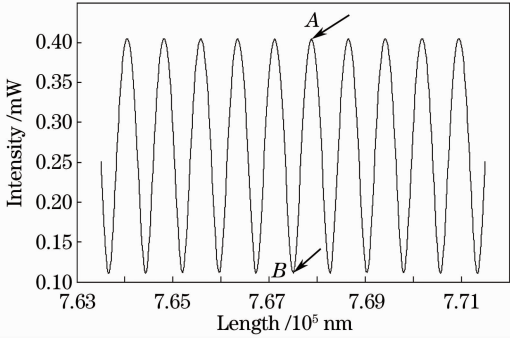


图 3 类余弦信号

Fig. 3 Cosine-like signal

图 4 为波长从 $\lambda=1535.0\sim 1535.4$ nm 每变化 0.1 nm 时,得到的类余弦信号的位移图。

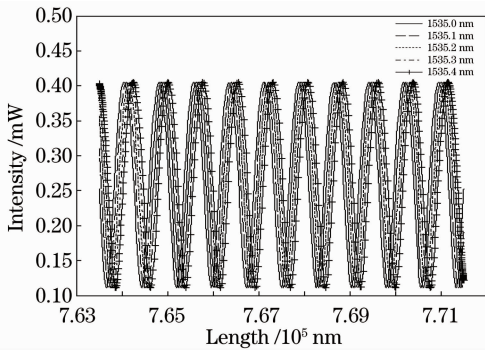


图 4 波长从 $\lambda=1535.0\sim 1535.4$ nm 的类余弦信号位移图

Fig. 4 Migration of the cosine-like signal when λ changes from 1535.0 nm to 1535.4 nm

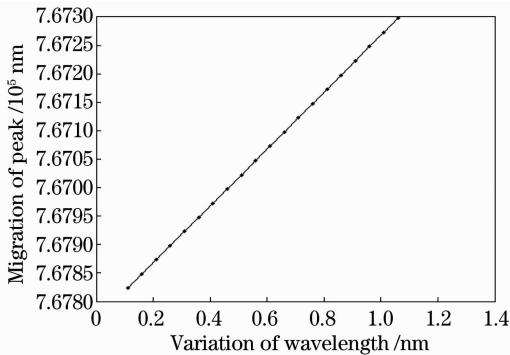


图 5 峰移量与波长变化量之间的线性关系

Fig. 5 Linear relationship between migration of peak and variation of wavelength

由图 4 可以看出,波长变化会导致类余弦信号曲线的整体位移,所以只要找到位移量的变化关系即可解调出 FBG 的反射波长。

模拟显示,位移量与波长变化呈线性关系。图 5 是通过类余弦信号曲线的峰值位移得出的曲线图。

图 5 中数值模拟所用参数与图 2 所用参数一致。可以看出,波长变化范围为 $0.11\sim 1.06$ nm,以 0.05 nm 为步长均匀变化,与之对应的峰移量则在 $7.6682\times 10^5\sim 7.6730\times 10^5$ nm 范围为均匀变化。

3 基于动态 F-P 腔的 FBG 温度测量实验

3.1 温度与波长的关系

由耦合模理论^[15]可知,当宽带光在光纤光栅中传输时,将产生模式耦合,只有满足布拉格条件的光被反射:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (3)$$

式中 λ_B 为布拉格中心反射波长, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光纤光栅栅距。

当光纤光栅所处的温度发生变化 ΔT ,符合布拉格条件的反射波长则发生位移 $\Delta\lambda_B$:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_f + \xi_f)\Delta T, \quad (4)$$

式中 α_f 为光纤光栅的线性热膨胀系数, ξ_f 为光纤光栅的热光系数。

以上两个参数均与制作光纤光栅的材料有关,由此看出,用光纤布拉格光栅构成的温度实验系统中波长变化量与温度变化量之间呈线性关系。

3.2 温度测量实验

图 6 为基于 F-P 腔的 FBG 温度传感测量系统。该实验系统由宽带光源、三端口环行器、FBG、耦合器、压电陶瓷控制电源、PZT、光电探测器、示波器构成。

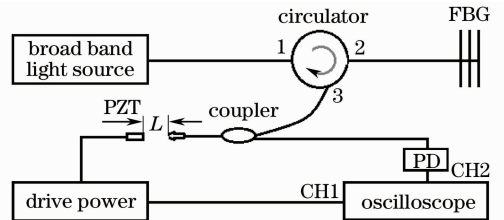


图 6 基于 F-P 腔的 FBG 温度测量系统
Fig. 6 FBG temperature measuring system based on F-P cavity

从图 6 可以看出,宽带光首先进入环行器 1 端口,由 2 端口输出后进入 FBG,满足布拉格波长条

件的光被反射且经过环形器的3端口传输至耦合器内。F-P腔用来调制FBG的反射光信号,耦合器另外一端把调制后的信号输入到光电探测器中并连接到示波器的CH2通道;同时,PZT的控制电压输入到示波器的CH1通道。这样,CH2通道就由PD探测到F-P腔反馈光信号转换成的电信号,CH1通道则探测到PZT的实时驱动电压信号,两通道的信号可以构造出类余弦信号。

实验选用输出波长为1527~1605 nm的宽带光源及埋入式光纤光栅(FBG T21212,测温度范围为0℃~100℃)进行测温实验。实验时的环境温度为25℃,且当水温为35℃时,布拉格光栅反射波长为1535.5 nm。将光纤光栅放入恒温水浴箱中,将温度“设置-测量”选择开关拨向“设置”处,调节温控旋钮,设定起始温度为35℃,然后将温度“设置-测量”选择开关拨向“测量”处,数字显示工作水箱内水的实际温度。利用示波器CH2通道测量F-P腔调制信号,CH1通道测量PZT的实时控制电压。

图7为CH2通道在水温35℃时测量结果,同时图8为CH1通道测得的实时PZT控制电压。

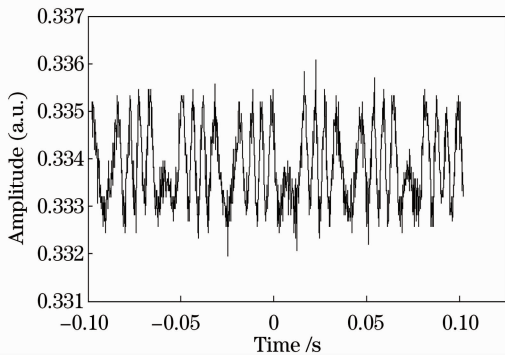


图7 实验测得 F-P 腔反馈信号

Fig. 7 Feedback signal of the F-P cavity in experiment

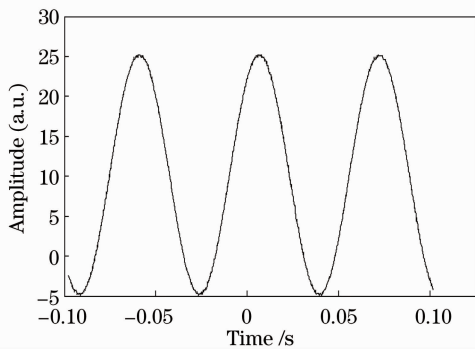


图8 实验测得 PZT 控制电压

Fig. 8 Control voltage of PZT in experiment

图7显示测量的信号与模拟信号图2所示相类似,具体数值有差别是因为实际实验过程中的参数

设置不同,实验中 PZT 控制电压:30 V,频率 f : 15 Hz,示波器采样点 N :1000,采样率 f_s :50000, F-P腔初始腔长 b :0.5 mm,以及模拟信号的纵坐标为信号强度,而示波器测量的信号纵坐标为振幅。图8显示 PZT 的实时控制电压,根据 PZT 控制电压与位移的线性关系,计算得到 PZT 的实际伸长量,由 F-P 原始腔长减去 PZT 的伸长量得到 F-P 腔的实时腔长 L 。这样双通道的实时测量保证下一步的实验数据处理更准确可靠。

设置恒温水浴箱的水温变化从 35℃~80℃,每隔 5℃从示波器记录一次数据,共记录 10 组。由图7可以看出,实验信号中存在噪声影响,因此后续要用 Matlab 软件设计的数字滤波器消噪。PZT 有一定的蠕滞性,因此实际处理中只能选择 PZT 的上升沿电压或者下降沿电压计算其实际位移。按理论分析时所提出的解调办法解调实验信号(一个信号数据的处理时间大约需 8 s),得到的类余弦信号的位移量与温度变化关系如图9所示。其线性拟合度达 0.995,拟合曲线公式为: $y=0.0906x-3.17$ 。

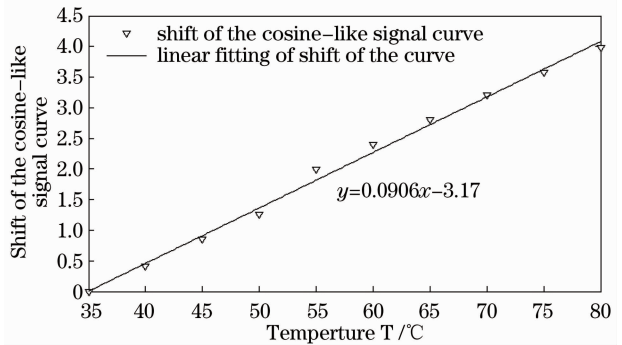


图9 实验信号处理结果

Fig. 9 Processing results of experimental signal

4 结 论

本文提出的非本征动态 F-P 腔可以较高精度地调制解调波长,设计的 F-P 腔可调滤波器的 FBG 温度传感系统可以进行温度的实时测量。利用以腔长变化为 x 坐标,调制信号为 y 坐标的重构信号分析方法,得到了温度变化量与重构信号峰移量的线性关系,与理论模拟相吻合。在 35℃~80℃ 的温度变化范围内测量相对误差为 2.5%。研究结果表明,用提出的新的信号解调方法可以实现温度的快速传感测量,系统构成简单且测量误差较小、处理方法简洁。

参 考 文 献

1 D. F. Han, M. Wang, J. P. Zhou. Self-mixing speckle

- interference in DFB lasers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3321~3317
- 2 Chen Shijia, Han Daofu, Ma Li. Autocorrelation-based velocity measurement of self-mixing speckle in fiber ring laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(3): 030601
陈世佳, 韩道福, 马力. 环形光纤激光器自混合散斑自相关测速的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(3): 030601
- 3 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
- 4 Zhang Guiju, Yu Qingxu, Song Shide. Fiber optic temperature sensor based on F-P cavity interferometric/intensity modulation mechanism[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2): 228~231
张桂菊, 于清旭, 宋世德. 基于 F-P 腔的干涉/强度调制型光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 228~231
- 5 Zhou Qian, Ning Tigang. Research in demodulation methods of FBG sensor [J]. *Optical Communication Technology*, 2010, **34**(8): 8~11
周倩, 宁提纲. 光纤光栅传感器信号解调方法的研究[J]. *通信技术*, 2010, **34**(8): 8~11
- 6 S. M. Melle, K. Liu, R. M. Measures. A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(5): 516~518
- 7 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morsey. Multiplexed fiber Bragg grating strain sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1370~1372
- 8 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morsey. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *IEEE Electron. Lett.*, 1992, **28**(3): 236~238
- 9 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morsey. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1): 72~74
- 10 Liu Jianxia, Feng Jingong. Demodulation for fiber optic grating sensing signals[J]. *Optical Fiber & Electric Cable*, 2009, **2**(6): 4~6
刘建霞, 冯进攻. 光纤光栅传感信号解调方法的研究[J]. *光纤与光缆及其应用技术*, 2009, **2**(6): 4~6
- 11 Li Ying, Zhang Shulian. A novel fiber Bragg grating sensor interrogation system utilizing a tunable Fabry-Perot filter[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3): 237~240
李营, 张书练. 基于可调谐 F-P 滤波器的光纤光栅解调系统[J]. *激光技术*, 2005, **29**(3): 237~240
- 12 Yu Xiaoyu. Research on FBG Demodulation Technology Based on a Tunable Fabry-Perot Interferometer [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technogy, 2008
于效宇. 基于可调谐法布里-珀罗滤波器的光纤光栅解调技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008
- 13 Shang Qiufeng, Lin Binghua. The comparison and analysis of typical peak-detection algorithms in fiber Bragg grating sensor system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2010, **47**(2): 1~4
尚秋峰, 林炳花. 光纤 Bragg 光栅传感系统典型寻峰算法的比较分析[J]. *电测与仪表*, 2010, **47**(2): 1~4
- 14 You Xupeng. Research on Fiber Bragg Grating Sensing Network Testing System of F-P Demodulation Based on ARM [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technogy, 2007. 7~21
尤旭鹏. 基于 ARM 的光纤光栅传感网络 F-P 解调器的测试系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007. 7~21
- 15 Qian Jingren. Coupled-mode theory and its application to fiber optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1188~1192
钱景仁. 耦合模理论及其在光纤光学中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1188~1192

栏目编辑: 王晓琰