

文章编号: 1001-3806(2005)03-0237-04

基于可调谐 F-P 滤波器的光纤光栅解调系统

李 营, 张书练*

(清华大学 精密仪器测试技术与仪器 国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了进一步提高光纤光栅解调系统的性能, 提出和研究了一种新颖的基于可调谐 F-P (Fabry-Perot) 滤波器的光纤光栅解调技术, 并以此为基础构建了探测系统。系统使用一个固定波长的参考光纤光栅作为波长参考元件, 通过对传感光纤光栅与参考光纤光栅的波长测量与差值运算, 消除了可调谐 F-P 滤波器腔长漂移对测量精度的影响。给出压电陶瓷电压对应的伸长量, 有效地减小了压电陶瓷非线性对测量的影响, 提高了光纤光栅波长的测量精度。在测量范围内, 最大非线性偏差为 0.5%。

关键词: 光纤光栅; 非线性; 二次函数; 可调谐 F-P 滤波器

中图分类号: TN253 文献标识码: A

A novel fiber Bragg grating sensor interrogation system utilizing a tunable Fabry-Perot filter

LI Ying, ZHANG Shu-lian

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract To improve the performance of FBG interrogation system, a novel fiber Bragg grating sensor interrogation system based on a tunable fiber Fabry-Perot (FFP) filter was demonstrated. Firstly, a reference fiber Bragg grating (FBG) was used as a wavelength reference element. By measuring the wavelength difference between reference FBG and sensor FBG, the drift of tunable FFP filter's cavity length was compensated. Secondly, a quadratic fit function was made with software based on experiment results. This function showed a good fit to the relationship between the displacement of PZT and control voltage. It was used to calculate the wavelength of the sensing FBG. In experiment, a strain of 0~1800 $\mu\epsilon$ was applied to the sensing FBG and the maximum nonlinearity deviation of measured wavelength was 0.5%. Experiment results show that the measured error caused by the drift of FFP filter's cavity length and PZT's nonlinearity is greatly reduced and a higher accuracy is obtained.

Key words fiber Bragg grating; nonlinearity; quadratic fit function; tunable fiber Fabry-Perot filter

引 言

近年来, 光纤光栅波长解调方法的研究一直是光纤光栅传感领域研究的热点。由于光纤光栅波长解调仪器的性能表现很大程度上决定了测量系统的测量范围、测量分辨率以及测量速度等参数, 所以它成为光纤光栅传感应用中的关键技术。

目前, 国内外已经报道了多种光纤光栅波长测量方法, 其中包括可调谐 F-P (Fabry-Perot) 滤波器法^[1]、Mach-Zehnder 干涉仪法^[2,3]、可调谐波长激光器法^[4]以及光纤光栅匹配法^[5]等等。对测量范围、精度、复用点数要求较高的一些场合, 如大型建筑物的多点应变监测 (几十到几百个测量点), 可以采用可调谐激光器法, 但是它的缺点是成本较高, 一台可调谐波长激光

器的市场价大约为几十万元人民币。对于动态测量的场合, 如振动测量, 可以选用 Mach-Zehnder 干涉仪法, 它的缺点是测量静态值时稳定性较差。对于要求较低的测量场合, 如对一个或几个光纤光栅的波长变化进行测量, 则可以选用光纤光栅匹配法, 这种方法成本较低, 但是测量范围小 (典型值为几个纳米)。

可调谐 F-P 滤波器法的波长扫描范围典型值为几十纳米, 波长分辨率可达到皮米量级^[1], 测量仪器成本适中 (典型价格为几万元)。它的这些特点可以满足一大部分工程应用的要求, 因此, 可调谐 F-P 滤波器法在国内外得到了广泛的应用, 它也是目前应用得较为成熟的一种方法。

1 工作原理

图 1 为典型的可调谐 F-P 滤波器法测量系统示意图, 由宽带光源发出的光经过耦合器后进入光纤光栅, 满足特定波长条件的将分别被光纤光栅 FBG1, FBG2 ..., FBG_N 反射并沿原路返回, 经过耦合器后进

作者简介: 李 营 (1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电应用技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: zstfdp@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2004-05-08 收到修改稿日期: 2004-11-15

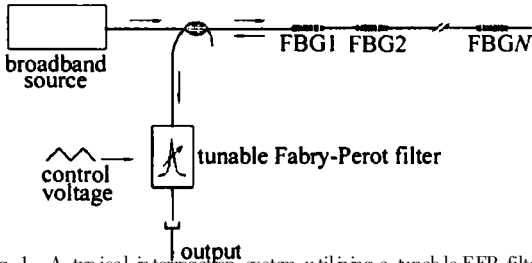


Fig 1 A typical interrogation system utilizing a tunable FFP filter

入可调谐 F-P 滤波器, 由于可调谐滤波器对通过光波长具有选择作用, 因此, 光电探测器将探测到与各个波长相对应的多个透过峰。可调谐 F-P 滤波器的典型结构如图 2 所示, 通过改变加在驱动元件 (多为压电陶瓷 PZT) 上的驱动电压, 可以对可调谐 F-P 滤波器的腔长 (对应为透过波长) 进行扫描, 通过分析各个透过峰与压电陶瓷驱动电压的对应关系, 就可以测得各个光纤光栅的波长。

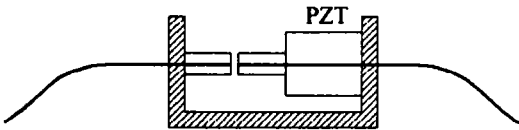


Fig 2 Structure of a tunable FFP filter

利用可调谐 F-P 滤波器测量光纤光栅波长时, 在其主要性能参数 (自由光谱区、透过率、细度) 固定不变的情况下, 测量精度主要受以下两方面因素影响:

(1) 可调谐 F-P 滤波器的腔长漂移。当温度发生变化时, 可调谐 F-P 滤波器的腔长将会发生漂移 (漂移量的大小与材料有关), 这将会使光纤光栅波长的测量结果产生误差。目前主要有两种解决方案: 一是通过特殊的结构设计和材料选择来实现腔长的自补偿^[6], 即在温度发生变化时, 腔长基本保持稳定。二是采用参考波长元件^[7], 通过测量光纤光栅的波长和参考波长差值的方法消除腔长漂移的影响。(2) 驱动元件非线性性的影响。由于驱动元件 (如压电陶瓷) 的伸长量-电压曲线具有非线性 (如 PI 公司的压电陶瓷非线性典型值为 10% ~ 15%, 位移重复性 1%), 使得可调谐 F-P 滤波器腔长的定位精度不高, 从而导致光纤光栅波长测量误差较大。目前主要的解决办法是采用位移传感器对压电陶瓷的伸长量进行测量^[8], 当位移传感器精度较高时, 可以大大消除驱动元件伸长量-电压曲线非线性的影响, 提高测量精度。但是随着高精度位移传感器的加入, 整个测量系统的成本增加, 同时也使得可调谐 F-P 滤波器的结构变得复杂。为此, 在一部分应用中, 直接采用电压代表驱动元件的伸长量^[11], 即默认伸长量与驱动电压成线性关系。这种方法结构简单, 成本较低, 但是测量精度不高。

为了实现在测量系统较低成本的前提下尽量提高光纤光栅波长的测量精度, 设计了图 3 所示的测量系

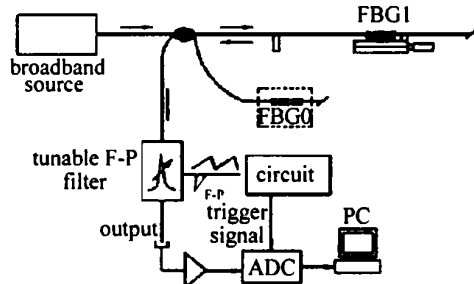


Fig 3 Experimental FBG sensor interrogation system

统。将一个光纤光栅 FBG0 置于恒温环境中, 保持其波长稳定, 用作波长参考。另外一个光纤光栅 FBG1 的一端固定于一维工作台, 另一端固定于一个固定支架上, 通过拉伸工作台对光纤光栅施加一定的应变, 使用千分尺测量一维工作台的实际位移量。波形发生电路产生锯齿波, 驱动可调谐 F-P 滤波器的压电陶瓷, 进行腔长扫描。光电探测器探测到的光信号经放大后由数据采集卡输入计算机, 计算机通过 LABVIEW 对采集到的信号进行处理, 计算得出参考光纤光栅的波长值。该系统采用 LED 作为宽带光源, 选用 12 位数据采集转换卡, 不需要额外的位移传感器, 整个系统的成本较低。

对一个光纤光栅的波长进行测量时, 压电陶瓷的驱动波形及光电探测器探测到的信号如图 4 所示。当

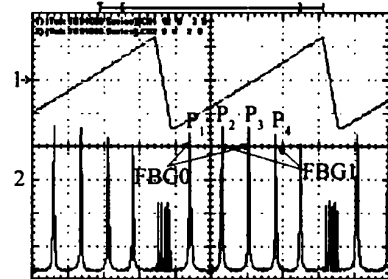


Fig 4 Received signal with a single FBG sensor used in the system 1—the control voltage applied to PZT 2—the signal detected by a photodetector

可调谐 F-P 滤波器进行腔长扫描时, 探测器将依次探测到参考光纤光栅 FBG0 与测量光纤光栅 FBG1 的反射光经过可调谐 F-P 滤波器后的透过峰。在近似认为压电陶瓷的伸长量与驱动电压成线性关系时, 图 4 中 P₁, P₂, P₃, P₄ 各个透过峰对应的可调谐 F-P 滤波器腔长分别如下:

$$\begin{cases} n\lambda_0/2 = kU_1 + L \\ (n-1)\lambda/2 = kU_2 + L \\ (n-1)\lambda_0/2 = kU_3 + L \\ (n-2)\lambda/2 = kU_4 + L \end{cases} \quad (1)$$

式中, λ_0 和 λ 分别为参考光纤光栅和测量光纤光栅的波长, U_1, U_2, U_3, U_4 分别为各个透过峰的峰值点对应的驱动电压, n 为透过峰的级次 (由初始腔长决定), k 为压电陶瓷的位移电压系数, L 为初始腔长。方程组

中第 2 个与第 3 个方程相减可得:

$$\lambda = \frac{2k(U_2 - U_3)}{n - 1} + \lambda_0 \quad (2)$$

可以看出, (2) 式不包含初始腔长 L , 即测量光纤光栅的波长与可调谐 F-P 滤波器的初始腔长无关, 腔长漂移对最后的测量值不会产生影响。这就是采用参考光纤光栅方法的最大优点。

在以上的方法中, 用压电陶瓷的驱动电压代表其伸长量, 即默认压电陶瓷的位移与驱动电压成线性关系。但是如前文所述, 压电陶瓷具有 10% ~ 15% 的非线性, 这种方法是牺牲测量精度为代价的。为了在不增加成本的前提下尽量提高测量精度, 可以根据各个透过峰之间的位置关系拟合出一高阶函数, 并用此函数代表压电陶瓷的伸长量与驱动电压的关系。实验中采用二次函数 $y = ax^2 + bx + c$ 来代表压电陶瓷的伸长量与驱动电压关系。图 4 中 P_1, P_2, P_3, P_4 各个透过峰对应的可调谐 F-P 滤波器腔长可表示为:

$$\begin{cases} n\lambda_0/2 = aU_1^2 + bU_1 + c \\ (n-1)\lambda/2 = aU_2^2 + bU_2 + c \\ (n-1)\lambda_0/2 = aU_3^2 + bU_3 + c \\ (n-2)\lambda/2 = aU_4^2 + bU_4 + c \end{cases} \quad (3)$$

由于驱动电压为锯齿波, 电压与时间成正比, 因此可以用时间 t 来替代 (3) 式中的驱动电压 U , 可以得到 (4) 式:

$$\begin{cases} n\lambda_0/2 = at_1^2 + bt_1 + c \\ (n-1)\lambda/2 = at_2^2 + bt_2 + c \\ (n-1)\lambda_0/2 = at_3^2 + bt_3 + c \\ (n-2)\lambda/2 = at_4^2 + bt_4 + c \end{cases} \quad (4)$$

此方程中的 n, λ_0 为已知参数, t_1, t_2, t_3, t_4 4 个参数可以在每次扫描后测量得到, a, b, c, λ 为未知参数。通过解此四维方程组, 可以求出测量光纤光栅的波长值 λ 。

图 5 为对 3 个光纤光栅进行测量时的压电陶瓷的驱动信号与光电探测器探测到的信号。当对多个光纤光栅的波长进行同时测量时, 也可用上述类似方法列出下面所示的 $2k + 2$ 维方程组。

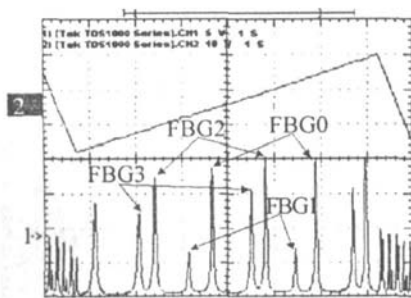


Fig 5 Received signal with three FBG sensors used in the system 1—the control voltage applied to PZT 2—the signal detected by a photodetector

$$\begin{cases} n\lambda_k/2 = at_1^2 + bt_1 + c \\ \dots \\ n\lambda_0/2 = at_{k+1}^2 + bt_{k+1} + c \\ (n-1)\lambda_k/2 = at_{k+2}^2 + bt_{k+2} + c \\ \dots \\ (n-1)\lambda_0/2 = at_{2k+2}^2 + bt_{2k+2} + c \end{cases} \quad (5)$$

此方程组中共有 $2k + 2$ 个方程, 其中含有 $k + 3$ 个未知参数。当测量光纤光栅数 $k > 1$ 时, 方程组中的方程数大于未知参数, 可以通过数学拟合的方法求出函数 $y = ax^2 + bx + c$ 及各个光纤光栅的波长 $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_k$ 。当测量光纤光栅足够多时, 可以采用高阶函数 $y = a_k x^k + a_{k-1} x^{k-1} + \dots + a_0$ 来拟合压电陶瓷的伸长量-电压曲线, 使得拟合函数更接近于其真实曲线, 从而得到更高的测量精度。

2 实验结果及讨论

实验中, 环境温度为 19.8°C, 可调谐 F-P 滤波器的初始腔长 $L \approx 38\mu\text{m}$, 透过峰的级次 $n = 51$, 自由光谱区 FSR 约为 30nm, 半峰值透过带宽 FWHM 约为 1nm, 参考光纤光栅的波长值 λ_0 为 1525.208nm。压电陶瓷的驱动电压为 0~28V, 0.1Hz 的锯齿波。数据采集卡为 12 位, 最高采样频率为 100kHz。利用 LABVIEW 处理软件对采集到的信号进行处理, 并计算出传感光纤光栅波长值。实验中计算机的处理器为 Intel Celeron 900MHz 内存为 384M。

探测器探测到的波形如图 4 所示。分别用 (2) 式和 (4) 式的方法对测量光纤光栅的波长进行计算, 得到的测量结果如下。

实验中, 一维工作台移动了 500 μm , 相当于在传感光纤光栅上加了 0~1800 μe 的应变, 传感光纤光栅波长移动了约 2nm, 其应变灵敏度约 1.1 $\mu\text{m}/\mu\text{e}$ 。当近似认为压电陶瓷的伸长量与其驱动电压成线性关系时, 实验数据的线性相关系数 $R = 0.99933$, 标准方差 $SD = 0.02261\text{nm}$, 测量范围内最大非线性偏差为 2.3%, 如图 6 所示。当采用二次函数 $y = ax^2 + bx + c$ 来拟合压电陶瓷的伸长量-电压曲线时, 实验数据的线性相关系数 $R = 0.99997$, $SD = 0.00501\text{nm}$, 测量范围内最大非线性偏差为 0.5%, 如图 7 所示。对比可以看出, 采用二次函数拟合压电陶瓷的伸长量-电压曲线后, 测量结果的线性得到了较大的提高, 大大消除了压电陶瓷非线性对测量结果的影响。

该测量系统的实时采样能力主要由 AD 数据采集卡的采样率和实验计算机的性能决定。在压电陶瓷驱动电压上升时, 需要采集到足够的的数据。在压电陶瓷驱动电压下降时, LABVIEW 需要完成对数据的处理工

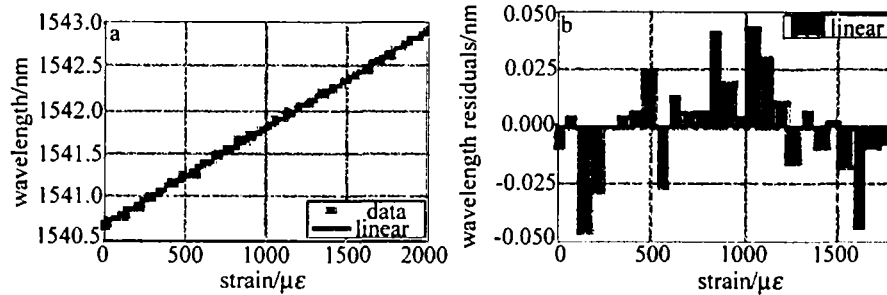


Fig 6 A linear function is used to fit the relationship of the displacement of PZT and control voltage $R = 0.99933$, $SD = 0.02261$ nm a—measured wavelength of FBG1 as a function of the strain applied to it b—wavelength residuals as a function of strain applied to FBG1

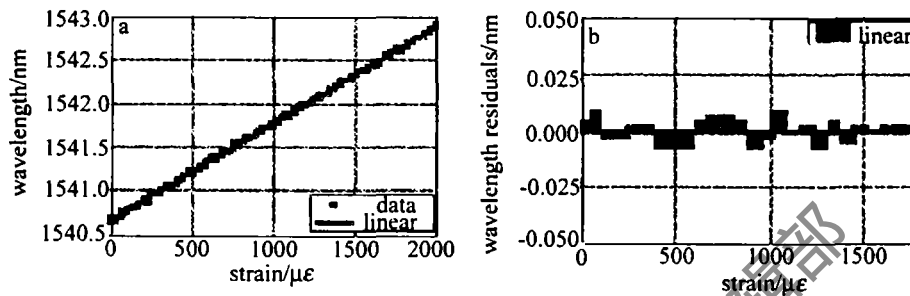


Fig 7 A quadratic fit function is used to fit the relationship of the displacement of PZT and control voltage $R = 0.99997$, $SD = 0.00501$ nm a—measured wavelength of FBG1 as a function of the strain applied to it b—wavelength residuals as a function of strain applied to FBG1

作, 计算出传感光纤光栅的波长值。在实验中, 该系统最高可实现 1Hz 的测量频率。通过采用高速 AD 数据采集卡和提高计算机性能的方法, 可以提高测量频率。

3 结论

提出和研究了一种新颖的基于可调谐 F-P 滤波器的光纤光栅解调技术, 并构建了探测系统。采用拟合得到的二次函数 $y = ax^2 + bx + c$ 代表压电陶瓷的伸长量与驱动电压的关系, 通过解方程组计算得出测量光纤光栅的波长值。实验结果证明, 这种方法能够较好地克服压电陶瓷位移非线性 (10%~15%) 带来的测量误差, 在 0~1800με 测量区间内, 标准偏差为 5.01pm, 相当于 4.56με, 最大非线性偏差为 0.5%。同时, 这种方法同样适用于采用压电陶瓷为驱动元件的其它可调谐 F-P 滤波器, 提高其测量精度。

参考文献

[1] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength

filter [J]. Opt Lett 1993, 18(16): 1370~1372

- [2] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. Fiber optic Bragg grating sensor with drift-compensated high resolution interferometric wavelength shift detection [J]. Opt Lett 1993, 18(1): 72~74.
- [3] TODD M D, JOHNSON G A, ALIHOUSE B L A novel Bragg grating sensor in interrogation system utilizing a scanning filter, a Mach-Zehnder interferometer and a 3×3 coupler [J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(7): 771~777
- [4] RYU C Y, HONG C S Development of fiber Bragg grating sensor system using wavelength swept fiber laser [J]. Smart Materials and Structures 2002 11(3): 468~473
- [5] DAVIS M A, KERSEY A D Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg grating arrays [J]. Electron Lett 1995, 31(10): 822~823
- [6] HUANG Y L, LI J, KANG Y *et al*. Temperature compensation package for fiber Bragg gratings [J]. Microwave and Optical Technology Letters 2003 39(1): 70~72
- [7] SONG M H, LEE S B, CHO I S *et al*. Simultaneous measurement of temperature and strain using two fiber Bragg gratings embedded in a glass tube [J]. Opt Fiber Technol 1997, 3(2): 194~196
- [8] NING Y N, MELDRUM A, SHIH W J *et al*. Bragg grating sensing instrument using a tunable Fabry-Perot filter to detect wavelength variations [J]. Measurement Science and Technology 1998 9(4): 599~606