

文章编号: 0253-2239(2004)11-1481-6

光纤法布里-珀罗传感器串连复用的 傅里叶变换解调方法初探*

陈伟民 朱 永 唐晓初 符欲梅 王 宁 陈雨森 文玉梅 黄尚廉
(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 光纤法布里-珀罗传感器复用、特别是串连复用的解调十分困难。为解决这个问题,从光纤法布里-珀罗应变传感器的基本原理出发,在仅有两只传感器复用的基本条件下,深入分析了复用系统组合输出光强信号及其分布特性;研究了对其进行傅里叶变换的解调原理及具体实现方法,分析了因复用信号不满足傅里叶变换条件而在变换域产生的畸变,进行了计算机仿真解调。在此基础上,搭建了两只传感器的串连复用实验系统,并用此方法实现了两只复用传感器的解调,且传感器之间的相互影响小于 5%。理论与实验表明,虽然传感器的复用信号不满足傅里叶变换的标准条件,且仿真与实验存在一定差异,但所提出的傅里叶变换方法,基本可用于光纤法布里-珀罗传感器的串连复用解调。

关键词: 光纤传感; 串连复用; 傅里叶变换; 光纤法布里-珀罗传感器

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Study on the Serial Multiplex of Optical Fiber Fabry-Perot Strain Sensors with Fourier Transform

Chen Weimin Zhu Yong Tang Xiaochu Fu Yumei Wang Ning Chen Yusen
Wen Yumei Huang Shanglian

(Key Lab of Optoelectronic Technology and System of Education Ministry of China,
Chongqing University, Chongqing 400044)

(Received 31 March 2003; revised 8 January 2004)

Abstract: It is very difficult to multiplex fiber Fabry-Perot sensor because of its fundamental limitation. When serially multiplexed, it is especially complicated due to mutual affection between sensors. To address this problem, the simplest case of two fiber Fabry-Perot (F-P) sensors multiplexed in series was discussed. According to the principle of double beam interference, the output of serially multiplexed sensors was derived, and its characteristics was discussed in detail. Fourier transform was adopted to transform the output from wavelength domain into spatial frequency domain. The dissatisfaction of conditions for using Fourier transform signal processing of fiber Fabry-Perot sensor was discussed, and distortion of Fourier transform was analyzed. With the simulation of Fourier transform, the eigenvalues of two fiber Fabry-Perot sensor were demultiplexed in spatial frequency domain. In addition, experiment of serial multiplexing two fiber Fabry-Perot sensors was carried out. The experimental results showed that, Fourier transformation in demultiplexing serially multiplexed fiber Fabry-Perot sensors was valid, and mutual affection between two fiber Fabry-Perot sensors was less than 5%.

Key words: optical fiber sensor; serial multiplex; Fourier transform; fiber Fabry-Perot sensor

* 国家自然科学基金(50135030)资助课题。

E-mail: wmcheng@cqu.edu.cn

收稿日期: 2003-03-31; 收到修改稿日期: 2004-01-08

1 引 言

光纤法布里-珀罗传感器(Fiber Fabry-Perot strain sensor),作为一种结构简单、稳定的光纤传感

器,已广泛应用于大型土建结构的应变监测。然而一座大型土建结构,需要进行应变监测的部位往往成百上千,如果一套光纤应变解调装置只能对应一个光纤应变传感器,则总体系统的成本将是相当高昂的。因此利用多传感器复用技术来提高测量系统的利用率以降低监测成本^[1,2],一直是该领域的一个研究热点。由于光纤法布里-珀罗传感器受其原理限制,复用技术十分困难,迄今为止,只有极少的并联式空分复用方案探索^[3]。因此探索光纤法布里-珀罗应变传感器的复用技术、扩展其复用途径,对于实际工程应用具有极大的学术价值与实用价值。由于串连复用只需要用一根光纤就可以实现多测点的准分布测量,因此是一个需要重点研究的复用方案。

2 单个光纤法布里-珀罗应变传感器的信号解调

光纤法布里-珀罗传感器实际上可以等效为两个低反射率的镜面组成的法布里-珀罗干涉仪,并可以近似认为光是垂直于法布里-珀罗腔镜面入射。如果此光纤法布里-珀罗传感器腔长为 l ,入射光是中心波长为 λ_0 、带宽为 $\Delta\lambda$ 、并具有准高斯分布的准相干宽带光源,在假设入射光振幅 $E_0 = 1$,且考虑光纤法布里-珀罗腔的反射率很低(约 4%)的情况,在只考虑双光束干涉的近似条件下,其反射输出光强度 P 近似^[5]:

$$P = R^2(1 - R^2)\cos\left(\frac{4\pi l}{\lambda}\right)\exp\left[\frac{-(\lambda - \lambda_0)^2}{\Delta\lambda^2}\right], \tag{1}$$

显然,这是一个腔长 l 与波长 λ 的双参量函数。在 $\lambda_0 = 830 \text{ nm}$ 、带宽 $\Delta\lambda = 35 \text{ nm}$ 条件下,由(1)式可得出其干涉输出光强 P 与波长 λ 的关系呈图 1 所示的具有高斯包络的余弦分布。根据图 1 的干涉光谱图,就可以用干涉条纹计数解调方法^[6],通过任意两

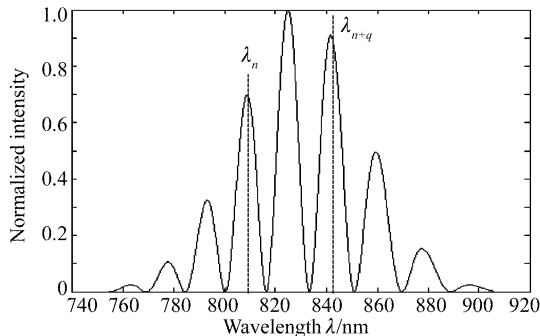


Fig. 1 Spectral output of fiber Fabry-Perot sensor

个干涉条纹的峰值 λ_n, λ_{n+q} 以及两干涉峰值的级次之差 q ,由(2)式求出传感器的绝对腔长 l ,进而由应变的定义式(3)求出其受外力作用后产生的应变值 ϵ ^[7]

$$l = \frac{q}{2} \frac{\lambda_n \cdot \lambda_{n+q}}{\lambda_n - \lambda_{n+q}}, \tag{2}$$

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0}. \tag{3}$$

3 光纤法布里-珀罗应变传感器串连复用的信号输出特性分析

当光路中有多个光纤法布里-珀罗传感器串连时(如图 2 所示),虽然其第一个传感器反射输出 P_1 仍然为(1)式,但其后边的所有传感器的反射输出 P_i 都要受其前边的那些传感器的影响,而最终的复用输出信号 P 、则是所有传感器干涉输出的叠加,因而复用输出信号 P 就不再是图 1 所示的单一干涉条纹,而应是多个传感器干涉输出的复杂组合图形。为简便计算,仅考虑两个腔长分别为 l_1, l_2 的光纤法布里-珀罗传感器复用情况。

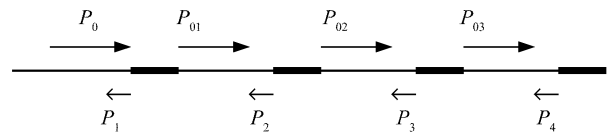


Fig. 2 Schematic of series multiplex of the Fabry-Perot sensors

由于第一只法布里-珀罗腔 F-P₁ 的反射输出完全不受第二只法布里-珀罗腔 F-P₂ 的影响,因而其反射输出仍然由(1)式决定。故两只法布里-珀罗腔串连输出的关键是第二只法布里-珀罗腔 F-P₂。假设两只法布里-珀罗腔的界面反射系数、透射系数、间距、腔长分别为 $r, r', t, t', l, l_1, l_2$,经过 F-P₁ 透射、近而入射到 F-P₂ 的光振幅为 $E_0 = 1$,在 $r \ll 1$ 的双光束干涉近似条件下,F-P₂ 的反射特性如图 3 所示^[4]。即由 F-P₁ 输出、入射到 F-P₂ 的光束,在 F-P₂ 处分为前、后表面反射的两束光;而 F-P₂ 的这两束光反射光回到 F-P₁ 后,同样可各自分为直接透射、在 F-P₁ 腔内二次反射后再透射的两束光。因而 F-P₂ 的反射光束经 F-P₁ 影响后变为了四束光,这四束光的合成,就是 F-P₂ 的反射输出光振幅 E_{F_2} 。列出图 3 的各光束分量并整理之,可得到第二只法布里-珀罗腔输出的复振幅 E_{F_2} 与光强度 P_2 分别为

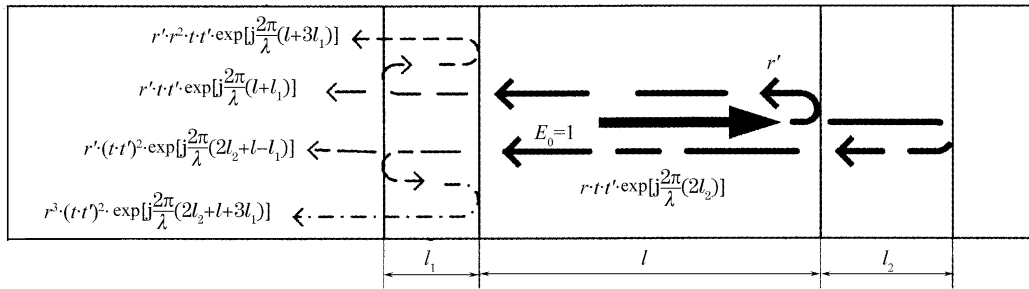


Fig. 3 Propagation of light in two fiber Fabry-Perot sensors serially-multiplexed

$$E_{F_2} = r'tt' \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} l\right) \left\{ r^2 \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} 3l_1\right) + \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} l_1\right) - tt' \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} (2l_2 + l_1)\right] - r^2 tt' \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda} (2l_2 + 3l_1)\right] \right\}, \tag{4}$$

$$P_2 = R^2 (1 - R)^2 \left[1 + R^2 + 2R \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l_1\right) \right] \left[1 + (1 - R)^2 - 2(1 - R) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l_2\right) \right], \tag{5}$$

如果假设入射到 F-P₁ 的光振幅为 E₀=1, 则入射到 F-P₂ 的光振幅应该相应地改为 E₁=tt'=1-R, 从而得到考虑 F-P₁ 对 F-P₂ 的影响时、F-P₂ 的输出光强 P₂ 为

$$P_2 = R(1 - R)^4 \left\{ (1 + R^2) \left[1 + (1 - R)^2 - 2(1 - R) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l_2\right) \right] + 2R \left[1 + (1 - R)^2 \right] \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l_1\right) - 2R(1 - R) \left[\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} (l_1 - l_2)\right) + \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} (l_1 + l_2)\right) \right] \right\}, \tag{6}$$

$$P_2 = A_2 + B_2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l_1\right) - C_2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l_2\right) - D_2 \left\{ \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} (l_1 - l_2)\right] + \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} (l_1 + l_2)\right] \right\}, \tag{7}$$

其中

$$A_2 = R(1 - R)^4 (1 + R^2) (2 - 2R + R^2), \quad B_2 = 2R(1 - R)^4 (2 - 2R + R^2), \\ C_2 = 2R(1 - R)^5, \quad D_2 = 2R^2 (1 - R)^5.$$

比较(7)式与(1)式, 可看由于 F-P₁ 的影响, 使得 F-P₂ 的信号输出 P₂ 复杂化。

当两只光纤法布里-珀罗传感器串连时, 由于两只法布里-珀罗腔之间的间距 l 远大于光源的相干长度 l_c, 因而 P₁、P₂ 相互独立, 两只法布里-珀罗腔串连复用后的总输出光强 P 仅是 P₁、P₂ 的简单代数和 P=P₁+P₂。因此将(1)式与(7)式叠加, 并考虑实际宽带光源高斯型包络的影响条件, 则两只法布里-珀罗腔串连复用后的总输出光强 P 为

$$P = \left[(A_1 + A_2) + (B_1 + B_2) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l_1\right) + C_2 \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} l_2\right) \right] \exp\left[\frac{-(\lambda - \lambda_0)^2}{\Delta\lambda^2}\right] + \\ D_2 \left\{ \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} (l_1 - l_2)\right] + \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} (l_1 + l_2)\right] \right\} \exp\left[\frac{-(\lambda - \lambda_0)^2}{\Delta\lambda^2}\right], \tag{8}$$

其中

$$A_1 = R(2 - 2R + R^2), \quad B_1 = -2R(1 - R),$$

比较(8)式与(1)式, 可以看出, 两法布里-珀罗腔串连的组合输出光强 P 是由五项组成。其中第一项是常量, 第二、三项是(1)式的单个法布里-珀罗腔反射光输出, 它们分别代表了 F-P₁、F-P₂ 各自的反射输出; 而第四、五项则代表了 F-P₁ 与 F-P₂ 之间的相互交叉影响。显然这个交叉影响项, 使得串连复用系统总的组合输出光强 P 复杂化。为了更直观地考察复杂化

的程度, 对这个过程进行仿真。具体先由式(1)分别计算出两个腔长分别为 l₁=60 μm、l₂=90 μm 的法布里-珀罗腔各自独立的干涉光强图 [见图 4(a)、图 4(b)], 再由(8)式计算出它们串连复用后的组合干涉光强图如图 4(c)所示。显然此组合输出十分复杂, 不可能采用普通的波峰解调方法^[6]简单地用(2)式、(3)式直接求解出两个法布里-珀罗腔各自的腔长 l₁、l₂ 以及各自的应变 ε₁、ε₂, 这也正是法布里-珀罗传感器串连复用解调的困难所在, 只能另找出路。

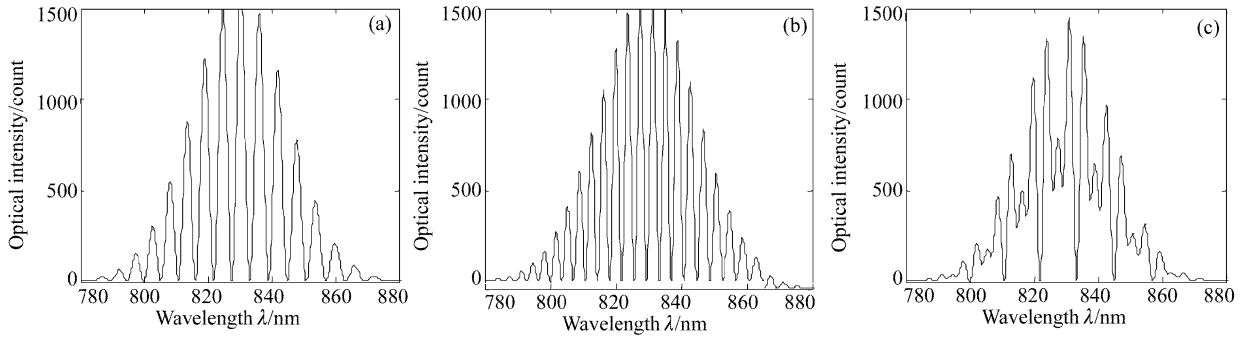


Fig. 4 Comparison of interference output between single fiber Fabry-Perot sensor and two fiber Fabry-Perot sensors serially multiplexed. (a) F-P₁, $l_1=60 \mu\text{m}$, (b) F-P₂, $l_2=90 \mu\text{m}$, (c) F-P₁+F-P₂

4 傅里叶变换解调方法分析与仿真

从(8)式与图 4 可知,双法布里-珀罗腔串连复用后的光强分布与单法布里-珀罗腔的光强分布完全不同。但仔细考察式(8)可看出,双法布里-珀罗腔串连复用后的光强输出中,包含角频率分别为 $4\pi l_1, 4\pi l_2, 4\pi(l_1-l_2), 4\pi(l_1+l_2)$ 的四项单频余弦项。而从纯数学的观点看,任意多个单频正(余)弦信号组成的复杂波形,都可以采用傅里叶变换方法化为频域的多个简单脉冲信号。因此完全可以用傅里叶变换方法对式(8)进行傅里叶变换 $\mathcal{F}[P(\lambda)]$, 求出其频谱 $\mathcal{P}(l)$:

$$\mathcal{P}(l) = \mathcal{F}[P(\lambda)] = \int P(\lambda) \cdot \exp(-j2\pi l/\lambda) \cdot d\lambda, \quad (9)$$

$$P(\lambda) = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{P}(l)] = \int \mathcal{P}(l) \cdot \exp(j2\pi l/\lambda) \cdot dl. \quad (10)$$

显然(10)式就是(8)式,可以认为是原函数;而式(9)则可以认为是该原函数的傅里叶变换,即是(8)式的频谱。因为 $(l_1-l_2) \neq (l_1+l_2)$, 如果在系统设计时能保证两只传感器的腔长互不相等: $l_1 \neq l_2 \neq (l_1-l_2) \neq (l_1+l_2)$, 则在理想情况下,其频谱曲线应该如图 5 所示, 分别具有 $l_1, l_2, (l_1-l_2), (l_1+l_2)$ 四条独立的理想谱线。因而不需任何条纹计数,就可在直接在频谱域实现不同传感器的信号分离、解调,达到复用解调的目的。

但仔细考察原函数(8)式可以发现,当 l 恒定不变时, $P(\lambda)$ 中余弦函数 \cos 的自变量不是 λ , 而是 $\nu = 1/\lambda$, 因而(9)式、(10)式的确切表达式应该改为

$$\mathcal{P}(l) = \mathcal{F}[P(\nu)] = \int P(\lambda) \cdot \exp(-j2\pi l\nu) \cdot d\nu, \quad (11)$$

$$P(\nu) = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{P}(l)] = \int \mathcal{P}(l) \cdot \exp(j2\pi l\nu) \cdot dl, \quad (12)$$

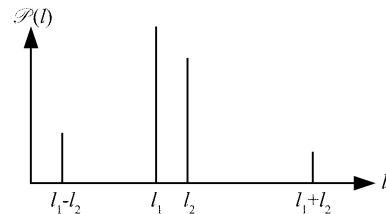


Fig. 5 Spectrum of ideal sinusoidal wave

这样一来,对传感器复用后的组合干涉条纹进行傅里叶变换的结果,将不再是图 5 所示的理想分离谱线,因而傅里叶变换的复用解调方法是否能用,也是一个需要探讨的问题了。

由于(11)式难以求出明确的数学解析式,直接进行数学讨论十分困难。为此将(1)式以及(7)式的系数 $A_2 B_2 C_2 D_2$ 代入(8)式,然后代入(11)式,利用 Mathcad 进行数字仿真计算,并假设 $l_1=60 \mu\text{m}, l_2=90 \mu\text{m}$, 则 $l_1-l_2=30 \mu\text{m} \neq l_1 \neq l_2, l_1+l_2=150 \mu\text{m} \neq l_1 \neq l_2$, 满足图 5 中理想频谱分离的条件。从而计算出(11)式的图形,即(8)式的频谱曲线如图 6 所示(用一个高通滤波器除去直流分量后的结果)。

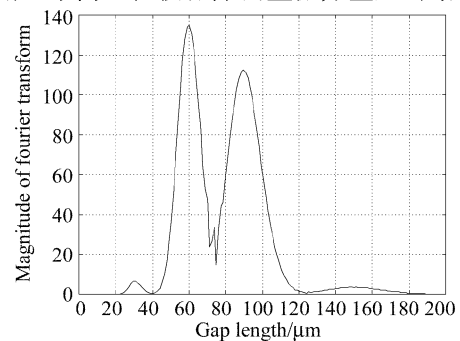


Fig. 6 Frequency spectral simulation of serial multiplexed sensors

由图 6 可看出,对(8)式进行傅里叶变换之后的(9)式,其频域曲线(频谱)并不是图 5 那样四条纯净的谱线,而分别是 $22 \leq l \leq 38$ 、 $39 \leq l \leq 70$ 、 $75 \leq l \leq 120$ 、 $120 \leq l \leq 180$ 的几段谱带,这一点正好与(8)式的形式相互吻合。此外由图 6 还可看出,虽然合成信号的频谱曲线并不是四条纯净的谱线,但这几段频谱带的峰值分别在 $l=30$ 、 60 、 90 、 150 ,而中间两个强峰值恰好与图 5 的原理想谱线吻合。因而由此仿真谱线图,仍然可以直接在信号的频谱域、实现两个传感器的信号分离、解调,达到复用解调的目的。

除此之外,利用图 6 中的另外两个弱峰值 $l_1 - l_2$ 、 $l_1 + l_2$,还可以构成一个二元一次方程组:

$$l_1 - l_2 = L_1, \quad l_1 + l_2 = L_2, \quad (13)$$

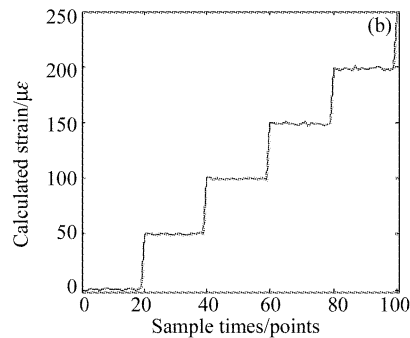
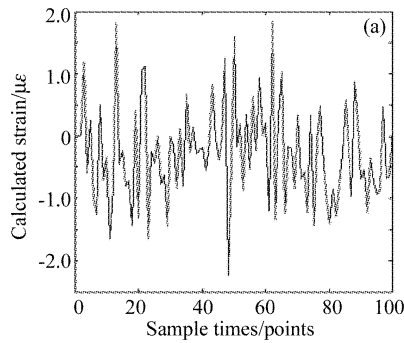


Fig. 7 Simulation of serial de-multiplex. (a) F-P₁ kept unchangeable, (b) F-P₂ stepped increase

为了进一步验证传感器串联复用的实际效果,还用图 8 所示实验装置进行了实际实验。其中光源为中心波长为 $0.83 \mu\text{m}$ 、带宽为 30 nm 的宽带光源;而两只光纤法布里-珀罗传感器串连在同一光纤上,其中一只裸光纤法布里-珀罗传感器 F-P₁ 置于空气中,另一只 F-P₂ 则粘接在金属基底上、并置于加热炉中。由于裸光纤法布里-珀罗传感器本身对温度不敏感^[7],置于空气中的 F-P₁ 的腔长可以认为恒定不变;而粘于金属基底上的 F-P₂ 则会随金属基底热胀冷缩而产生应变。将加热炉以 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (相当于 $100 \mu\epsilon$) 为步距进行升温(稳定一段时间),同时用分

通过此一元二次方程组,解出 l_1 、 l_2 ,并与中间两个峰值直接求得的峰值 l_1 、 l_2 相平均,还可能对图 6 中的峰值平坦化造成的 l_1 、 l_2 求解精度降低起到一定补偿作用,从而提高 l_1 、 l_2 的测量精度。

5 复用试验

为了验证上述光纤法布里-珀罗传感器复用傅里叶解调算法的效果,对两只传感器的串连复用,分别进行了初步的仿真及实际实验。

在假定腔长 $60 \mu\text{m}$ 传感器 F-P₁ 保持恒定不变,腔长为 $90 \mu\text{m}$ 传感器 F-P₂ 以 $50 \mu\epsilon$ 为步距稳步变化的条件下,利用 Matlab 进行了复用解调的仿真计算,其仿真计算结果如图 7 所示。

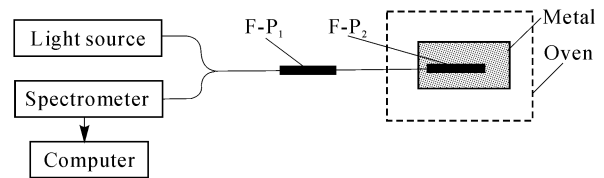


Fig. 8 Experimental setup of serial multiplexing two fiber Fabry-Perot sensors

辨力为 0.1 nm 的光谱仪接收两只光纤法布里-珀罗传感器复用后的组合干涉输出,然后用前述傅里叶解调算法解调、计算,得到的实验结果如图 9 所示。

从图 7 的仿真结果可以看出,通过复用算法解

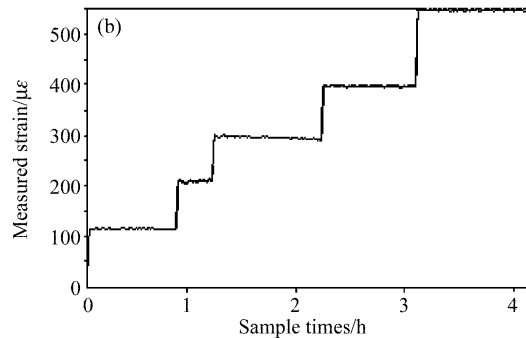
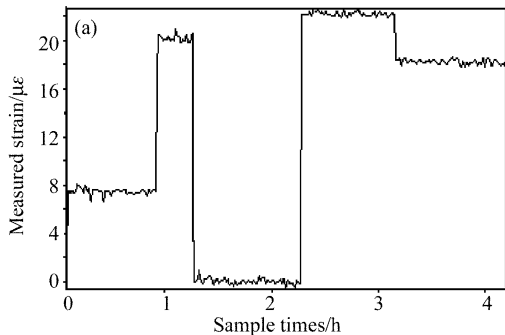


Fig. 9 Experimental result of serial de-multiplex. (a) F-P₁, (b) F-P₂

调,串联复用的两传感器的应变信息被完全解调出来,且两传感器之间没有出现明显的干扰。而从图 9 的实际实验则可以看出,F-P₂ 随温升产生应变的变化规律完全正常,但在每次 F-P₂ 随温升产生应变突变时,本应保持恒定的 F-P₁ 都要受到一定影响、产生一定的突变。但仔细观察图 9(a)可以看出,虽然 F-P₁ 要受 F-P₂ 的影响,但其变动范围大约为 20 $\mu\epsilon$,与 550 $\mu\epsilon$ 的总测量范围相比,此影响造成的波动小于 5%。

结论 由于两只传感器 F-P₁ 与 F-P₂ 之间存在交叉影响,因而它们串连复用的反射干涉输出信号十分复杂,不能用于干涉条纹计数(波峰法)的简单方法实现信号的解调。而对串连复用的反射干涉输出信号进行傅里叶变换后,其频谱虽然不再是标准的正弦波频谱那样的一系列理想线谱,而是一系列谱带,但谱带的中心仍然基本上与原谱线的位置吻合。因而傅里叶变换的方法从理论上讲,应该至少可用于两只光纤法布里-珀罗传感器的串连复用解调。从理论仿真结果看,虽然复用的组合输出信号不满足傅里叶变换条件,但对复用解调的结果产生的影响极小,两只传感器之间基本无串扰影响;而从实际实验看,两只传感器之间还是存在一定的串扰,但相互的影响小于 5%,这说明本文提出的傅里叶变换复用解调方案是基本可行的,但仿真与实验之间的差

异还值得继续研究。

参 考 文 献

- 1 Bhatia V, Murphy K A, Claus R O *et al.*. Multiple strain state measurements using conventional and absolute optical fiber-based extrinsic Fabry-Perot interferometric strain sensors. *Smart Material and Structures*, 1995, (4): 240~245
- 2 Bhatia V, Murphy K A, Claus R O *et al.*. Recent developments in optical-fiber-based extrinsic Fabry-Perot interferometric strain sensing technology. *Smart Material and Structures*, 1995, (4): 246~251
- 3 Liu T, Fernando G. A frequency division multiplexed low-finesse fiber optic Fabry-Perot sensor system for strain and displacement measurement. *Rev. of Scientific Instruments*, 2000, **71**(3): 1275~1278
- 4 Liang Quanting. *Physics Optics* (物理光学). Beijing: Mechanical Industry Press, 1980 (in Chinese)
- 5 Sun Jiyong, Chen Weimin, Zhu Yong *et al.*. Influence of optical source spectrum on optical fiber F-P strain sensor. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(5): 506~600 (in Chinese)
- 6 Chen Weimin, Wang Ning, Zhu Yong *et al.*. Experimental study on the affection of Gaussian spectrum of light source on the optical fiber F-P strain sensor. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(1): 88~92 (in Chinese)
- 7 Feng Jun. *Study on the Fiber F-P Strain Sensing Technology and Its Application in the Health Monitoring of Bridges* (光纤法珀应变仪的精度研究及其在桥梁结构健康监测中的应用). [Doctoral dissertation] Chongqing University, 2000 (in Chinese)