

# 光纤法珀应变传感器并联复用实验研究\*

佟艳群<sup>1</sup> 符欲梅<sup>1</sup> 陈伟民<sup>1</sup> 朱永<sup>1</sup> 陈雨森<sup>1</sup> 梁大开<sup>2</sup>

(1 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

(2 南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 南京 210016)

**摘要** 讨论了两个光纤法珀传感器的并联复用的原理和信号的傅里叶解调方法, 设计了两个法珀传感器的并联复用系统, 并进行并联复用实验. 采用一元线性回归分析方法对三组典型实验系统的实验数据进行处理分析. 实验结果表明, 并联复用中同一组传感器信号没有发生明显的串扰, 实验结果符合理论推导, 波动范围小于 2.4%, 精度达到 4.7 με.

**关键词** 光纤光学与光通信; 光纤法珀传感器; 并联复用; 傅里叶变换; 应变

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

对于多测点的测量系统而言, 多个传感器用多个解调装置进行解调, 系统的整体价格非常昂贵, 这大大限制了光纤法珀传感器的工程应用范围. 国内外一般采用传感器的复用来简化测量与信号处理系统, 达到有效降低成本的目的. 但是, 由于光纤法珀传感器的复用输出信号比较复杂, 对它的解调比较困难, 因此对它的研究尚属于起步阶段<sup>[1]</sup>. 有报道利用傅里叶变换方法进行光纤法珀传感器的复用信号解调的原理和仿真实验, 但是几乎未见有报道进行实际的实验研究.

复用系统按照传感器排列的方式可以分为串连复用和并联复用两种<sup>[2]</sup>. 由于并联复用传感器之间的相互影响较小, 因此对并联复用的研究具有更加实际的意义.

## 1 两个光纤法珀传感器并联复用的傅里叶解调原理

为了简便, 进行两个传感器的并联复用研究, 图 1 为两个法珀传感器并联复用的系统图. 由图可知, 由于两个传感器的信号直接耦合输出到光谱仪, 因此输出的信号为两个传感器的输出信号的直接叠加 (不考虑耦合器的能量损失).

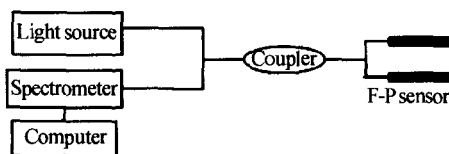


图 1 两个 F-P 传感器并联复用系统  
Fig. 1 The system of two F-P sensor's parallel multiplexing

两个法珀传感器并联系统的干涉输出信号为<sup>[3]</sup>

$$I_r = ((1 - \cos(\frac{4\pi}{\lambda}l_1)) + (1 - \cos(\frac{4\pi}{\lambda}l_2)) \cdot 2RI_0 e^{\frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{-2\sigma_\lambda^2}}) \quad (1)$$

式中,  $I_r$  表示反射光强度,  $I_0$  为入射光强度,  $\lambda$  表示光波长,  $R$  为光束在光纤端面 and 空气界面处的能量反射率,  $l_1, l_2$  分别是两个传感器的谐振腔的腔长,  $\lambda_p$  为入射光束的中心波长,  $\sigma_\lambda$  是描述光源性质的参数. 由式(1)经过傅里叶变换后可近似得

$$I_r = 2\sqrt{2}\pi RI_0 \sigma_v ((e^{-i\sigma_v \omega} e^{-\sigma_v^2 \omega^2 / 2} + \pi e^{-i\sigma_v (\omega - \omega_{10})} \cdot e^{-\sigma_v^2 (\omega - \omega_{10})^2 / 2}) + (e^{-i\sigma_v \omega} e^{-\sigma_v^2 \omega^2 / 2} + \pi e^{-i\sigma_v (\omega - \omega_{20})} \cdot e^{-\sigma_v^2 (\omega - \omega_{20})^2 / 2})) \quad (2)$$

式中,  $\sigma_v$  也为描述光源性质的参数,  $\omega_{10}, \omega_{20}$  分别为两个传感器在傅里叶变换域的中心频率.

图 2 为两个光纤法珀传感器的并联复用后的光谱图. 经过傅氏变换后如图 3.

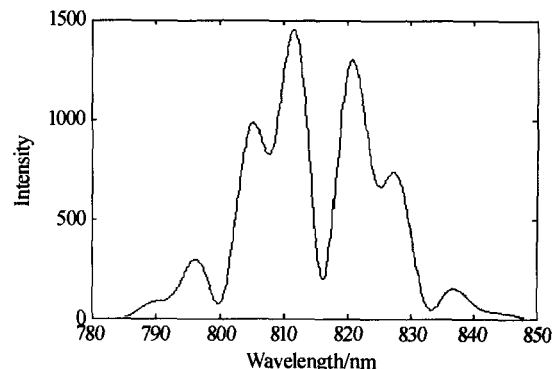


图 2 两个并联传感器的光谱  
Fig. 2 The spectrum of two parallel multiplexing sensor

由图 3 和式(2)可知, 中心频率  $\omega_{10}, \omega_{20}$  和两个传感器的腔长  $l_1, l_2$  存在一一对应关系, 通过算法找到  $\omega_{10}, \omega_{20}$  的具体位置就能得到传感器的腔长, 再由式(3)可计算出测量点处的应变.

$$\epsilon = \frac{l' - l_0}{a} = \frac{\Delta l}{a} \quad (3)$$

\* 国家自然科学基金重点项目(50135030)资助  
Tel: 023-65112467 Email: tongyanqun\_99@163.com  
收稿日期: 2004-08-03

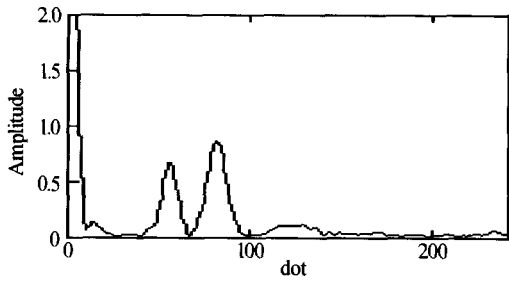


图 3 两个并联复用法珀传感器的傅里叶变换  
Fig. 3 The FFT diagram of two parallel multiplexing F-P sensor

式中,  $l_0$  为初始腔长,  $l'$  为实际的腔长,  $\Delta l$  为腔长的变化量,  $a$  为法珀传感器的长度.

值得注意的是, 在信号的处理中, 如果两个等强度成分中一个的主强度极大值同另一个的第一强度极小值相重合时, 则这两个成分被认为刚刚被分辨开. 因此, 对于传感器复用信号的 FFT 变换曲线, 要使得解调算法能够准确地分辨出复用两传感器的信号, 至少需要相邻两 FFT 曲线峰值间距  $d$  大于峰值的半宽度  $a$  (图 4), 考虑实际的需要, 一般是要求  $d \geq 2a$ <sup>[4]</sup>, 也就是说, 进行复用的两个传感器的腔长应相差足够大的尺寸才能进行傅氏解调.

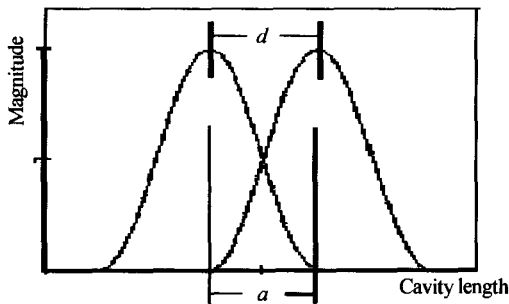


图 4 复用信号 FFT 变换分开的条件  
Fig. 4 The distinguishing condition of FFT

## 2 两个光纤法珀传感器的并联复用实验

### 2.1 实验系统设计和分析

为了验证理论的正确, 设计了如图 5 的等强度

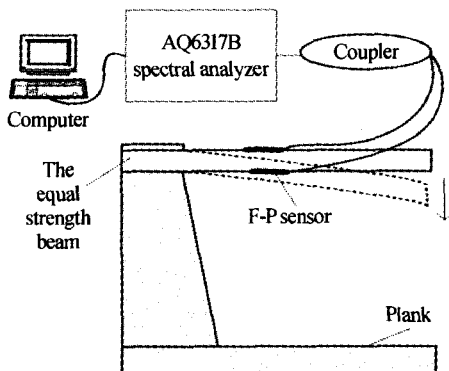


图 5 实验系统  
Fig. 5 The system of experiment

梁连续加载的实验系统. 实验以应变试验的标准装置一等强度梁作为研究对象<sup>[4]</sup>. 实验系统主要由光纤法珀传感器、解调装置、等强度梁及其支架以及连续加载系统组成.

由于复用的条件限制, 在同一组实验中选择的两个法珀传感器分别是腔长为  $50 \mu\text{m}$  的 FP1 和腔长为  $95 \mu\text{m}$  的 FP2. 两传感器的腔长差值为  $40 \mu\text{m}$ , 远大于理论计算值, 从理论上排除了解调信号发生串扰. 为了充分验证复用原理的可行性, 选择三组典型实验系统进行实验. 这三组实验条件分别是① FP1 和 FP2 同时处于拉伸状态; ② FP1 处于压缩状态而 FP2 处于拉伸状态; 以及③ FP1 处于拉伸状态而 FP2 处于静止状态. 光纤法珀传感器直接粘贴在等强度梁表面, 处于拉伸状态的传感器粘贴在等强度梁的上表面, 处于压缩状态的传感器粘贴在等强度梁的下表面, 而静止不动的传感器则粘贴在试验台静止的玻璃板上. 在同一组实验中, 为了便于比较数据结果, 第①种情况下的两个传感器平行粘贴在上表面, 第②种情况下的两个传感器粘贴在同一截面处的上下表面.

解调装置选用 AQ6317B 光谱分析仪, 它提供 LED 光源和光谱分析仪器. 本实验宽带光源设置为中心波长  $\lambda_0 = 850 \text{ nm}$ , 带宽  $B_\lambda = 20 \text{ nm}$ , 光谱仪的波长分辨率设置为  $\delta\lambda = 0.01 \text{ nm}$ , 采样点数在测量时调节.

等强度梁的各个截面尺寸大小不同, 但却有相同的强度. 根据材料力学原理, 当对等强度梁顶端垂直向下施力时, 梁表面上任意点的应变值与其受力的大小 (或端点的垂向挠度) 成正比. 实验采用步进电机拖拽钢丝对等强度梁顶端沿铅垂方向连续加载, 则等强度梁的顶端匀速下垂, 引起光纤法珀传感器承受匀速的应变增量  $\Delta\epsilon$ . 式 (4) 表示法珀传感器承受匀速的应变增量.

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta f}{d^2} h \tag{4}$$

式中,  $h$  为等强度梁的厚度,  $d$  为加载点到支撑点的距离,  $\Delta f$  为步进电机每进给一步等强度梁的挠度增量.

由于步进电机是以“步”为进给单位, 即计算机每发出一个控制脉冲, 步进电机进给 1 步. 因此, 计算机发出的控制脉冲数代表了步进电机进给的“步”数, 也表示了等强度梁顶端的挠度值. 置步进电机开始运动时的法珀传感器的应变值为 0, 则记录步进电机的进给步数  $s$ , 就可以求出法珀传感器的应变值

$$\epsilon = \Delta\epsilon s \tag{5}$$

当步进电机每进给一步时,AQ6317B 光谱分析仪实时采集光纤法珀传感器的输出光谱一次,传送到计算机后,由根据傅里叶解调算法编制的专用复用解调软件计算相应的传感器实际应变值,并存储一系列的数据,并以步进电机的进给步数为横坐标,法珀传感器的测得应变值为纵坐标显示测量结果.由式(5)知,法珀传感器的理论计算应变值  $\epsilon$  与步进电机的进给步数成正比,所以横坐标实质上是表示的法珀传感器的理论计算应变值,只是数值上多了一个比例系数.理想的输出曲线是以原点为起点,斜率由比例系数决定的一条直线段,且复用的两个

传感器相互之间不能发生串扰.

### 2.2 实验数据分析

然而,由于理想的和现实的实验条件总是存在差距,例如加载系统不均匀、粘贴剂和梁本身材料性能及环境等因素影响<sup>[6]</sup>,同时反射光干扰、入射光的谱度和光源的稳定性等也对实验的精度产生影响,实际曲线不可能完全符合理想的推论,如图 6 点线所示(这些是下一步工作的研究内容).从图中可以看出,两传感器之间的串扰是不明显的,应变信息是完全被解调出来,但是存在着跳动.因此根据曲线的特点采用一元线性回归进行拟合分析实验的效果.

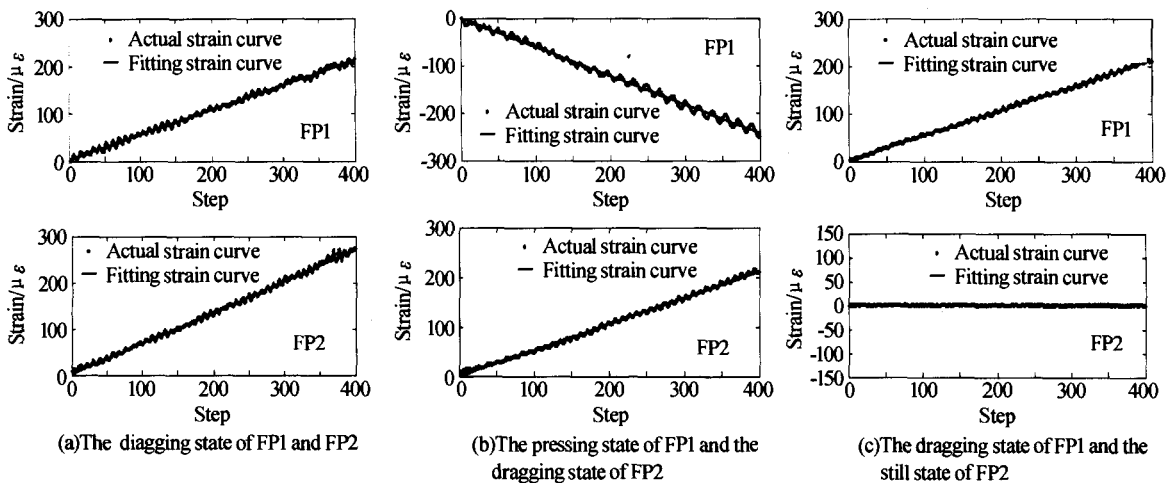


图 6 三组实验系统的应变  
Fig. 6 The strain diagram of three groups of experiment

设一元线性回归的两个变量为  $y$  和  $x$ .  $y$  为传感器的测得应变值(纵坐标值),而  $x$  表示步进电机的进给步数(横坐标值).实验数据的回归方程为<sup>[7]</sup>  
$$y = b_0 + bx \tag{5}$$
式中,  $b_0$  和  $b$  为回归方程的回归系数.  $n$  表示采集的总点数.经过 matlab 编程,得到一元线性回归处理后拟合图如图 6 中实线表示.

一般判断实验的效果,可以从标准差  $\sigma^2$ 、显著性  $F$ 、零阶回归系数  $b_0$  和一阶回归系数  $b$  四个参数进行分析<sup>[6]</sup>.其中,标准差  $\sigma^2$  表示排除了  $x$  对  $y$  线

性影响后,  $y$  随机波动的大小的一个估计量.  $\sigma^2$  越小,实验数据的波动越小,回归直线的精度就越高;显著性  $F$  表明  $y$  和  $x$  的线性关系的密切程度.  $F$  值越大,线性关系越好.当  $F > F_{0.01}(1, n-2)$  时,回归高度显著,线性关系也很明显;零阶回归系数  $b_0$  表示起始点的应变值,理想情况为 0;一阶回归系数  $b$  是拟合曲线的斜率,它主要与法珀传感器的理论计算应变值  $\epsilon$  与步进电机的进给步数  $s$  之间的比例系数有关.实验结果如表 1.

表 1 实验结果

加载状态	同步拉伸状态		不同状态(拉、压)		不同状态(拉、静)	
传感器	FP1(拉)	FP2(拉)	FP1(压)	FP2(拉)	FP1(拉)	FP2(静)
标准差 $\sigma^2$ ( $\mu\epsilon$ )	4.7330	4.2606	6.1251	3.3948	2.4860	0.3982
波动	1.7%	1.9%	2.4%	1.5%	1.2%	0.2%
显著性 $F$	1.0716e+005	8.0556e+004	5.2661e+004	1.3046e+005	2.4094e+005	--
$F_{0.01}(1, n-2)$	6.64	6.64	6.64	6.64	6.64	--
零阶回归系数 $b_0$	-0.4357	0.8864	-0.4799	-0.7520	0.2506	--
一阶回归系数 $b$	0.5709	0.5236	-0.5086	0.5310	0.5284	--

由表 1 和图 6 可以看出,拟合的效果是很好的.

①显著性值  $F \gg F_{0.01}(1, n-2)$  (不考虑处于静止状态的传感器),这说明回归高度显著,线性关系

明显,在沿铅垂方向连续加载等强度梁顶端时,光纤法珀传感器有匀速的应变增量;②从图中看出测得的曲线有些跳动,但是从表中看出它的标准方差值

是比较小的,实验精度达到  $4.7 \mu\epsilon$ ,波动小于 2.4%,完全在允许的范围;③零阶回归系数  $b_0$  符合理想情况,它的值接近 0;④同一组传感器的一阶回归系数  $b$  值也是接近于相等,说明比例系数也接近于相等.

### 3 结论

由以上的实验及分析可知,用傅氏变换解调两个 F-P 传感器的复用信号效果是明显的. 实验的精度很高,完全能够满足工程实际的应变测量要求. 在今后的工作中可以进一步研究两个传感器复用的实际工程以及三个或更多传感器的复用问题.

#### 参考文献

- 1 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. 重庆大学硕士学位论文, 2003. 45~54  
Chen Y S. Algorithms and Multiplexing of Fiber Fabry-Perot Strain Sensor. The master's degree of Chongqing University. 2003. 45~54
- 2 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. 重庆大学硕士学位论文, 2002. 43~53  
Wang N. Fiber Fabry-Perot Strain Gauge Based on The Technology of Wavelength Analysis for Bridge Health Monitoring, the master's degree of Chongqing University, 2003. 43~53
- 3 毕卫红. 光纤 Fabry-Perot 干涉仪在传感应用中的数学模型. 光子学报, 1999, 28(8): 744~747  
Bi W H. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28(8): 744~747
- 4 Alan V. Oppenheim and Alan S. Willsky. Signals and systems. Prentice-Hall International Inc, 1998, 9: 514~555
- 5 江毅, 刘莉. 光纤 Fabry-Perot 腔振动传感器. 光子学报, 2003, 32(9): 1059~1062  
Jiang Y, Liu L. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1059~1062
- 6 朱永, 张洁, 陈伟民, 等. 提高光纤 F-P 应变传感器输出信号质量的方法研究. 光子学报, 2004, 33(5): 544~548  
Zhu Y, Zhang J, Chen W M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 544~548
- 7 费业泰. 误差理论和数据处理. 北京: 机械工业出版社, 2000. 45~52, 94~130  
Fei Y T. Error Theory and Data Processing. Beijing: China Machine Press, 2000. 45~52, 94~130

## Experimental Research of the Parallel Multiplexing of Fabry-Perot Strain Sensor in the Fourier Demodulation

Tong Yanqun<sup>1</sup>, Fu Yumei<sup>1</sup>, Chen Weimin<sup>1</sup>, Chen Yusheng<sup>1</sup>, Liang Dakai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044

<sup>2</sup> The Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Material & Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016

Received date: 2004-08-03

**Abstract** The Fourier demodulation of the output signal of the Fabry-Perot strain sensor was analyzed. The principle of the parallel multiplexing according to Fourier demodulation was introduced particularly. Based on this principle, many experiments have been done, of which three experiments have been analyzed emphatically. The experimental results indicate that this demodulation method is valid and practical.

**Keywords** Fiber optics and optical communications; Fabry-Perot sensor; Parallel multiplexing; Fourier transfer; Strain

**Tong Yanqun** was born in 1981. She received the Bachelor's Degree at Department of Optoelectronic Engineering of Chongqing University. At present, she is pursuing her Master's Degree in the same department. Her research activities are in the application of Fabry-Perot sensor.

