

# 基于可调 F-P 滤波器的光纤光栅 传感器阵列查询技术\*

余有龙\*\* 谭华耀 锤永康  
(香港理工大学电机工程系)

**提要** 利用可调 F-P 滤波器对四个光纤光栅组成的传感器阵列进行波长扫描,借助示波器和探测器对滤波光束的时序分布进行观察,实现地址查询。比较波长漂移前后传感阵列的反射谱,可用于解调,实验结果与预期值基本一致。选用反射率相差悬殊的光栅作传感元,有利于增加测量范围。

**关键词** 光纤光栅,传感器阵列,查询技术

## 1 引 言

对普通光纤传感器的研究已经有二十多年的历史了,该技术由于信噪比有限且不易进行节点式传感而未完全实用。光纤光栅(FBG)传感器不仅可以克服上述缺点,而且由于采用波长编码,传感结果不受光源功率以及光路中连接损耗的影响;不同传感元之间通过复用可进行网络化操作,因此该类传感器将更具实用性。FBG 传感元的信号经波长解码后可以确定被监测物理量的变化情形;而对 FBG 传感器阵列来说,需要解决的不仅只有解调技术,还必须结合适当的查询方法,以便确定是哪个传感元附近被测量发生了多大程度的变化。

光纤光谱仪是实验室中常见的用来检测 FBG 传感器传感信号的仪器,然而该设备过于昂贵,使得 FBG 传感系统难以让人接受,所以发展成本低、结构简单的查询、解调技术将是 FBG 传感系统走向实用化的关键。目前已报道的查询方法很多<sup>[1-6]</sup>,其中 Kersey<sup>[1]</sup>和 Davis<sup>[6]</sup>提出的基于可调 F-P 滤波器的查询技术可算得上 FBG 传感技术的突破,他们对各传感元的波长地址通过 F-P 的驱动电压进行定标。本文用可调 F-P 滤波器对传感元件串进行波长扫描时,提出用示波器观察滤波光强的时序分布,从而对四个 FBG 组成的波分复用传感器阵列成功地进行了查询和解调。该方法避免了 Kersey 和 Davis 方法中由于压电陶瓷磁滞而引起的系统误差。选用反射率相差悬殊的 FBG 传感元有利于增加各传感元的测量范围。

## 2 可调 F-P 滤波器查询、解调的原理

对于 F-P 滤波器,调节腔长可选择不同的透过波长。若 F-P 腔由压电陶瓷驱动,且施加周

\* 香港研究资助局(RGC)资助项目(Polyu 5123/97E)。

\*\* 黑龙江大学理学院物理系,哈尔滨 150080。

收稿日期: 1999-06-08; 收到修改稿日期: 1999-07-19

期性的电压用以改变腔长,则可实现对确定区域的波长进行周期性的滤波扫描。

若选用的 F-P 滤波器具备 FBG 相当的带宽,施加的电压信号为均匀扫描着的周期性的锯齿波,受其调制,滤波器在自由程内进行波长扫描时的波长范围能够覆盖传感光栅及其经诱导后漂移了的全部布喇格波长,且来自传感光栅的信号滤波后经线性光电转换器转换成电信号,放大后输入示波器的 Y 端子,则示波器所显示的时序分布为传感光栅反射谱。此时光电转换器, F-P 滤波器和锯齿波信号发生器以及示波器组成的检测系统将执行光纤光谱仪的功能,它不仅可以对测量范围内各 FBG 传感元的波长信息进行依次查询,而且将所测波长信息与漂移前波长信息进行比较,得到各传感元的波长漂移量,利用漂移量与所测量间的变化关系,便可判断对应传感元件所感测物理量变化的大小,达到解调目的。

### 3 对波分复用传感器阵列查询的实验结果

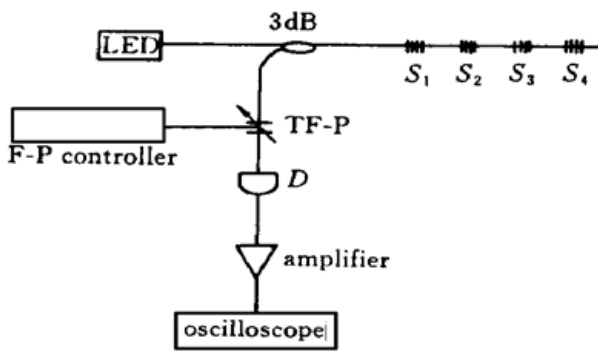


图 1 利用可调 F-P 滤波器进行查询、解调的 FBG 传感系统的实验装置图

F-P controller: 信号发生器; TF-P: 可调 F-P 滤波器;  
S<sub>1</sub> ~ S<sub>4</sub>: 传感光栅; 3 dB: 50·50 耦合器; D: 探测器

Fig. 1 Experimental setup for FBG sensor system interrogated and demodulated by a tunable F-P filter

F-P controller: electrical signal generator; TF-P: tunable F-P filter; S<sub>1</sub> ~ S<sub>4</sub>: sensor elements; 3 dB: 50·50 coupler; D: detector

实验装置见图 1 所示,待测传感器阵列由长度均为 10 mm 的 4 个串接光栅组成, 18℃ 时,自由状态下自左至右光栅的布喇格波长分别为 1540.06 nm, 1543.61 nm, 1546.63 nm 以及 1549.66 nm,其反射率分别为 19%, 99%, 42% 及 30%,光栅串的反射谱见图 2 所示,LED 发出的光波被传感光栅反射,经 3 dB 耦合器至 F-P 滤波器,探测器将滤波器的透射信号按光强大小线性地转换成电信号,放大器增益因子为  $1.65 \times 10^3$  V/mV,其输出端与示波器 Y 端子连接。

所使用的 TB2500 型可调 F-P 滤波器的自由光谱范围为 45.24 nm, 3 dB 带宽为 0.37 nm, 偏振灵敏度小于 0.1 dB; 室温下工作波长为 1550 nm 时其插入损耗小于 3 dB。受 HP811A 型信号发生器驱动,其对波长进行扫描滤波的范围随着锯齿波交流电压信号幅值的增加而增大,实验曲线见图 3 所示,对应的波长范围见表 1 所示。

表 1 施加外电场时滤波器扫描对应的起始波长和末了波长

Table 1 Beginning and ending wavelengths of the filter correspond to different applied voltages

V / V	0.00	3.00	4.50	6.00	7.00	9.00	11.00	15.00
Beginning wavelengths/nm	1551.0	1547.0	1545.4	1543.0	1542.0	1539.0	1537.0	1526.5
Ending wavelengths/nm	1551.0	1555.0	1558.0	1561.0	1562.0	1565.0	1569.0	1571.5

根据光栅的波长跨度和分布情况,结合图 3 和表 1 所示的实验结果, F-P 的控制电压幅值不应该低于 9 V; 考虑压电陶瓷对电压“反应”比较缓慢,因此控制信号的频率不应高于几千赫。实际采用锯齿波信号的电压幅值为 11 V, 频率为 1 Hz。

保持环境温度 18℃ 不变,上述装置对自由状态下 FBG 串查询的结果如图 4 (a) 所示。利

用图 2 对其定标可知为 1.5 nm/D。改变其中任一光栅(如  $S_2$ ) 的物理环境(如应变  $\epsilon_s$ )，其布喇格波长将发生变化，F-P 滤波系统查询结果如图 4 (b) 所示，而光谱仪显示的结果如图 5 所示，可见两者具备相同的变化趋势。

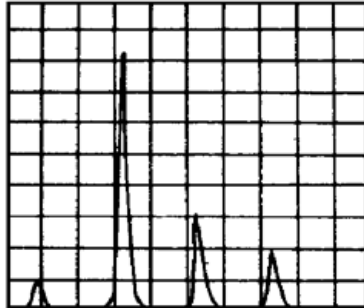


图 2 自由状态下 FBG 传感元件串的反射谱  
Fig. 2 Reflected spectrum of FBG sensor array

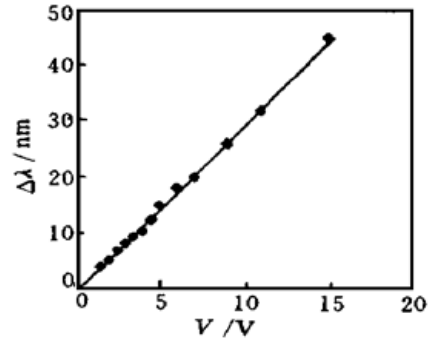


图 3 波长范围与电压间关系  
Fig. 3 Relationship between the scanning range of the filter and the applied voltage

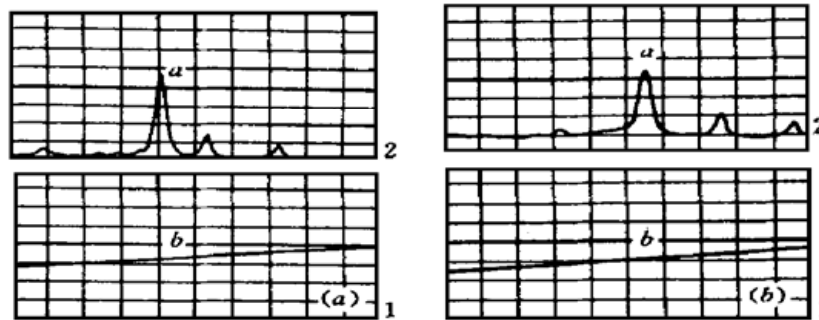


图 4 可调 F-P 滤波器对自由状态下的传感光栅串进行查询 (a) 和  $S_2$  受应变作用时 F-P 查询的结果 (b)  
a: 扫描滤波时探测器输出; b: 滤波器的控制信号。横轴: 10 ms/div, 纵轴: a 和 b 分别为 50 mV/div 和 4.00 V/div  
Fig. 4 Interrogation of the unstrained sensor array with the tunable F-P filter (a) and interrogation resulted of the sensor array while  $S_2$  was tensioned (b)

The horizontal scale is 10 ms/div, vertical, traces a and b are 50 mV/div and 4.00 V/div, respectively  
a: output of the detector in wavelength scanning mode; b: control signal of the filter

比较图 4 (a), (b) 可知应变前后  $S_2$  光栅的波长漂移量  $\Delta\lambda_B$  为 1.2 nm, 根据文献[7]  $\Delta\lambda_B = 0.78\lambda_B\epsilon_s$ , 它对应  $1.0 \times 10^3 \mu\epsilon$ , 而实际作用于  $S_2$  上的应变为  $1.1 \times 10^3 \mu\epsilon$ , 两者基本一致。图 6 中虚线为  $S_2$  光栅在不同应变作用下上述装置查询、解调后得到的实验曲线, 实线则为上式对应的理论曲线, 两者非常接近, 证实了上述查询方案的确可行。

传感光栅的反射率接近时, 被测物理量诱导的波长漂移量不能超过相邻光栅波长间隔的一半<sup>[1,3]</sup>, 否则易发生串音。这里介绍的反射率相差悬殊的传感光栅, 对任一传感元与相邻光栅谱位置重合时, 可从谱线的相对高低判断其实际分布, 因此将反射谱峰值的差异作为辅助标识, 使得被测范围增加至少一半。实验中传感元所能检测的应变范围为  $(-2.5, 2.5) \times 10^3 \mu\epsilon$ 。

从图 3 和表 1 可以看出, 如果各 FBG 传感元的布喇格波长依次相差 2 nm, 则上述系统具备查询 20 个以上 FBG 传感元件串的能力。结合复用技术, 系统的查询能力将会成倍增加, 它意味着该方案极具应用价值。

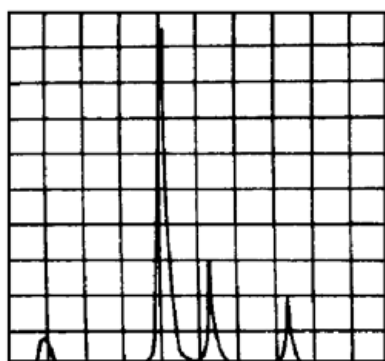


图 5  $S_2$  受应变作用时光谱仪测得的光栅串反射谱  
Fig. 5 Spectrum of the sensor array observed with an optical spectrum analyzer while  $S_2$  was tensioned

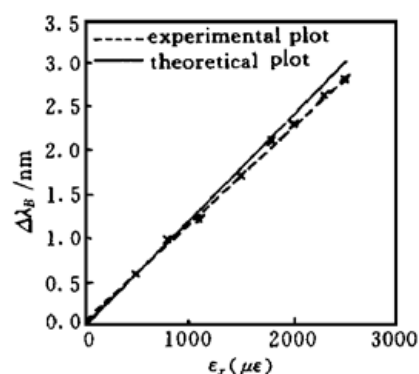


图 6 光栅  $S_2$  的波长漂移与所受应变关系  
Fig. 6 Experimental and theoretical plots of the wavelength-shifts of  $S_2$  vs the applied strain

## 4 结 论

用示波器观察可调 F-P 滤波器对传感元进行波长扫描时透射光强的时序分布,对四个 FBG 组成的传感元件串成功地进行了地址查询。选用反射率相差悬殊的传感光栅有利于增加测量范围。该装置具备查询复杂 FBG 传感网络的潜在能力,对皮蒙(Smart structure)技术实用化具有积极的推动作用。

## 参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1370~ 1372
- 2 D. A. Jackson, A. B. Lobo Ribeiro, L. Reekie *et al.*. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14): 1192~ 1194
- 3 M. A. Davis, A. D. Kersey. Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10): 822~ 823
- 4 A. D. Kersey, W. W. Morey. Multiplexed Bragg grating fibre-laser strain-sensor system with mode-locked interrogation. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1): 112~ 114
- 5 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Fiber-grating based strain sensor with phase sensitive detection. The 1st European Conf. on Smart Structures and Materials, Glasgow, 1992. 61~ 67
- 6 M. A. Davis, D. G. Bellemore, M. A. Putnam *et al.*. Interrogation of 60 fiber Bragg grating sensors with microstrain resolution capability. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(15): 1393~ 1394
- 7 Yu Youlong, Liu Zhiguo, Dong Xiaoyi *et al.*. Linear tuning of fiber Bragg grating based on a cantilever. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(5): 621~ 625 (in Chinese)

## Technique for Fiber Bragg Grating Array Interrogation with a Tunable Fabry-Perot Filter

Youlong Yu Hwayaw Tam Wenghong Chung

(Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

**Abstract** A four elements fiber Bragg grating sensing arrays has been interrogated using a tunable Fabry-Perot filter acted as a wavelength scanner and an oscilloscope and a photodetector to monitor the distribution of the transmitted intensity in time domain. The sensing signal can be demodulated by comparing the shifted and unshifted spectra and the results are in good agreement with the prospected values. The measured range of the sensing elements can be improved by choosing the gratings with larger reflectivity difference.

**Key words** fiber Bragg grating, sensor array, interrogation technique