

文章编号: 0253-2239(2005)07-865-4

具有实时监测能力的光纤光栅传感系统 时域地址查询技术*

余有龙^{1,2} 刘盛春² 谭华耀³ Luenfu Lui³

1 暨南大学物理系, 广州 510632
2 黑龙江大学光纤技术研究所, 哈尔滨 150080
3 香港理工大学电机工程系, 香港

摘要: 时钟信号控制下的脉冲宽带光源发出的光波, 进入 4 个光栅组成的间距为 10 m 的光栅串。利用受同一时钟信号控制的 1×4 模拟电子开关, 将各传感元的反射光脉冲依次分配至相应的输出信道, 实现时域地址查询, 并对各传感元位置的待测应变进行实时监测。引入非平衡迈克耳孙干涉解调装置, 将来自传感光栅的受待测应变诱导而至的波长漂移信息变为相移信息, 定标后便可实现传感信号的解调。1556 nm 波长时, 系统传感灵敏度的实验值为 $1.658^\circ/\mu\epsilon$, 与理论值 $1.673^\circ/\mu\epsilon$ 基本吻合。

关键词: 光纤光学; 光纤传感; 光纤光栅; 传感网络; 时域地址查询; 多信道输出; 实时监测; 干涉解调

中图分类号: TN929.11; TP212.1 文献标识码: A

Time-Domain Addressing Technique for Fiber Bragg Grating Sensor System with the Function of Real-Time Monitoring

Yu Youlong^{1,2} Liu Shenchun² Hwayaw Tam³ Luenfu Lui³

1 Department of Physics, College of Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632
2 The Research Institute of Fiber Optics, Heilongjiang University, Harbin 150080
3 Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR

Abstract: The emission of light wave from a pulsed broadband source controlled by a clock is injected into a four-element fiber Bragg grating sensor array. A technique of time-domain addressing is introduced to interrogate the gratings spaced 10 m apart by employing a 1×4 analog electrical switches, which is controlled by the same clock. The switches allocate the pulses reflected by the sensor elements into corresponding output channels to make the system performing the function of real-time monitoring the measurand. Demodulated with an unbalanced Michelson interferometer, which converts the wavelength shifts to phase changes, the system is demonstrated to be with a sensing sensitivity of $1.658^\circ/\mu\epsilon$ at the wavelength of 1556 nm. It matches the theoretical value of $1.673^\circ/\mu\epsilon$ basically.

Key words: fiber optics; fiber sensor; fiber Bragg grating; sensor network; time-domain addressing; multichannel output; real-time monitoring; interferometric demodulation

1 引 言

波长编码的光纤光栅(FBG)传感器,其信息载体是光,传感结果不受系统整体光强和光路中传输以及插入损耗的影响;它易于复用和网络化管理,可

进行节点(Point)型准分布式传感^[1~4];最后,光纤相对来说比较柔软,传感回路易于植入、或附着在结构表面,能够实时提供应变、温度以及结构完整性方面的信息,且布置比较灵活,这些均决定了其在健康

* 国家自然科学基金委员会与中国节能投资公司联合研究基金(60177029)、广东省自然科学基金(04105843)、教育部新世纪优秀人才支持计划和黑龙江省 01 年杰出青年基金的部分资助。

作者简介: 余有龙(1965~),男,安徽桐城人,暨南大学博士生导师,主要从事光纤光栅传感器网络化、光纤激光器和光通信方面的研究。E-mail: youlongyu@hotmail.com

收稿日期: 2004-04-27; 收到修改稿日期: 2004-12-03

监测中的不可替代性,因而引起人们的广泛关注^[6]。已报道的查询方式可归纳为滤波法^[1]、时域地址查询法^[2,6]、波长扫描法^[3,7]、锁模法^[8]以及色散法^[9]等,其中时域地址查询是较实用的查询方式,目前该技术采用单信道输出方式^[2,6],与其他查询方式一样,每次只能查询单一传感元,虽然成本相对较低,但不具备实时监测能力。若改用多信道输出方式,使得来自各传感元的信号均有对应信道输出,则该查询技术将具备实时监测功能。

本文引入 1×4 电子开关,受时钟信号控制,使得来自 4 光栅传感元件串的反射光脉冲串依次进入开关通道并输出,结合非平衡迈克耳孙干涉解调技术,对作用于光栅的轴向待测应变成功地进行了时分复用实时监测。

2 原 理

宽带光源发出的频率为 f 、占空比为 ρ 的每一脉冲光波,经栅长为 l 、具有等光程间隔 (D) 的 m 个传感光栅组成的光栅串反射后,形成由 m 个反射光脉冲组成的脉冲串(见图 1 所示),若

$$f < \frac{c}{2(m-1)D}, \quad (1)$$

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

其中 c 和 n 分别为真空中的光速以及纤芯的折射率,则可避免脉冲间出现重叠现象。

受轴向待测应变 ϵ_i 的作用,反射波长为 λ_i 的

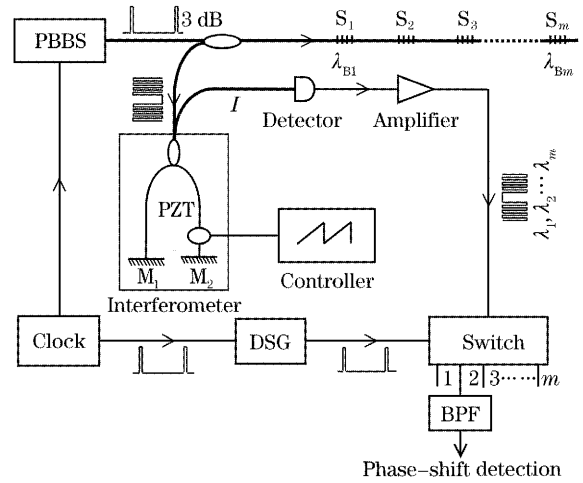


图 1 具有实时监测功能的光纤光栅传感系统原理图。反射镜 M_i ($i=1, 2$), 传感元 S_i ($i=1, 2, \dots, m$), 3 dB, 50:50 耦合器; PBBS: 脉冲宽带光源; BPF: 带通滤波器; DSG: 延时信号发生器

Fig.1 Schematic diagram of FBG sensor system with the function of real-time monitoring. Mirror M_i ($i=1, 2$), Sensor element S_i ($i=1, 2, \dots, m$), 3 dB, 50:50 coupler; PBBS: pulsed broadband source; BPF: band-pass filter; DSG: delay signal generator

光纤布拉格光栅 i ($i=1, 2, \dots, m$) 将出现 $\Delta\lambda_i$ 的波长漂移,记其反射光强为 I_{i0} ,进入臂长差为 L 的非平衡扫描迈克耳孙干涉仪,条纹的可见度为 k_i ,考虑干涉仪输出正比于各光栅反射光之叠加, t 时刻干涉输出可表示成^[6]

$$I = \sum_{i=1}^m I_{i0} \left\{ 1 + k_i \cos \left\{ \Phi_i - \frac{4\pi n L}{\lambda_i} (1 - P_e) \epsilon_i - \frac{4\pi n \Delta L_0}{\lambda_i T} \text{comb} \left(\frac{t}{T} \right) * [t \cdot \text{rect}(t/T)] \right\} \right\}, \quad (3)$$

其中 P_e 为有效弹光系数, Φ_i 为 λ_i 照射时两臂间的静态相差, $*$ 是卷积符号, T 为锯齿波扫描驱动信号的周期, ΔL_0 为臂长扰动的幅度。

引入 $1 \times m$ 受控模拟电子开关,使得每一脉冲串中第 i 个脉冲信号进入开关的第 i 信道,其输出光强则为

$$I_i = \left\{ 1 + k_i \cos \left\{ \Phi_i - \frac{4\pi n L}{\lambda_i} (1 - P_e) \epsilon_i - \frac{4\pi n \Delta L_0}{\lambda_i T} \text{comb} \left(\frac{t}{T} \right) * [t \cdot \text{rect}(t/T)] \right\} \right\} I_{i0}. \quad (4)$$

将扫描干涉仪的驱动信号作为参考信号,连同上述信号一起输入相位计,显示的相移

$$\Delta\Phi_i |_{\lambda_i} = - \frac{4\pi n L}{\lambda_i} (1 - P_e) \epsilon_i \quad (5)$$

源于应变引起的波长漂移。其它开关信道输出对应的相移值也是对应光栅位置轴向应变的实时反映,因此基于上述原理的传感网络对待测应变具有实时监测之功能。

3 实验结果

为验证基于上述原理的光纤光栅传感网络的实时监测功能,图 1 中的光栅串由 4 个长度均为 1 cm 的传感光栅组成,各光栅的工作波长自左至右分别为 1553.54 nm、1556.05 nm、1558.65 nm 和 1563.05 nm,带宽约为 0.15 nm,相邻光栅间接有 10 m 长的延时光纤。强度型调制器将连续高功率宽带输出光信号调制成交光比为 30.75 dB、脉宽为 40 ns 的脉冲信号。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%、平均臂长为106 cm, L值为3.2 mm的全光纤扫描迈克耳孙干涉仪。来自不同传感元的脉冲光信号,干涉输出后经探测器转换为电信号并放大,由受控1×4模拟电子开关在对应输出信道间进行分配,带通滤波后作为观测信号输入分辨力为0.01°的相位计。

干涉仪输出条纹的衬比度为0.3,将反射镜M₂所在的短臂缠绕在压电陶瓷(PZT)上,受锯齿波信号驱动,压电陶瓷伸缩导致该臂光程周期性改变,从而对波长进行扫描。锯齿波驱动信号的占空比接近1,频率为100 Hz。

时钟信号的频率为500 kHz,峰峰值为3.6 V,直流电平为0 V。它一方面用来驱动调制器,产生平均功率为0.85 mW的脉冲输出,另一方面用来触发延时信号发生器(DSG),产生峰峰值为5 V、直流电平为2.5 V的方波延时信号,控制电子开关,从而控制整个装置的运作。时钟信号源(Clock)与开关间导线的长度为3 m。延时信号发生器延时量的大小对应信号沿顺时针方向由S₁反射至开关位置和逆时针方向直接至开关位置的时差,用以确保各脉冲信号到达开关位置时,相应信道处于导通状态。实验表明,将延时量设置为75 ns时,电子开关恰能将来自*i*(*i*=1,2,3,4)光栅的脉冲信号,分配到第*i*输出信道。图2中曲线2表明来自各光栅的脉冲间隔自左至右分别为94.7 ns、96.7 ns、95.8 ns,曲线4则为信道2的输出结果。

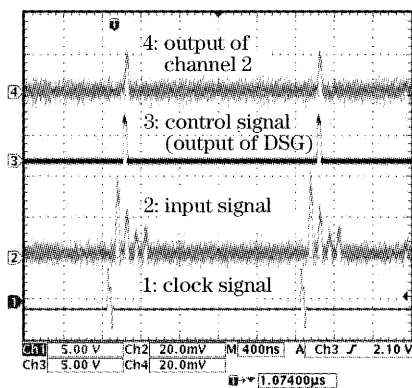


图2 开关涉及到的信号

Fig. 2 Different signals of the switch

传感光栅S₂所在的长度为1 m的光纤,一端固定不动,另一端固定于分辨力为0.1 μm的微动平台的移动端,用以改变作用于S₂的轴向应变ε₂的大小。ε₂不变时,布拉格波长λ_{B2}也不变,调节压电陶瓷驱动信号,当V_{p-p}=9 V、V_{offset}=4.5 V时,干涉仪输出光强对时间呈稳定的正弦变化规律,如图3中曲线2和3所示

(后者为前者经带宽为[95~105] Hz带通滤波并放大后的结果);增加ε₂可观察到曲线整体向左平移(图3中a→d所示),反之右移,平移量取决于ε₂的变化值。造成此现象的原因是扫描干涉装置将波长漂移信息变为相移信息,从而证实其解调功能,同时也定性地说明了该信道可实时监测ε₂的变化。

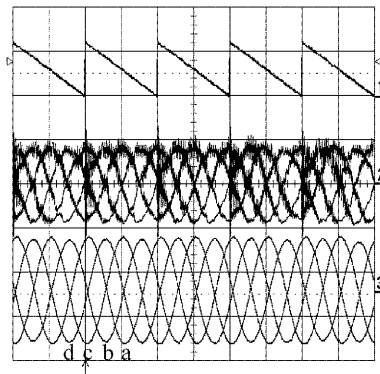


图3 S₂上不同待测应变对应信道2的带通滤波输出信号;横轴:5 ms/div,纵轴:线1、2和3分别对应7.5 V/div,0.1 V/div和2 V/div;曲线1为压电陶瓷驱动信号,曲线2和3是频率范围分别为[30~10000] Hz和[95~105] Hz时带通滤波器输出。a:ε₂=0 με, b:ε₂=55.5 με, c:ε₂=112.5 με, d:ε₂=168.1 με

Fig. 3 Outputs of BPF of Channel 2 versus the measured strains applied at S₂; the horizontal scale is 5 ms/div, vertical trace 1, 2 and 3 are 7.5 V/div, 0.1 V/div and 2 V/div, respectively; trace 1 is PZT driving signal, trace 2 and 3 are outputs of BPF; the range of the former is [30~10000] Hz and the latter is [95~105] Hz. a: ε₂ = 0 με, b: ε₂ = 55.5 με, c: ε₂ = 112.5 με, d: ε₂ = 168.1 με

图4为用相位计结合峰值计数技术记录的ΔΦ₂|_{λ₂}随ε₂变化关系的实验曲线,两者间呈明显的线性关系。曲线斜率1.658°/με乃系统传感灵敏度的实验值,

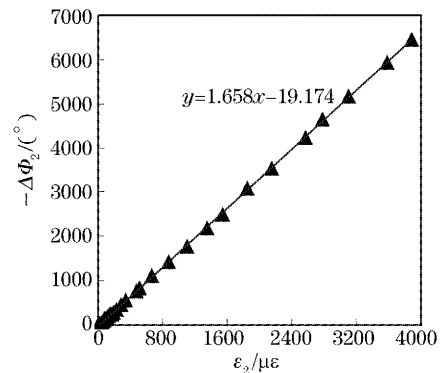


图4 ΔΦ₂随ε₂变化关系的实验曲线

Fig. 4 Experimental plot of ΔΦ₂ vs ε₂

取 $P_e = 0.22^{[10]}$, $n = 1.4489$, 则(5)式确定的理论值为 $1.673^\circ/\mu\epsilon$, 与实验值非常接近。少许差异可能受环境温度影响所致, 还与引用的 P_e 值的准确度以及应变读数的误差等有关。

若干涉仪所在环境的温度发生变化, 热光效应和膨胀效应将造成两臂间出现附加相差, 以至应变不变的情况下, 示波器显示的带通滤波输出信号也有整体向左或向右平移的现象。为避免它对监测结果的影响, 干涉仪应置于恒温环境中。

系统对应变的监测范围取决于光栅所在光纤的应变承受能力, 实验证实为 $[-4000 \sim 4000] \mu\epsilon$ 。同样操作可监测其它信道对应传感光栅位置的应变, 从而证实了本系统的实时监测能力。传感分辨力取决于干涉仪两臂间的光程差以及相位计的分辨能力, 理论上本系统具备分辨 6 ne 的能力。

4 结 论

利用 1×4 受控模拟电子开关对来自传感光栅的脉冲信号串在开关信道间依序选择分配, 结合非平衡干涉解调技术, 对 4 个光栅组成的传感器阵列成功地进行了时域地址查询, 并对待测应变进行了实时监测。系统的传感灵敏度达 $1.658^\circ/\mu\epsilon$ 。理论上该方法具备海量查询能力, 然而截趾效应和边模耦合造成的能量损耗、光路的传输损耗以及开关的插入损耗等均制约系统的实际查询数目。选择高功率宽带光源、提高成栅质量、减小光路损耗、增加扫描仪的自由光谱程、减小开关的插入损耗, 均有利于增加系统的查询能力。采用适当的数据采集和显示技术, 可大大提高系统的性

能价格比和实用性。

参 考 文 献

- 1 M. A. Davis, D. G. Bellemore, M. A. Putnam *et al.*. Interrogation of 60 fibre Bragg grating sensors with microstrain resolution capability[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(15): 1393~1394
- 2 R. S. Weis, A. D. Kersey, T. A. Berkoff. A four-element fiber grating sensor array with phase-sensitive detection[J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1994, **6**(12): 1469~1472
- 3 G. A. Ball, W. W. Morey, P. K. Cheo. Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(4): 700~703
- 4 Y. J. Rao, A. B. Lobo Ribeiro, D. A. Jackson *et al.*. Combined spatial- and time-division-multiplexing scheme for fiber grating sensors with drift-compensated phase-sensitive detection[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(20): 2149~2151
- 5 M. D. Todd, G. A. Johnson, S. T. Vohra. Deployment of a fiber Bragg grating-based measurement system in a structural health monitoring application[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2001, **10**(3): 534~539
- 6 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*, 2001, **21**(7): 874~877
余有龙, 谭华耀, 何海律等. 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[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7): 874~877
- 7 Yu Youlong, Tam Hwayaw, Wang Qi. Fiber laser based wavelength division multiplexed fiber Bragg grating sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 592~595
余有龙, 谭华耀, 王 骐. 基于光纤激光器的波分复用光纤光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 592~595
- 8 A. D. Kersey, W. W. Morey. Multiplexed Bragg grating fiber-laser strain-sensor system with mode-locked interrogation[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1): 112~114
- 9 M. A. Putnam, Michael L. Dennis, Jin U. Kang *et al.*. Sensor grating demodulation using a passively mode locked fiber laser[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3042**: 352~357
- 10 G. A. Ball, W. W. Morey. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6): 420~422