

文章编号: 0258-702X(2002)02-0131-04

# 有源波、空分复用光纤光栅传感网络

余有龙<sup>1,2</sup>, 谭华耀<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 黑龙江大学光纤技术研究所, 黑龙江哈尔滨 150080; <sup>2</sup> 香港理工大学电机工程系, 香港)

**摘要** 借助  $1 \times 3$  光开关和可调 F-P 滤波器对充当环形腔激光器端镜的  $3 \times 10$  空、波分复用光纤光栅传感器阵列进行查询, 用非平衡 Michelson 扫描干涉仪将来自传感光栅的波长漂移信息变为相移信息实现解调, 实验证实系统的应变传感灵敏度为  $1.6817 \text{ Deg}/\mu\epsilon$ , 与理论值  $1.6843 \text{ Deg}/\mu\epsilon$  非常吻合。锁定来自某一光栅的信号后, 反馈装置保证系统具备自动追踪感测信号的能力。

**关键词** 光纤光栅, 传感网络, 空分复用, 波分复用, 环形腔光纤激光器, 干涉解调, F-P 滤波, 有源传感

**中图分类号** TN 253      **文献标识码** A

## Active Spatial/Wavelength-Division Multiplexed Fiber Bragg Grating Sensor System

YU You-long<sup>1,2</sup>, TAM Hwayaw<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *Research Institute of Fiber Optics, Heilongjiang University, Harbin 150080*  
<sup>2</sup> *Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong*)

**Abstract** A spatial/wavelength-division multiplexed  $3 \times 10$  fiber Bragg grating sensor array, acted as the reflector of a ring-cavity fiber laser, was interrogated by employing a  $1 \times 3$  optical switch and a tunable F-P filter. Demodulation was achieved by using an unbalanced Michelson scanning interferometer that transform the wavelength-shift signal induced by the measured strain into phase-shift signal. The sensor sensitivity of the system was demonstrated to be  $1.6817 \text{ Deg}/\mu\epsilon$ , which agree with the theoretical value of  $1.6843 \text{ Deg}/\mu\epsilon$  well. A feedback subsystem was introduced to make the system track the measuring channel automatically.

**Key words** fiber Bragg grating, sensor network, spatial-division multiplexing, wavelength-division multiplexing, ring-cavity fiber laser, interferometric demodulation, F-P filtering, active sensor

## 1 引言

山体、各类建筑物或航行器受突发灾害以及自然蜕化影响引起的结构损伤, 对人类来说均构成威胁。借助适当的装置, 对监测对象的内应力、温度、振动、位移等物理量进行实时观察, 对结构完整性作出判别, 从而具备预警功能, 显然, 该技术能增强人类抵抗灾害侵袭的能力。采用波长编码、具备网络化处理能力的光纤光栅 (FBG) 传感网络是完成上述功能的理想途径。本征型的该类传感器免受电磁场干扰, 传感结果不受光强和光路损耗的影响, 它易于

植入, 或附着在结构的表面, 对结构的力学性能几乎没有影响。分布式节点型为特征的 FBG 网络化技术时有报道<sup>[1~7]</sup>, 地址查询和信号解调是其实用化面临的两个关键技术, 已报道的查询方案中, 无源查询方式<sup>[1~5]</sup>受限于光源能量, 复用数目有限, 较低的信噪比削弱了传感器在噪音环境中精确传感的能力。有源查询方式<sup>[6,7]</sup>将能量集中于单一波长, 信噪比提高的同时, 也增加系统查询更多光栅的能力, 目前其信号解调只停留在滤波法<sup>[6]</sup>, 甚至是直接用光谱仪观察<sup>[7]</sup>, 传感精度有待提高。

收稿日期 2000-12-05; 收到修改稿日期 2001-02-19

基金项目: 香港研究资助局 (RGC) 资助项目 (Polyu 5123/97E) 及国家自然科学基金与中国节能投资公司联合基金的部分资助 (批准号 60177029)。

作者简介: 余有龙 (1965—), 男, 安徽桐城人, 黑龙江大学光纤技术研究所教授, 博士, 主要从事光纤通信与传感研究。E-mail: youlongyu@hotmail.com

本文用  $1 \times 3$  光开关、借助可调 F-P 滤波器对充当环形腔光纤激光器端镜的  $3 \times 10$  FBG 传感器阵列进行寻址,利用非平衡 Michelson 干涉仪<sup>[4]</sup>解调,对应变进行了高精度的空、波分复合复用传感。

## 2 原理

受 1480 nm 激光激发,掺铒光纤(EDF)铒原子中的电子在不同能级间跃迁(如  $4I_{13/2} - 4I_{15/2}$ ),释放波长在 1550 nm 附近的光子,形成带宽约几十个纳米的自发辐射。FBG 作为环形腔端镜时,辐射光经布喇格反射后借助耦合器,通过 F-P 滤波器和隔离器后经 EDF 放大至 WDM 耦合器,形成闭合回路。这样辐射光的每一次循环,其能量均得到加强。受压电陶瓷驱动,F-P 腔中内置的可旋转平行介质板的倾角发生变化,从而改变滤波器透过波长。波分复用光栅串作端镜,当滤波器透过波长与某一传感光栅的布喇格波长一致时,只要抽运光强度超过阈值,对应腔中便建立相应的“环形振荡”,以至产生布喇格波长的激光输出。改变控制电压就可通过波长调节对传感光栅进行地址查询。用  $1 \times N$  光开关将信号在  $N$  个匹配光栅串间切换,则系统可查询光栅的数目将增至  $N$  倍,并成为空、波分复合复用传感系统。

应变通过对光栅常数的影响和弹光效应引起 FBG 反射波长  $\lambda_{Bij}$  发生漂移( $\Delta\lambda_{Bij}$ ),对应的激光输出若用作非平衡扫描 Michelson 干涉仪的光源,则波长漂移引起干涉仪输出的附加相移( $\Delta\Phi_{ij}$ )可表示成<sup>[4]</sup>

$$\Delta\Phi_{ij} = -\frac{4\pi nL(1 - P_e)}{\lambda_{Bij}} \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

其中  $\varepsilon_{ij}$  为作用于第  $i$  行  $j$  列光栅上的待测应变,  $P_e$  为光纤介质的有效弹光系数,  $L$  为臂长差,  $n$  为折射率。因此观测相移值便可判断待测应变的大小,实现对传感信号的解调。

## 3 实验结果

实验装置见图 1 所示,阈值电流为 38 mA 的 1480 nm 激光器的功率  $I_p$  可达 130 mW, 铒光纤长度为 25 m, 环形腔中其他光纤长度为 12 m,  $C_1$  与  $G_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 间纤长  $\sim 2$  m。匹配光栅串自左至右光栅的布喇格波长依次为 1541.250, 1543.725, 1545.950, 1547.950, 1550.250, 1552.650, 1555.550, 1557.750, 1560.100 以及 1562.400 nm, 光栅的半宽  $\sim 0.2$  nm,

反射率为 80% ~ 90%, 相邻光栅间距离  $\sim 0.5$  m。  $C_1$  左侧环路的衰减量为 37.5 dB, 其中铒光纤吸收为 30.3 dB。隔离器插入损耗均为 0.4 dB, 隔离度  $\sim 42$  dB。  $IS_1$  用于规定光在腔中沿顺时针方向循环, 而  $IS_2$  用于阻止光从干涉仪返回激光腔, 可调 F-P 滤波器的插入损耗小于 3 dB, 用来将光信号注入待查询光栅所在光栅串的  $1 \times 3$  光开关的插入损耗  $\sim 1$  dB。干涉仪和 F-P 滤波器工作环境的温度受到严格控制, 温控精度达 0.02℃。

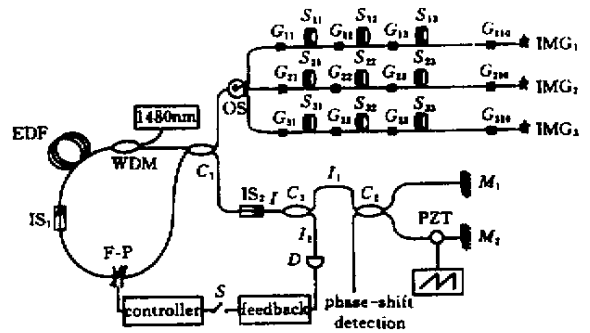


图 1 基于环形腔光纤激光器的光纤光栅传感器阵列查询装置

$G_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 10$ ): 光纤光栅;  $IS$  ( $i = 1, 2$ ): 隔离器;  $C$  ( $i = 1, 2$ ): 3 dB 耦合器;  $C_3$ : 10:90 耦合器;  $M$  ( $i = 1, 2$ ): 反射镜; EDF: 掺铒光纤;  $D$ : 探测器;  $IMG$  ( $i = 1, 2, 3$ ): 匹配液

Fig. 1 Setup for interrogating fiber Bragg grating sensor array using fiber ring-laser

$G_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 10$ ): fiber Bragg grating;  $IS$  ( $i = 1, 2$ ): isolator;  $C$  ( $i = 1, 2$ ): 3 dB coupler;  $C_3$ : 10:90 coupler;  $M$  ( $i = 1, 2$ ): mirror; EDF: erbium-doped fiber;  $D$ : detector;  $IMG$  ( $i = 1, 2, 3$ ): index matched glue

### 3.1 F-P 滤波器透过波长与控制电压间的关系

所用 F-P 滤波器的自由光谱范围为 45 nm, 带宽为 0.37 nm, 可调范围为 [1530, 1575] nm。调节 F-P 的控制电压, 其透过波长随电压增加向长波长方向移动, 图 2 为电压由 0 V 增至 12 V 过程中记下的两者关系的实验曲线, 它说明调节控制电压可选择腔中传输光波的波长。

### 3.2 可调激光寻址

$I_p$  大于 19.2 mW 时, 设置控制电压为 3.48, 4.25, 4.95, 5.50, 6.18, 6.86, 7.72, 8.28, 8.95 以及 9.60 V 时, 激光器输出端依次出现对应  $G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{i10}$  布喇格波长的激光(图 3 所示), 从而证实其波长寻址的功能。其中  $G_{i2}$  对应激光阈值最大, 为 19.2

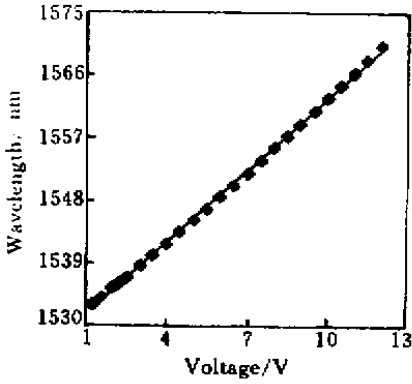


图 2 F-P 滤波器的透过波长与控制电压间关系

Fig.2 Relationship between the transmitted wavelength of the F-P filter and the applied voltage

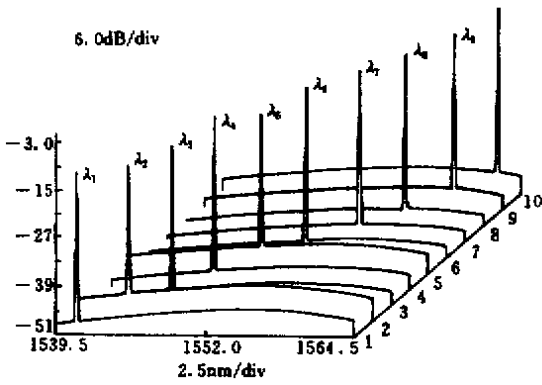


图 3  $I_p = 23.6$  mW 时改变控制电压得到的不同波长输出

Fig.3 Fiber laser spectra for  $I_p = 23.6$  mW at various applied voltages

mW。各波长处激光输出的斜效率  $\sim 9\%$  ,半宽  $\sim 0.018$  nm ,抽运功率为 23.6 mW 时 ,平均功率  $\sim 2$  mW。

查询某一光栅时 ,保持该光栅的环境温度基本不变 ,应变引起的波长漂移导致反射波长偏离 F-P 透过波长 ,从而降低激光输出以至为零 ,显然它将减小系统的测量范围并削弱其实用价值。为克服此弊端 ,设计一反馈控制装置 ,  $C_3$  弱光端的  $I_2$  用作反馈信号 ,提供给 F-P 控制器 ,使其自动调整控制电压的大小 ,以追踪  $I_2$  的最大值 ,从而保证系统具备锁定感测信号的功能 ,增加测量范围。实验证实其追踪范围可覆盖 F-P 的自由光谱范围。

### 3.3 干涉解调

非平衡 Michelson 干涉仪的平均臂长为 106 cm ,臂长差  $L = 3.2$  mm ,光纤介质的折射率为 1.4489 ,

两端镜的反射率均接近 90% ,条纹的对比度为 0.3。系统对各光栅的查询和解调操作是一样的。对其中任一光栅 (如  $G_{23}$ ) 断开  $S$  ,将控制电压调到 4.95 V 有波长为 1545.950 nm 的激光输出。闭合开关  $S$  ,拉伸  $G_{23}$  所在光纤至应变为  $585 \mu\epsilon$  ,布喇格波长出现 0.7 nm 的漂移 ,而控制电压值从 4.95 V 自动调整为 5.15 V。用示波器观察系统输出 ,图 4 显示条纹随应力增加而右移 ,此乃应变引起波长漂移诱使干涉输出出现相移所致。图 5 是用相位计测得的相移随应变变化关系的实验曲线 ,两者呈直线关系 ,斜率  $1.6817 \text{ Deg}/\mu\epsilon$  是系统传感灵敏度的实验值 ,取  $P_e = 0.22$  (1) 式确定的理论值为  $1.6843 \text{ Deg}/\mu\epsilon$  ,两者基本一致 ,从而证实了系统的解调能力。

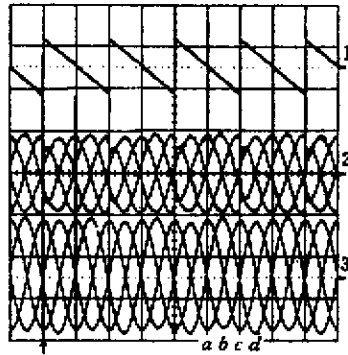


图 4 不同应力作用于  $G_{23}$  时对应的干涉仪输出  
横坐标 5 ms/div 纵坐标 :1 为 10 V/div 2,3 均为 2 V/div  
1 :PZT 驱动信号 2 :干涉仪输出 ;  
3 经 95 ,105 ] Hz 的带通滤波器后的输出

Fig.4 Output traces of the interferometer for different strain applied at  $G_{23}$

horizontal scale is 5 ms/div ; vertical , trace 1 is 10 V/div , both trace 2 and trace 3 are 2 V/div ; Trace 1 : PZT driving signal ; trace 2 : the output of the interferometer ; trace 3 : trace 2 filtered with a [ 95 ,105 ] Hz band-pass filter

$a : \epsilon_{23} = 0 \mu\epsilon ; b : \epsilon_{23} = 53 \mu\epsilon ; c : \epsilon_{23} = 107 \mu\epsilon ; d : \epsilon_{23} = 157 \mu\epsilon$

系统的查询能力取决于 F-P 的调谐范围和 FBG 传感元间的波长间隔以及 EDF 的谱宽 ,传感分辨率取决于干涉仪的臂长差以及相位计的角分辨率。裸纤光栅的应变承受能力可达  $\sim 10^4 \mu\epsilon$  ,因此系统的测量范围取决于 FBG 的波长间隔 ,若其值为 2 nm ,系统可查询的各串光栅的数目应该不下 20 ,以  $\Delta\lambda_{Bij}$  不超过波长间隔的一半为被测应变范围的判据 ,此时系统的测量范围是  $[- 800 , 800 ] \mu\epsilon$ 。所用相位计的分辨率为 0.01 Deg ,系统具备鉴别  $\sim 6$  ne 的能力。选取较窄带宽的 F-P 滤波器便于减少输出激光的模式 ,从而有利于提高输出信号的信噪比。

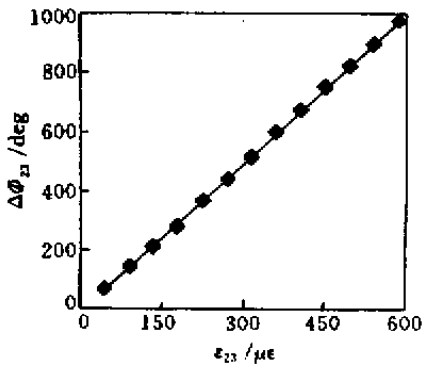


图5  $\Delta\Phi_{23}$  随  $\epsilon_{23}$  变化关系的实验曲线

Fig.5 Experimental plot of  $\Delta\Phi_{23}$  vs  $\epsilon_{23}$

### 3 结 论

借助  $1 \times 3$  光开关和可调 F-P 滤波器选择通道, 对充当环形腔激光器端镜的  $3 \times 10$  传感光栅阵列进行了查询, 用非平衡 Michelson 扫描干涉仪对传感信号进行解调, 系统传感灵敏度的实验值为  $1.6817 \text{ Deg}/\mu\epsilon$ 。锁定来自某一光栅的信号后, 系统具备自动追踪感测信号的能力。磁滞将影响 F-P 滤波器工作的复现性, 查询时对电压值做适当的修正是必要的, 选用线性度较高的驱动元件取代压电陶瓷可使此问题得到解决。该有源传感方式解决了无源传感技术中光源能量相对较弱的问题, 为密集波分复用 (DWDM) 传感系统的实现奠定了基础; 同时它不需要时分复用<sup>[4]</sup> (TDM) 传感技术中的延时光纤, 便于网络铺设, 减小了传输损耗, 更具实用性。有源输出有较长的相干长度, 有利于提高干涉解调的传感分辨率。采用匹配光栅串, 将成栅所需模板的数目降到最小, 降低成本的同时也便于替换损伤的光栅串。该技术可应用于对大型建筑设施(如水库大坝等)进行分布式二维或三维监测, 并使皮蒙 (Smart structure) 技术成为现实。

致谢 对哈尔滨工业大学物理电子学博士后流动站以及王骥教授的支持表示感谢。

### 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 [J]. *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 [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14):1192~1194
- 3 M. A. Davis, A. D. Kersey. Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10):822~823

- 4 Yu Youlong, Tam Hwayaw, Ho Hoilut *et al.*. Time-domain addressing technique for a single-channel output and high-resolution fiber Bragg grating sensor system [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(7):874~877 (in Chinese)
- 5 M. A. Davis, A. D. Kersey. Application of a fiber Fourier transform spectrometer to the detection of wavelength encoded signals from Bragg grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7):1289~1295
- 6 A. D. Kersey, W. W. Morey. Multiplexed Bragg grating fibre-laser strain-sensor system with mode-locked interrogation [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1):112~114
- 7 G. A. Ball, W. W. Morey, P. K. Cheo. Single- and multipoint fiber-laser sensors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(2):267~270