

光纤 MEMS 法布里-珀罗压力传感器的准分布式测量

倪小琦, 王 鸣, 陈绪兴, 戴霞娟

(南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 提出了一种基于傅立叶解调法的空分复用系统, 实现了光纤微机电系统 (Micro Electro Mechanical System, MEMS) 法-珀 (FP) 压力传感器的准分布式测量. 传感器基于 FP 腔干涉的原理, 采用 MEMS 技术加工制作, 用傅立叶方法解调干涉信号, 用光开关实现传感器复用. 理论分析与实验验证了传感器解调和复用的基本原理. 结果表明, 该系统具有好的线性、灵敏度、精度和重复性, 响应速度快, 复用的传感器间无明显串扰, 系统复用能力取决于光开关的通道数.

[关键词] 导波与光纤光学, FP 压力传感器, 傅立叶解调法, 准分布式测量

[中图分类号] TN 253 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009)04-0082-05

Quasi-Distributed Measurement of Optical Fiber MEMS Fabry-Perot Pressure Sensors

Ni Xiaoqi, Wang Ming, Chen Xuxing, Dai Xiajuan

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract A multiplexing scheme based on Fourier demodulation method is presented in this paper which makes quasi-distributed measurement of optical fiber MEMS Fabry-Perot (FP) pressure sensors possible. Based on FP interference, the sensors are fabricated by employing the microelectromechanical system (MEMS) techniques and interrogated with Fourier demodulation method. An optical switch is used to multiplex the sensors. The demodulation and multiplexing principle are theoretically analyzed and experimentally verified. The experimental results demonstrate that the system has reasonable linearity, sensitivity, precision, repetition and fast response. There is no observable crosstalk among the multiplexing sensors and the system's capacity depends on channels of the optical switch.

Key words guided wave and fiber optics, FP pressure sensor, Fourier demodulation method, quasi-distributed measurement

光纤 MEMS 压力传感器由于其具有的微型、响应频带宽、高灵敏度、可批量生产、免除电磁干扰、适用于恶劣环境等特点而成为光纤传感领域中的热点^[1,2]. 工业生产中常需要用多个光学传感器测量温度、应力和压力等物理量, 这就使得多路复用成为光学传感器的一个重要问题. 复用使得单个传感器的成本大幅度降低, 提高了光学传感器对传统的电子传感器的竞争力. 由于光纤布拉格光栅 (FBG) 具有反射率高, 反射特定波长的光, 而其余波长的光都被透射的特点, 所以对复用系统的研究主要集中在 FBG 上^[3,4]. 光纤 FP 传感器受其原理限制, 复用技术十分困难. 尽管已有一些相关技术用于 FP 传感器的复用解调, 例如, 傅立叶变换复用解调法^[5]、波分频分复用方法^[6]等. 但这些方法的复用能力和应用条件有一定的限制.

本文提出了基于傅立叶解调法的空分复用方法, 利用光开关实现系统的复用, 解决了光纤 FP 传感器复用困难的问题, 实现了压力的准分布式测量. 和其他频分波分复用系统相比, 该系统优点是传感器的反射信号包含光源的全光谱, 因此解调结果具有更高的精度. 系统复用能力取决于光开关的通道数. 光开关开关速度快, 重复性好, 插入损耗低的特性保证了解调的速度和精度. 系统所用器件均为光器件, 避免了电

收稿日期: 2009-06-30

基金项目: 江苏省科技支撑计划 (工业部分) (BE2008138) 资助项目.

通讯联系人: 倪小琦, 硕士, 助教. 研究方向: 光纤传感. E-mail: nixiaoqi@njnu.edu.cn

路噪声的引入, 解调结果准确, 具有较高的线性、灵敏度和精度.

1 复用系统及解调理论

1.1 传感器的复用系统

传感器的复用系统如图 1 所示. 该系统包含一台光纤传感分析仪, 一个 1×8 的可逆磁光开关, 一个 2×2 的耦合器以及用于数据处理的计算机.

光纤传感分析仪集激光光源和光谱接收设备的功能于一体, 它内置一个波长范围为 1 510 nm ~ 1 590 nm 的激光扫描光源和两个光输入通道, 可以用 5 Hz 的频率同时扫描两个输入通道. 可逆磁光开关内部没有任何可移动部件, 运用法拉第旋光效应实现对光信号的切换. 通过改变施加在光开关引脚的电控制信号, 可将输入端的光信号从 8 路光纤输出端的任何一端输出. 和机械开关相比, 磁光开关具有更高的可靠性和更快的开关速度 (可以达到 0.2 ms). 光开关的 8 个输出端分别接了一个传感器, 光开关的控制电路使得光开关按照 1~8 的顺序依次接通 8 个传感器, 并不断循环, 实现了传感器的空分复用. 传感器被接通时, 其反射信号通过可逆光开关, 经耦合器输入到光纤传感分析仪, 光纤传感分析仪扫描的反射光谱经网线传到计算机, 经过适当的数据处理, 便能得到该传感器所受的应力. 由于光纤传感分析仪的扫描频率为 5 Hz, 所以单路传感器光谱扫描所需典型时间为 0.2 s. 光开关的通道被设置成循环开通, 因此, 当单个传感器上的压力变化速度不超过循环扫描一轮传感器所需时间时, 都能通过该复用系统解调出来.

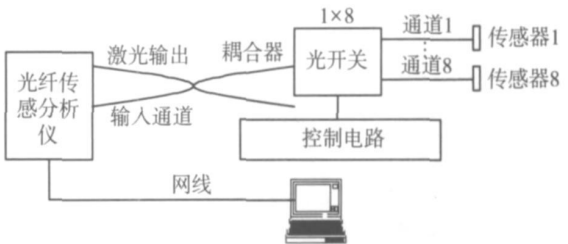


图 1 MEMS 压力传感器的空分复用系统图
Fig.1 Multiplexing system of MEMS pressure sensors

1.2 传感器腔长的计算

该系统复用的传感器为光纤 MEMS 压力传感器, 基于 FP 腔干涉的原理, 采用 MEMS 技术加工而成, 结构如图 2 所示.

根据多光束干涉原理, 腔长为 L , 端面反射率为 R 的 F-P 传感器, 当受到波长为 λ 的光照射且反射率 R 较小时, 反射光的强度分布公式为:

$$I_r = 2R(1 - \cos\varphi)I_0 = 2R\left[1 - \cos\frac{4\pi L}{\lambda}\right]I_0. \tag{1}$$

式中, I_0 为入射光光强. 结合光波长 λ 与频率 ν 的关系 $\lambda = \frac{c}{\nu}$

式 (1) 可以写成以下形式:

$$I_r = 2R\left[1 - \cos\frac{4\pi \nu L}{c}\right]I_0 \tag{2}$$

对式 (2) 进行连续傅立叶变换, 可以得到:

$$\begin{aligned} F(j\Omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} I_r e^{-j\Omega \nu} d\nu = \int_{-\infty}^{+\infty} 2R\left[1 - \cos\frac{4\pi \nu L}{c}\right] I_0 e^{-j\Omega \nu} d\nu = \\ &= 2\pi R I_0 \left[2\delta(\Omega) - \delta\left(\Omega + \frac{4\pi L}{c}\right) - \delta\left(\Omega - \frac{4\pi L}{c}\right) \right]. \end{aligned} \tag{3}$$

在光频谱分析中, 负频率成分没有实际的物理意义, 因此不加以考虑. 从式 (3) 可以看出, 当采用理想宽带光源时, 光纤法-珀传感器反射光强输出信号的频谱只包含两条谱线: 直流分量谱线和角频率 $\Omega_0 = \frac{4\pi L}{c}$ 的双干涉项谱线. 直流分量的能量大于双光束干涉项的能量. 显然, 腔长 L 和角频率 Ω_0 之间存在如下关系:

$$L = \frac{\Omega_0 c}{4\pi}. \tag{4}$$

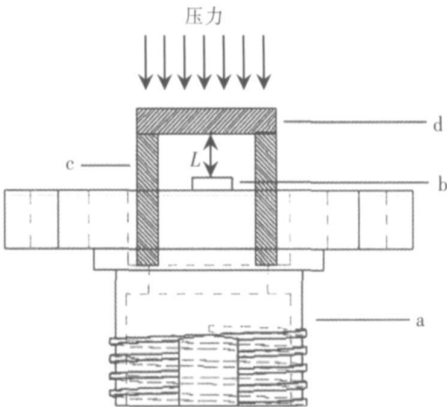


图 2 光纤 MEMS 压力传感器
Fig.2 Optical fiber MEMS pressure sensor

因此, 只要对传感器反射信号进行傅立叶变换, 找出频谱图中最大值 Ω_0 就可以通过式 (4) 得到传感器的腔长, 从而完成传感器的解调.

实际应用中, 常采用快速傅立叶变换 (FFT) 来求传感器输出信号的频谱. 对传感器输出信号进行离散快速傅立叶变换:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}.$$

(5)

式中, $x(n)$ 为对频率等间隔采样的光强信号, N 为采样点数. 图 3(a)、(b) 是光纤 FP 压力传感器的输出光强信号及相应的快速傅立叶变换频谱图.

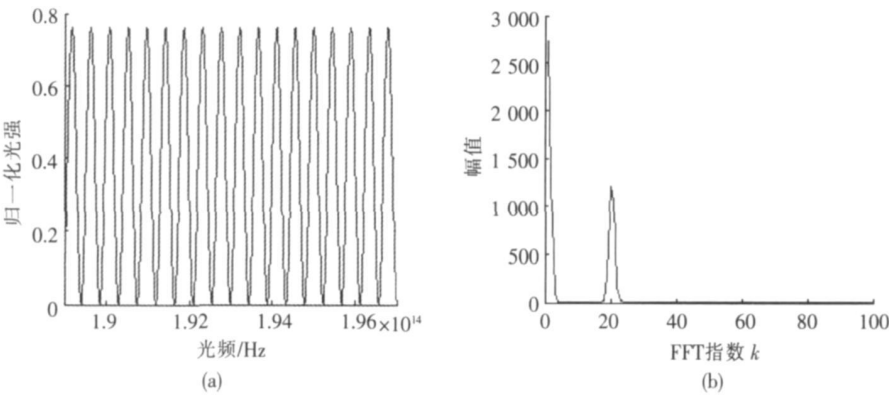


图 3 传感器输出及傅立叶频谱图
Fig.3 Output of sensor and Fourier spectrum

通过找出 $|X(k)|$ 的最大值所对应的数字下标 k_L , 由数字频率 $\omega_L = \frac{2\pi k_L}{N}$ 和角频率 $\Omega_L = \frac{4\pi L}{c}$ 的关系 $\omega_L = \Omega_L \delta v$ 可以得到光纤法 - 珀传感器腔长 L :

$$L = \frac{c k_L}{2N \delta v} \quad k_L = 0, 1, 2, \dots, N-1.$$

(6)

结合式 $\delta v = \frac{c \delta \lambda}{\lambda^2}$, 可以推出:

$$L = \frac{k_L \lambda^2}{2N \delta \lambda} \quad k_L = 0, 1, 2, \dots, N-1.$$

(7)

通过式 (7) 可以根据传感器反射谱计算其腔长. 式中, λ 为光纤传感分析仪出射光的中心波长, k_L 为传感器反射谱经快速傅立叶变换后频谱图中除直流分量之外最大值所对应的数字下标, N 为采样点数, $\delta \lambda$ 为采样的波长间隔. 本文对初始腔长为 310 μm 的传感器, 以 4.2 nm 的间隔进行了腔长解调的模拟, 模拟结果如图 4 所示.

图中, 横坐标为模拟的传感器腔长, 腔长范围为 309.958~310 μm , 纵坐标为用傅立叶解调法计算得到的腔长. 两者比较可以看出, 理论上, 用傅立叶法解调传感器时, 分辨率可以达到 1‰.

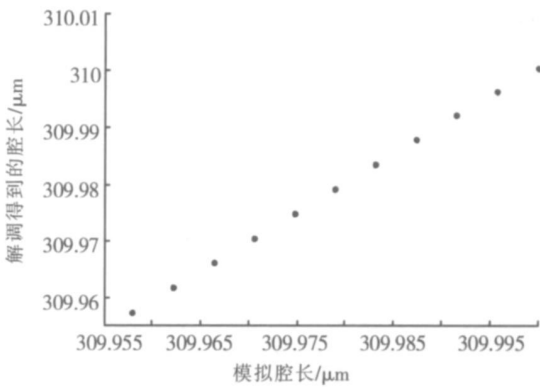


图 4 传感器的腔长解调模拟
Fig.4 Demodulating simulation of sensor's cavity length

1.3 传感器压力的解调

在得到传感器腔长计算公式的基础上, 首先通过实验对传感器进行标定. 标定时, 利用标准活塞式压力计给光纤 MEMS 压力传感器加压. 从 0 MPa~3 MPa 间隔 0.5 MPa 对传感器施加压力, 测出不同压力下传感器的腔长值作为标定值, 如图 5 所示. 传感器的初始腔长为 322.49 μm , 光源波长为 1 510 nm~1 590 nm. 标定好以后传感器就可以用于测量了, 根据传感器反射谱计算出待测压力对应的腔长值, 根据腔长-压力的标定关系, 经过 3 次样条插值后就能得到待测压力值. 本文从 0 MPa~3 MPa 间隔 0.1 MPa 对

传感器施加压力. 传感器测得的压力值与实际压力的关系如图 6 经过误差分析得到: 实际压力与测量值之间的误差在 -8×10^{-3} MPa~ 2×10^{-3} MPa 之间, 满量程误差在 0.26% 之内.

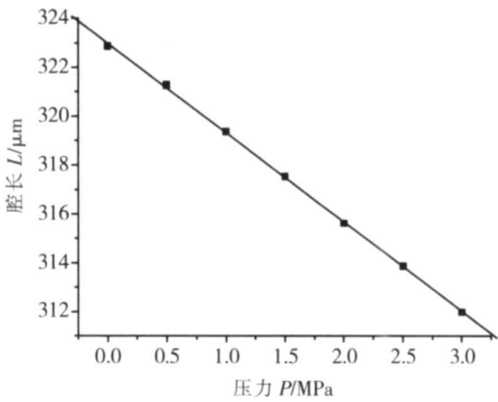


图 5 传感器腔长与所受压力的关系

Fig.5 Relationship between cavity length and pressure

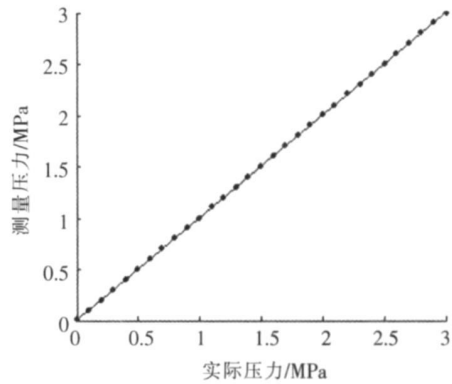


图 6 传感器测量值与实际压力的比较

Fig.6 Measured pressure vs. real pressure

2 实验

实验装置如图 1 所示. 由于本文所使用的标准活塞式压力计只能同时对两个传感器加压, 因此把其余的 6 个传感器放置在空气中, 不施加压力. 实验结果显示, 不施加压力的传感器测得的压力值与实际值的误差不超过 0.02MPa(满量程的 0.67%), 如图 7 所示.

本文用标准活塞式压力计从 0MPa~ 3MPa 间隔 0.5MPa 对两个光纤 MEMS 压力传感器同时施加压力, 传感器的压力测量结果如图 8 所示, 其中方形点为第一个传感器的测量值, 圆形点为第二个传感器的测量值; 误差如图 9 所示, 其中方形点是第一个传感器的测量误差, 圆形点为第二个传感器的测量误差. 从图 9 可以看出, 第一个传感器的测量精度比第二个传感器略好, 满量程误差分别为 0.33% 和 0.37%.

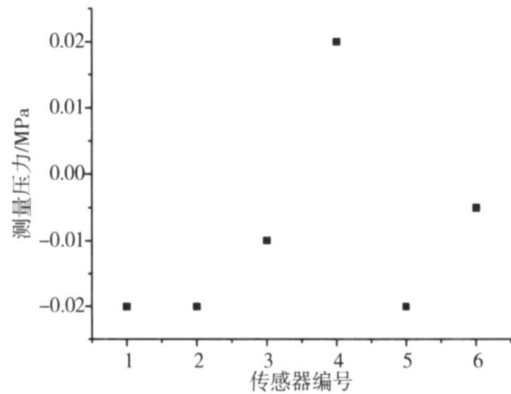


图 7 未施加压力时传感器的测量值

Fig.7 Measured pressure of sensors when no pressure is applied

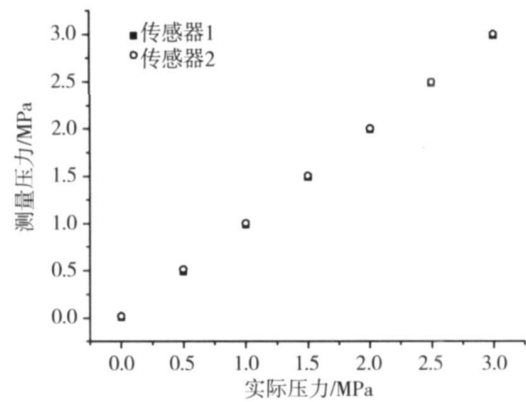


图 8 同时施加压力时传感器的测量值

Fig.8 Measured pressure of two sensors when pressure is applied

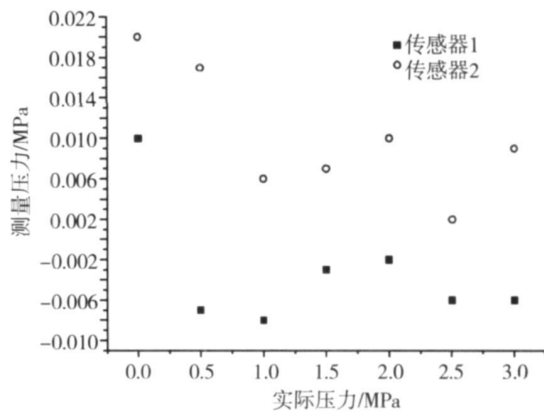


图 9 同时施加压力时传感器的测量误差

Fig.9 Measurement error of two sensors when pressure is applied

3 结论

提出了一种用光开关实现光纤 MEMS 压力传感器的复用方案, 解决了 FP 干涉型传感器组网难的问

题. 传感器的解调基于傅立叶变换的方法, 利用 FP 腔腔长与压力的关系对传感器受到的压力进行解调. 系统避免了光电器件的使用, 从而消除了电噪声的引入. 实验结果表明, 基于傅立叶解调法的空分复用系统有效地提高了光纤 MEMS 压力传感器的复用能力, 降低传感系统的平均成本, 并且能够准确地进行空间选址, 使准分布式测量成为可能, 具有较大的实用价值, 可望在大型结构健康监测中发挥重要作用. 系统的复用能力取决于光开关的通道数. 理论上说, 该实验系统能复用 8 个传感器. 随着光开关通道数的增加, 系统的复用能力还可以进一步加强. 随着复用传感器数目的增加, 每个传感器的扫描间隔也会相应增加, 使系统的实时性受到一定的影响. 所以, 要根据系统对复用能力和实时性的要求选择合适数量的传感器.

[参考文献] (References)

- [1] Don C Abeysinghe, Samhita Dasgupta, Joseph T Boyd, et al. A novel MEMS pressure sensor fabricated on an optical fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(9): 993-995
- [2] Zhou Jie, Samhita Dasgupta, Hiroshi Kobayashi, et al. Optically interrogated MEMS pressure sensors for propulsion applications [J]. Opt Eng, 2001, 40(4): 598-604
- [3] Yasukazu Sano, Toshihiko Yoshino. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(1): 132-139
- [4] Norman D C C, Webb D J, Pechstedt R D, et al. Extended range interrogation of wavelength division multiplexed fiber Bragg grating sensors using arrayed waveguide grating [J]. Electronics Letters, 2003, 39(24): online No. 20031093
- [5] 陈伟民, 朱永, 唐晓初, 等. 光纤法布里-珀罗传感器串连复用的傅立叶变换解调方法初探 [J]. 光学学报, 2004, 24(11): 1481-1486
Chen Wein, Zhu Yong, Tang Xiaochu, et al. Study on the serial multiples of optical fiber Fabry-Perot strain sensors with Fourier transform [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(11): 1481-1486 (in Chinese)
- [6] 周昌学, 饶云江, 朱涛. 光纤菲佐应变传感器的波分频分复用方法 [J]. 光学学报, 2005, 25(11): 1472-1476
Zhou Changxue, Rao Yunjiang, Zhu Tao. SFDW /CWDM of fiber-optic Fabry strain sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(11): 1472-1476 (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]