

文章编号: 0258-7025(2001)09-0845-04

# 光纤光栅传感器阵列时域地址查询的信号处理技术\*

余有龙\*\* 谭华耀 鍾永康  
(香港理工大学电机工程系 香港)

**摘要** 用电光调制器将连续光波调制成脉冲光波,借助非平衡 Michelson 扫描干涉仪将波长漂移信息变为相移信息,来自各传感元的信号利用程控延时信号对电子开关通导的控制来实现时域地址查询,经带通滤波处理,用相位计监测相移进而判断应变的大小。实验证实分辨率为 6 nr 的 4 光栅系统传感灵敏度的实验值为 1.63 Deg/ $\mu\epsilon$ 。

**关键词** 光纤光栅,传感网络,时域地址查询,信号处理

**中图分类号** TP 212.1 **文献标识码** A

## Information Processing Technique for Time-domain Addressing Fiber Bragg Grating Sensor Array

YU You-long TAM Hwayaw CHUNG Weng-hong

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

**Abstract** An electro-optical modulator was introduced to modulate the continuous light wave into pulses. An unbalance Michelson scanning interferometer was employed to transform the wavelength-shift signal reflected by the Bragg gratings to phase-shift signal. Signal coming from each sensor element was selected by controlling the on-off state of an electrical switch with a programmable delay signal generator and, therefore interrogation for time-domain addressing was achieved. Filtered with a band-pass filter, the measured strain can be judged by monitoring the phase-shift with a phase meter. Experiment demonstrated that the sensitivity of the 4-element sensor system, which was with a resolution of 6 nr, was 1.63 Deg/ $\mu\epsilon$ .

**Key words** fiber Bragg grating, sensor array, time-domain addressing, information processing

## 1 引言

随着成栅技术的日趋完善和复用技术的发展,分布式节点型为特征的光纤光栅(FBG)传感网络正由梦想而逐渐成为现实。该技术将波长编码的诸多 FBG 传感元结合起来协同工作,对温度、应变或其他物理量进行网络化监测,提高了该类传感器的性能价格比,这是其他类型传感器不可替代的,并因其在国防和民用工业中有广阔的应用前景而倍受人们青睐。多光栅传感系统中的信号处理技术是 FBG 传感网络实用化的关键,曾尝试过用不同途径来解决这个问题<sup>[1-5]</sup>,它们虽在一定程度上解决了某些

问题,但在增加查询地址数目和提高传感分辨率方面难以同时满足要求,因此有必要进行更深入的研究。

本文借助调制器将连续光波调制成脉冲光波,经光栅串反射后成为含有感测信息的脉冲信号,借助扫描 Michelson 干涉仪对其解调,通过放大、滤波处理,并用程控延时信号控制电子开关实现时域地址查询。

## 2 原理

来自宽带光源的频率为  $f$  的光束经强度型调制器调制后成为占空比为  $\rho$  的脉冲光波,用作栅长为  $l$  的  $m$  个光栅组成的光栅串的照明光源,假设这些光栅反射率相等、带宽接近,沿光纤呈等光程  $D$  分布,纤芯折射率为  $n$ ,真空中光速为  $c$ ,脉冲进入臂长差

\* 香港研究资助局(RGC)资助项目(Polyu 5123/97E)。

\*\* 任职于黑龙江大学物理系(150080)和哈尔滨工业大学光电子技术研究所(哈尔滨 150001)。

收稿日期:2000-06-14; 收到修改稿日期:2000-08-14

为  $L$  的非平衡 Michelson 干涉仪, 单个光栅反射的强度分布函数用  $i(t)$  表示, 若  $f < c/2(m-1)D$ ,  $\rho < 2(f/c)(D-nl)$ , 则输出光强可表示为

$$\text{comb}(ft) \times \left\{ F(\lambda) \left[ \text{comb}\left(\frac{ct}{D}\right) \times i(t) \right] \text{rect}\left(\frac{ct}{mD}\right) \right\} \times [1 + k(\lambda)\cos(\psi + \Delta\psi)] \quad (1)$$

其中  $F(\lambda)$  与谱函数有关,  $k(\lambda)$  为  $\lambda$  波长光波对应干涉条纹的可见度,  $\psi$  为对应波长照射时两臂间的静态相差, 而  $\Delta\psi$  为动态相移, 它与入射波长及程差的变化有关, 可表示成

$$\Delta\psi = \Delta\psi|_s + \Delta\psi|_L \quad (2)$$

其中 
$$\Delta\psi|_s = -\frac{4\pi nL}{\lambda}(1-P_s)\epsilon \quad (3)$$

假设程差变化由短臂缠绕在压电陶瓷 (PZT) 上造成, PZT 受周期为  $T$  的锯齿波信号驱动 ( $T \gg 1/f$ ), 其伸缩幅度为  $\Delta L_0$ , 则

$$\Delta\psi|_L = -\frac{4\pi n\Delta L_0}{\lambda T} \text{comb}\left(\frac{t}{T}\right) \times \left[ t \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \right] \quad (4)$$

经探测器接收后线性地转换为电信号, 其表达式与 (1) 式除相差一个常数因子外应该一致。引入一通导时间为  $\tau$  (光栅反射的脉宽  $< \tau < D/c$ ) 传播函数为  $\text{rect}\left(\frac{t-t_i}{\tau}\right)$  的受控高频电子开关, 其中延时量  $t_i = t_0 + \frac{(i-1)D}{c}$ , ( $i = 1, 2, \dots, m$ ),  $t_0$  对应信号由第一个光栅反射沿不同路径达开关位置的时差, 则开关只允许光源各脉冲产生的  $m$  个反射脉冲中第  $i$  个通过, 其输出信号为

$$\text{comb}(ft) \times \left[ F(\lambda_i) i(t-t_i) \text{rect}\left(\frac{ct}{mD}\right) \right] \times [1 + k(\lambda_i)\cos(\psi_i + \Delta\psi_i)] \quad (5)$$

引入带通滤波器, 假设其通导频率与 PZT 驱动频率一致, 滤波后的信号函数

$$I \propto F(\lambda_i) [1 + k(\lambda_i)\cos(\psi_i + \Delta\psi_i)] \quad (6)$$

作为待测信号, 与参考信号 (PZT 驱动信号) 一起输入相位计, 若

$$2n\Delta L_0 = \lambda_i \quad (7)$$

则相位计显示值的变化反应的正是  $\Delta\psi_i|_s$ , 利用 (3) 式便可判断  $i$  光栅上的待测应变  $\epsilon_i$  的大小。改变  $t_i$  值同样可以监测作用在其他光栅上的应变。

### 3 实验结果

图 1 所示的装置中, 掺铒光纤放大自发辐射源

(ASE) 的输出功率为 2.75 mW, 单个脉冲经光栅反射后形成一系列脉冲, 被耦合进一非平衡全光纤 Michelson 扫描干涉仪。干涉仪的输出信号经探测器转换为电信号并放大后至受程控延时信号控制的电子开关, 选择通导、滤波后成为待测信号, 用相位计监测其相移情况。示波器的三个输入端子分别与参考信号、待测信号以及滤波前的待测信号连接, 用以观察条纹间的相对移动。

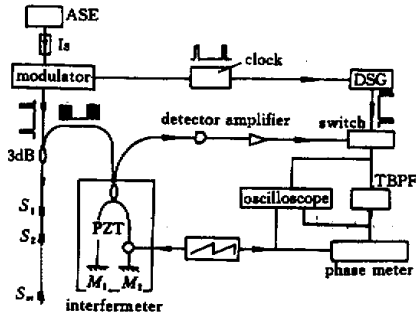


图 1 实验装置图

$M_i$  ( $i = 1, 2$ ); 反射镜;  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ); 传感元; ASE; 放大自发辐射源;  $I_s$ ; 隔离器; 3 dB, 50:50 耦合器; TBPF; 可调带通滤波器; DSG; 延时信号发生器

Fig. 1 Experimental set-up

$M_i$  ( $i = 1, 2$ ); mirror;  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ); sensor element; ASE; amplified spontaneous emission;  $I_s$ ; isolator; 3 dB, 50:50 coupler; TBPF; tunable band-pass filter; DSG; delay signal generator

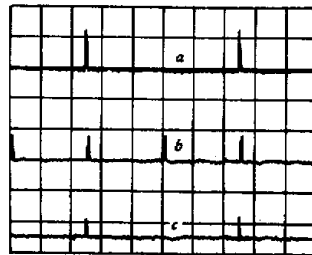


图 2 不同信号

a. 时钟信号; b. 延时信号; c. 光脉冲

Fig. 2 Different signals

a. clock signal; b. delayed signal; c. optical pulse

隔离器用来阻止光返回光源。时钟信号用于控制调制器和延时信号发生器, 设置其频率为 200 kHz, 占空比为 0.01, 电压峰峰值为 3 V, 直流电平为 1.5 V。调制器的消光比为 37.5 dB, 插入损耗为 3.6 dB, 调制后 ASE 输出的脉冲信号见图 2 (c) 所

示。延时器发出峰峰值为 $3\text{ V}$ 的脉冲信号(图2(b)所示)。光栅串由栅长均为 $1\text{ cm}$ ,布喇格波长分别为 $1553.54\text{ nm}$ , $1556.05\text{ nm}$ , $1558.65\text{ nm}$ 和 $1563.05\text{ nm}$ ,彼此间距为 $10\text{ m}$ 的4个光栅组成,带宽接近 $0.2\text{ nm}$ 。起解调作用的干涉仪的平均臂长为 $106\text{ cm}$ , $L = 3.2\text{ mm}$ , $n = 1.4489$ ,两端镜的反射率相等接近 $90\%$ ,条纹的对比度为 $0.3$ 。放大器增益达 $1.9 \times 10^7\text{ V/W}$ 。PZT驱动信号为 $80\text{ Hz}$ , $\rho$ 接近 $1$ 的锯齿波。用于寻址的电子开关受高电平控制处于通导状态,而低电平时处于关闭状态。相位

计的分辨率为 $0.01^\circ$ 。

考察任一光栅(如 $S_2$ )上的应变可验证我们的信号处理技术,该光栅的带宽为 $0.23\text{ nm}$ 。探测器接收的来自各光栅的信息交织在一起,设置 $t_2 = 160.4\text{ ns}$ (图2(b)所示)(其中 $98.5\text{ ns}$ 为 $S_1, S_2$ 光栅反射脉冲的间隔, $61.9\text{ ns}$ 为 $t_0$ 值),使得开关开启时各串反射脉冲中只有来自 $S_2$ 光栅的信号通过,其他光栅的信号均被阻隔。开关输出信号频率与调制频率一致(见图3中的线1和4)。

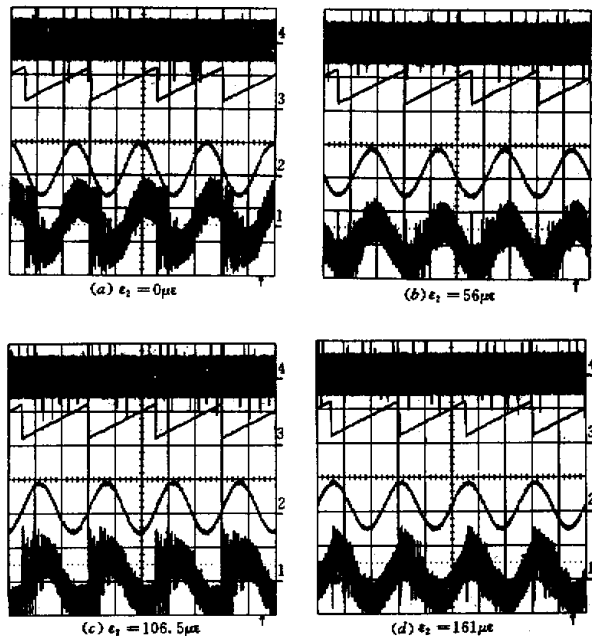


图3

1:开关输出;2:滤波器输出;3:PZT驱动信号;4:时钟信号

横坐标为 $5\text{ ms/div}$ ,纵坐标1和2均为 $50\text{ mV/div}$ ,3和4分别为 $10.00$ 和 $1.00\text{ V/div}$

Fig.3

1: output of the switch; 2: output of the filter; 3: drive signal of PZT; 4: clock signal

The horizontal scale is  $5\text{ ms/div}$ , vertical, trace 1 and 2 are  $50\text{ mV/div}$ , trace 3 and 4 are  $10.00$  and  $1.00\text{ V/div}$ , respectively

严格地说占空比等于 $1$ 的锯齿波信号是不存在的,下降沿对应的高频信号将成为噪声(图3中线3下降沿对应线1上的部分),需进行滤波处理,调节带通滤波器通导的频率范围,不难观察到高、低频接近 $1/T$ 时线1变得逐渐平滑。图4中线1和2分别为 $[30, 100]\text{ Hz}$ 和 $[75, 85]\text{ Hz}$ 的滤波结果,线1的突变部分显示滤波不彻底。

调节锯齿波电压信号的幅值和直流电平,当其峰峰值为 $11.1\text{ V}$ ,直流电平为 $10.75\text{ V}$ 时,若无外界干扰,相位计读数仅取决于待测应变,此时 $\Delta L_0$ 的实际值为 $0.61\mu\text{m}$ ,而(7)式确定的理论值为 $0.54\mu\text{m}$ ,两者间些许出入与光纤在PZT上缠绕质量以及磁滞效应<sup>[6]</sup>有关。随着 $\varepsilon_2$ 的增加,示波器显示待测信号对应的条纹左移(见图3(a)~(d)所示),而

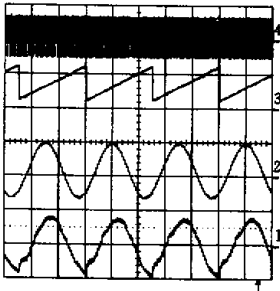


图 4  $\epsilon_2 = 82 \mu\epsilon$  时可调带通滤波器输出

横坐标为 5 ms/div, 纵坐标 1 和 2 均为 50 mV/div, 3 和 4 分别为 10.00 和 1.00 V/div. 1 和 2 可调带通滤波器的范围分别是 [30, 100] Hz 和 [75, 85] Hz; 3: PZT 驱动信号; 4: 调制器控制信号

Fig. 4 Output of the tunable band-pass filter for  $\epsilon_2 = 82 \mu\epsilon$ . The horizontal scale is 5 ms/div, vertical, trace 1 and 2 are 50 mV/div, trace 3 and 4 are 10.00 and 1.00 V/div, respectively. 1: frequency range of TBPF is [30, 100] Hz; 2: frequency range of TBPF is [75, 85] Hz; 3: drive signal of PZT; 4: control signal of the modulator

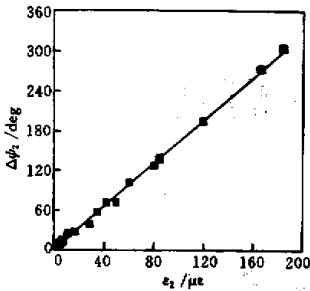


图 5  $\Delta\phi_2$  随  $\epsilon_w$  变化关系的实验曲线

Fig. 5 Experimental plot of  $\Delta\phi_2$  vs  $\epsilon_2$

相位计显示相移值呈增加趋势, 图 5 为相移随应变变化关系的实验曲线, 其斜率  $1.63 \text{ Deg}/\mu\epsilon$  是本系统传感灵敏度的实验值, 取  $P_1 = 0.22^{[7]}$ , (3) 式确定的理论值为  $1.67 \text{ Deg}/\mu\epsilon$ , 少许差别乃温度影响所致, 另外所用光纤  $P_1$  的实际值与引用值不完全一致以及应变读数误差都与之有关。

设置延时值为 61.9 ns, 260.3 ns 以及 359.7 ns

时, 可分别查询  $S_1, S_3, S_4$  上的应变信息, 可见上述信号处理技术具备查询和解调 FBG 传感网络信号的能力。系统分辨率主要取决于干涉仪和相位计, 其值为  $6 \text{ ne}$ 。

## 4 结 论

利用程控延时信号控制电子开关的导通, 对四个不同波长光栅组成的光栅串进行了时域地址查询。借助非平衡 Michelson 干涉仪将波长漂移信息变为相移信息, 从而对静应变信息进行解调, 系统的传感分辨率为  $6 \text{ ne}$ , 而灵敏度的实验值为  $1.63 \text{ Deg}/\mu\epsilon$ 。该技术的查询能力取决于相邻光栅间距、脉冲信号的占空比, 还与探测器的响应速度有关。优化系统结构, 有利于增加查询数目、提高传感分辨率。这种多节点型应力传感系统的光纤网络可以非常方便地植入复合材料或其他结构的内部, 以准分布的方式检测内部应力或温度的分布, 具有实际使用价值和广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 M. A. Davis, A. D. Kersey. Matched-filter interrogation technique for fiber Bragg grating arrays. *Electron. Lett.*, 1995, 31(10): 822~823
- 2 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
- 3 R. S. Weis, A. D. Kersey, T. A. Berkoff. A four-element fiber grating sensor array with phase-sensitive detection. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1994, 16(12): 1469~1472
- 4 Y. J. Rao, A. B. L. Ribeiro, D. A. Jackson et al.. Combined spatial- and time-division-multiplexing scheme for fiber grating sensors with drift-compensated phase-sensitive detection. *Opt. Lett.*, 1995, 20(20): 2149~2151
- 5 A. D. Kersey, W. W. Morey. Multiplexed Bragg grating fiber-laser strain-sensor system with mode-locked interrogation. *Electron. Lett.*, 1993, 29(1): 112~114
- 6 A. P. Dorey, J. H. Moores. *Advances in Actuator*. Bristol and Philadelphia: Inst. of Phys. Publishing, 1995. Chapter 6
- 7 G. A. Ball, W. W. Morey. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 1992, 17(6): 420~422