

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0874-04

高分辨率单信道输出的光纤光栅传感系统 时域地址查询技术*

余有龙** 谭华耀 何海律 锤永康
(香港理工大学电机工程系, 香港)

摘要: 脉冲宽带光源发出的光波进入 4 个光栅组成的光栅串时, 根据传感元间光纤延时程度的差别进行时域地址查询, 借助非平衡迈克耳孙(Michelson)扫描干涉仪对传感信息进行解调, 系统的应变传感分辨率为 6 ne, 而灵敏度的实验值为 $1.63^\circ/\mu\epsilon_0$.

关键词: 光纤光栅; 传感网络; 时域地址查询; 干涉解调; 单信道输出

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

光纤光栅(FBG)传感器采用波长编码, 可以用来对不同的物理量进行高精度感测^[1~4]。单光栅的传感系统由于价格昂贵而难以被人接受, 若将诸多传感光栅组合起来协同工作^[3,5,6]进行网络式监测, 不仅可以提高系统的性能价格比, 且使得分布式节点型传感变为现实, 是其它传感器不可替代的。查询和解调是光纤光栅传感器网络化的两个关键技术, 已经报道的查询方法有滤波法^[6]、时域地址查询法^[5]、波长扫描法^[3]、锁模法^[7]以及色散法^[8]等, 其中时域地址查询是一种比较实用的网络信息查询方式, 而干涉解调^[9]技术几乎可以获得极限分辨率, 本文将两种技术结合起来, 用非平衡迈克耳孙干涉仪对传感光栅反射的脉冲信号进行解调, 利用程控延时开关选择被测信息并用单一信道输出, 结合带通滤波技术, 对应变进行高分辨率传感。

2 原 理

待测应变作用于传感光栅时将引起布拉格波长发生漂移, 漂移量是反映待测应变大小的重要参数, 其大小需借助解调装置才能确定。诸多光栅协同工作时还需区分来自不同光栅的各自信息即地址查询, 否则无法判断网络的哪个节点位置受应变作用。

m 个不同波长的光波进入臂长差为 L 的非平衡迈克耳孙干涉仪, 其输出光强可表示为

$$I = \sum_{i=1}^m I_{i0} [1 + k_i \cos(\phi_i + \Delta\phi_i)], \quad (1)$$

其中 I_{i0} 是波长为 λ_i 的入射光波的强度; k_i 为对应干涉条纹的可见度, 强度相等的两束光干涉时, k_i 取决于光波的相干长度和干涉仪两臂间的光程差; ϕ_i 为对应波长照射时两臂间的静态相位差, 而 $\Delta\phi_i$ 为动态相移, 它与入射波长和程差的变化有关, 可表示为

$$\Delta\phi_i = \Delta\phi_i|_{\lambda_i^+} + \Delta\phi_i|_L. \quad (2)$$

其中入射波长变化引起的动态相移为

$$\Delta\phi_i|_{\lambda_i} = -\frac{4\pi nL}{\lambda_i^2} \Delta\lambda_i. \quad (3)$$

将短臂缠在受锯齿波信号驱动的压电陶瓷(PZT)上, 臂长差的扰动(ΔL)可表示为

$$\Delta L = -\frac{2\Delta L_0}{T} \text{comb}\left(\frac{t}{T}\right) \otimes \left[t \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)\right], \quad (4)$$

其中 \otimes 是卷积符号, T 为压电陶瓷驱动信号的周期, ΔL_0 为扰动的幅度。该扰动引起的动态相移为

$$\Delta\phi_i|_L = -\frac{2\pi n}{\lambda_i} \Delta L = -\frac{4\pi n \Delta L_0}{\lambda_i T} \text{comb}\left(\frac{t}{T}\right) \otimes \left[t \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right)\right] \quad (5)$$

若上述光波由光栅串的反射光提供, 光栅 i 对应的布拉格波长为 λ_i , 假设应变引起波长漂移, 若光纤介质的有效弹光系数为 P_e , 漂移量 $\Delta\lambda_i$ 与光纤光栅的轴向应变 ϵ_i 间的关系可表述为

$$\frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_i} = (1 - P_e) \epsilon_i. \quad (6)$$

* 香港研究资助局(RGC)资助项目(Polyu5123/97E)

** 通讯地址: 黑龙江大学物理系(哈尔滨 150080)

收稿日期: 2000-06-06; 收到修改稿日期: 2000-07-25

将(6)式代入(3)式,得

$$\Delta\psi_i \Big|_{\lambda_i} = -\frac{4\pi nL}{\lambda_i}(1 - P_e)\epsilon_i. \quad (7)$$

联立(7)式、(5)式、(2)式并代入(1)式,则干涉仪的输出可表示为

$$I = \sum_{i=1}^m I_{i0}(1 + k_i \cos\varphi), \quad (8)$$

其中,

$$\varphi = \psi_i - \frac{4\pi nL}{\lambda_i}(1 - P_e)\epsilon_i - \frac{4\pi n\Delta L_0}{\lambda_i T} \text{comb}\left(\frac{t}{T}\right) \otimes \left[t \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \right].$$

干涉仪输出正比于各光栅反射之叠加,显然它不能直接给出所监测光栅的感测信号。采用脉冲光源,引入电子开关,受延时信号控制,光源的一个脉冲所形成的 m 个反射脉冲信号中只有第 i 个脉冲通过开关,其它均被阻挡,这样开关开启后的信号为

$$I_i = (1 + k_i \cos\varphi)I_{i0}. \quad (9)$$

用相位计观察其相位,则其变化值反映的正是正比于 ϵ_i 的 $\Delta\psi_i \Big|_{\lambda_i}$,因此监测相位计值的变化便可判断作用于 i 光栅上应变的大小。假设光栅间呈等光程间隔 D 分布,延时量取决于 D ,改变延时量大小,同样可以监测作用在其它光栅上的应变。为避免脉冲间发生重叠,光源的脉冲频率 f 和占空比 ρ 必须满足:

$$f < \frac{c}{\lambda(m-1)D}, \quad (10)$$

$$\rho < 2\frac{f}{c}(D - nl), \quad (11)$$

其中 c 为真空中的光速。

3 实验结果

实验装置如图 1 所示,传感光栅串由自左至右布拉格波长分别为 1553.54 nm、1556.05 nm、1558.65 nm、1563.05 nm 的 4 个光栅组成,光栅的长度均为 1 cm,带宽约为 0.2 nm,相邻光栅间接有 10 m 长的延时光纤。带有隔离器的掺铒光纤放大自发辐射源(ASE)输出功率为 2.75 mW,光束经光栅串反射后由 3 dB 耦合器进入两端镜反射率均接近 90% 的非平衡全光纤扫描迈克尔孙干涉仪,干涉仪的平均臂长为 106 cm, L 值为 3.2 mm, M_2 所在的短臂缠绕在一压电陶瓷上,光纤介质的折射率为 1.4489;干涉仪输出条纹的对比度为 0.3,经探测器转换为电信号并放大后由电子开关选择通导,探测

器带有 10 Hz 的高通滤波器。锯齿波驱动信号的频率为 80 Hz,占空比接近于 1。相位计的响应时间为 3×10^2 ms,灵敏度为 5×10 mV,分辨率为 0.01° 。

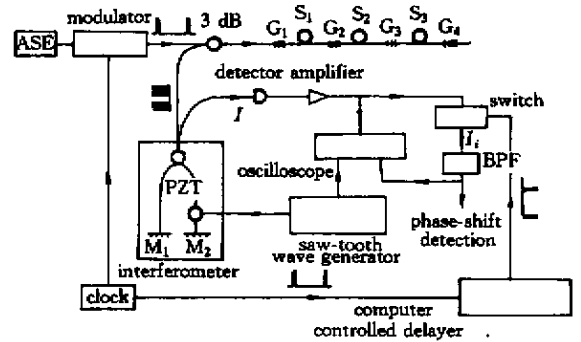


Fig.1 Experimental arrangement. M_i ($i = 1, 2$): mirror; G_i ($i = 1, 2, 3, 4$): sensor element; S_i ($i = 1, 2, 3$): delay fiber coil; 3 dB: 50:50 coupler; ASE: amplified spontaneous emission; BPF: band-pass filter

时钟信号的频率为 200 kHz,占空比为 0.01,峰-峰值为 3 V,直流电平为 1.5 V,它一方面用来驱动调制器将放大自发辐射输出调制成消光比为 37.5 dB 的脉冲信号,另一方面用来控制延时器,进而控制开关的通导。延时器的延时量编程可控,用以确保被测信号到达开关位置时开关处于通导状态,其输出方波是峰峰值为 3 V 的脉冲。

四踪示波器的输入端子分别与待测信号、滤波后的待测信号、压电陶瓷驱动信号以及调制信号连接,用以观察条纹的相对移动。受锯齿波信号驱动,压电陶瓷伸缩导致该臂光程周期性地改变,从而对波长进行扫描。锯齿波信号下降沿诱导产生的高频尖脉冲成为噪声(图 2 中曲线 3 下降沿对应曲线 1 的部分),带通滤波器滤去载波信号的同时也将该尖脉冲一并滤去(曲线 2 所示)。

考察光栅串中任一光栅(如 G_2),设置延时量为 160.4 ns,此时来自其它光栅的信号均被阻隔。轴向应力不变时布拉格波长也不变,调节压电陶瓷驱动信号,当输出电压峰峰值为 11.1 V、直流电平为 10.75 V 时,干涉仪输出光强对时间呈稳定的正弦变化规律,如图 2 中曲线 1 和 2 所示[后者为(75, 85) Hz 带通滤波结果];轴向应力变化时可观察到正弦曲线发生平移,这是由于扫描干涉仪将布拉格波长漂移信息变为相移信息所致,从而证实其解调功能。平移量取决于待测应变的大小,而平移方向则取决于待测应变的增减。随着待测应变的增加,曲线 2 和 1 左移(如图 3 中的 a~d 所示),而相位计显示的读数呈增加的趋势,当相位值达到 180° 时,继

续增加应变,它将跳至 -180° 后继续增加。 ϵ_2 增至 $215 \mu\epsilon$ 时曲线移至与 a 重合的位置,此时相位计显示相移值为 360° 。

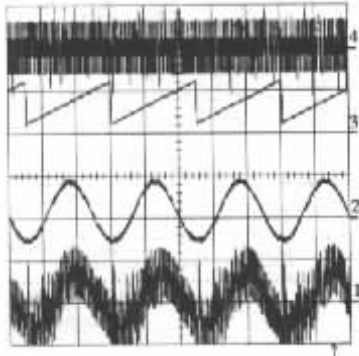


Fig.2 Different signals. The horizontal scale is 5 ms/div, vertical, trace 1 and 2 are 50 mV/div, trace 3 and 4 are 10.00 and 1.00 V/div, respectively. Trace 1: output of the switch; 2: output of the band-pass filter; 3: PZT driving signal; 4: control signal of modulator

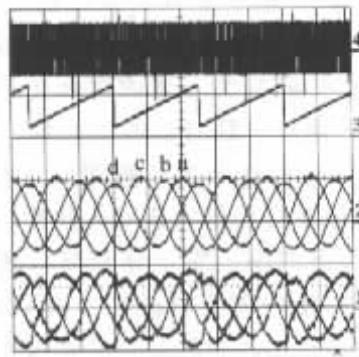


Fig.3 Outputs of BPF vs the measured strain applied at G_2 . The horizontal scale is 5 ms/div, vertical, trace 1 and 2 are 50 mV/div, trace 3 and 4 are 10.00 and 1.00 V/div, respectively. Trace 1 and 2 are outputs of BPF. The range of the former is [30, 100] Hz and the latter is [75, 85] Hz. Trace 3 is PZT driving signal, and trace 4 is the control signal of modulator. a: $\epsilon_2 = 0 \mu\epsilon$; b: $\epsilon_2 = 47 \mu\epsilon$; c: $\epsilon_2 = 105 \mu\epsilon$; d: $\epsilon_2 = 173 \mu\epsilon$

图4为应变与相移关系的实验曲线,曲线斜率 $1.63^\circ/\mu\epsilon$ 是本系统传感灵敏度的实验值。取 $P_e = 0.22^{[4]}$ (7)式确定的理论值为 $1.67^\circ/\mu\epsilon$,两者非常接近,这些差异可能受环境温度影响所致;另外,引用的 P_e 值与所用光纤的实验值有出入以及应变读数误差都与之有关。同样操作可以查询同一时钟脉冲由 G_1, G_3, G_4 所产生的反射脉冲信息。不过,通过开关彼此需要的延时量不同,依次为 61.9 ns 、 260.3 ns 以及 359.7 ns 。信号沿两个方向传至开关位置的时程差不为 0 使得 G_1 通导对应的延时量不

为 0。理论上,相邻光栅信号通过开关对应的延时差为 96.6 ns ,实际值与之有点差偏是未计光栅段光纤的延时以及延时光纤长度测量偏差所致。可见,本系统具备查询解调光纤光栅传感器阵列的功能。干涉仪两臂间的光程差以及相位计的分辨率决定了系统的传感分辨率,本系统具备分辨 $6 \text{ n}\epsilon$ 的能力。

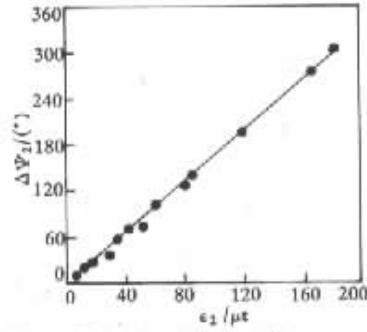


Fig.4 Experimental plot of $\Delta\psi_2$ vs ϵ_2

相位计的主值区间为 $[-180^\circ, 180^\circ]$,显然它对应的应变测量范围不大,利用峰值计数器可以增加相移的观测范围,从而增加系统的应变测量范围,此时应变测量的范围主要取决于光栅的应变承受能力,甚至可达到 $-4000 \mu\epsilon \sim 4000 \mu\epsilon$ 。

结论 利用非平衡迈克耳孙扫描干涉仪的波长滤波特性,结合时域查询技术,对 4 个光栅组成的传感器阵列成功地进行了查询,其传感灵敏度达 $1.63^\circ/\mu\epsilon$ 。单信道输出方式使得系统只需一套相位检测装置,从而降低系统的价格。

理论上,该方法具备查询无穷个光栅的能力,然而成栅过程中截趾效应造成布拉格波长附近能量的损耗、光栅法向偏离纤轴方向出现边模耦合引起损耗以及光路中的传输损耗等均制约系统实际可以查询的数目。选择宽带光源并提高其输出功率、优化光栅的波长分布、提高成栅质量减小光路损耗、增加扫描仪的扫描范围均有利于增加系统的查询能力。实际操作时将多组匹配光栅串串接起来,相邻光栅串间具有一定光程间隔,同一光栅串中采用波分复用技术而不同光栅串间采用时域地址查询的办法也可极大地增加系统的查询能力。结合空分复用技术以植入的方式对复合材料或其它结构的内应力分布进行实时监测,使得皮蒙技术变为现实,它在国防和民用工业中将具有广阔的应用前景。

本文的部分工作是第一作者在哈尔滨工业大学光电子技术研究所进行博士后工作时完成的,感谢光电子技术研究所的支持。

参 考 文 献

- [1] Volanthen M , Geiger H , Cole M J *et al.*. Measurement of arbitrary strain profiles within fiber gratings. *Electron. Lett.* , 1996 , **23** (11) : 1028 ~ 1029
- [2] Xu M G , Geiger H , Dakin J P. Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing. *Electron. Lett.* , 1996 , **32** (2) : 128 ~ 129
- [3] Ball G A , Morey W W , Cheo P K. Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation. *J. Lightwave Technol.* , 1994 , **12** (4) : 700 ~ 703
- [4] Yu Y , Tam H , Liu Z *et al.*. Passive temperature compensation technique for fiber Bragg grating displacement sensor. *Electron. Lett.* , 1999 , **35** (25) : 2224 ~ 2226
- [5] Rao Y J , Ribeiro A B L , Jackson D A *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
- [6] Davis M A , Bellemore D G , Putnam M A *et al.*. Interrogation of 60 fiber Bragg grating sensors with microstrain resolution capability. *Electron. Lett.* , 1996 , **32** (15) : 1393 ~ 1394
- [7] Kersey A D , Morey W W. Multiplexed Bragg grating fiber-laser strain-sensor system with mode-locked interrogation. *Electron. Lett.* , 1993 , **29** (1) : 112 ~ 114
- [8] Putnam M A , Dennis M L , Kang J U *et al.*. Sensor grating array demodulation using a passively mode locked fiber laser , 1997. Tech. Dig. Optic. Fiber Commun. Conf. , *J. Onstott , Ed.* , OSA , Vol. 6 , 156 ~ 159
- [9] Kersey A D , Berkoff T A , Morey W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection. *Electron. Lett.* , 1992 , **28** (3) : 236 ~ 238

Time-Domain Addressing Technique for a Single-Channel Output and High-Resolution Fiber Bragg Grating Sensor System

Yu Youlong Tam Hwayaw Ho Hoilut Chung Wenghong

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

(Received 6 June 2000 ; revised 25 July 2000)

Abstract : A technique of time-domain addressing is introduced to interrogate a four-element fiber Bragg grating sensor array. The sensor elements with different fiber delays were illuminated with a pulsed broad-band source. Demodulation was achieved with an unbalance Michelson scanning interferometer. The single-channel output sensor system , which is with a sensing resolution of 6 ne , was demonstrated with a sensitivity of $1.63^\circ/\mu\epsilon$.

Key words : fiber Bragg grating ; sensor array ; time-domain addressing ; interferometric demodulation ; single-channel output