

文章编号 : 0253-2239(2001)08-0987-03

基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统*

余有龙** 谭华耀 锤永康

(香港理工大学电机工程系, 香港)

摘要: 介绍一种基于干涉解调技术的光纤光栅传感系统, 用非平衡波长扫描迈克耳孙干涉仪将来自传感光栅的包含应变信息的波长信号变为相位信号, 借助相位计显示的相位变化确定待测应变的大小。该传感系统具备分辨 5.5 ne 的能力, 其灵敏度的实验值为 $1.80^\circ/\mu\epsilon$, 与预期值 $1.83^\circ/\mu\epsilon$ 基本吻合。

关键词: 光纤光栅; 传感器; 分辨率; 干涉解调

中图分类号: TN25 文献标识码: A

1 引 言

光纤光栅传感器采用波长编码而免受电磁场干扰, 且不受光源功率以及光路中连接损耗的影响, 它灵敏度高、易于复用且可进行网络化操作等特点决定其在某些领域的应用是不可替代的, 因而倍受人们青睐^[1-4]。压力、温度和应力是直接影响光纤光栅反射波长的独立变化的物理量^[4-6], $1.55 \mu\text{m}$ 时三者引起的光纤光栅波长漂移的典型值分别为 $3.13 \text{ pm}/\text{MPa}$ ^[6]、 $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $1.15 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ^[7], 可见要体现该类传感器高灵敏度的特点, 必须要发展高分辨率解调技术。在已报道的解调方案中^[7,8], 干涉法分辨率高, 一般能够达到微应变甚至以下的数量级。它又分为参考光栅法^[9]、傅里叶变换分析法^[10]、参考干涉图法^[11]以及可调光源法^[12], 这几种方法对环境要求过高, 且难以稳定操作。

本文利用非平衡波长扫描迈克耳孙干涉仪对传感光栅的反射谱进行波长解码, 用相位计观测波长漂移引起干涉仪两臂间相位差的变化, 进而监测作用在传感光栅上的应变。

2 原 理

来自传感光栅的光波进入短臂缠绕在受锯齿波信号驱动的压电陶瓷上的非平衡扫描迈克耳孙干涉仪, 其输出信号经探测器接收后变为电信号, 适当处

理后与压电陶瓷的驱动信号分别作为待测信号和参考信号一起输入相位计。调整驱动信号的幅值以及直流电平的大小, 使干涉信号变化的频率与参考信号的频率一致, 此时相位计所显示的值与施加在传感光栅上的待测应变的大小有关, 这是由于应变使得传感光栅出现波长漂移, 温度不变时相对漂移量 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与轴向应变 ϵ_x 成正比, 即

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - p_e)\epsilon_x, \quad (1)$$

式中 p_e 为有效弹光系数。若干涉仪的臂长差为 L , 纤芯折射率为 n , 则波长变化引起两臂间相位差的变化为

$$\Delta\Phi = -\frac{4n\pi L\Delta\lambda_B}{\lambda_B^2}. \quad (2)$$

而参考信号的相位与之无关, 因此相位计显示的相位变化实际上为待测信号相位的变化。联立(1)式和(2)式, 则有

$$\epsilon_x = -\frac{\lambda_B}{4n\pi L(1 - p_e)}\Delta\Phi, \quad (3)$$

可见观测相位的变化可判断待测应变变化程度。

3 实验结果

实验装置如图 1 所示, 传感光栅长 1 cm, 带宽 $\Delta\lambda_{1/2} = 0.2 \text{ nm}$, 中心波长为 1556.21 nm ; 光纤光栅所在光纤的长度为 17.5 cm , 步长为 $0.1 \mu\text{m}$ 的位移控制器用来改变作用在光栅上的应力。全光纤扫描迈克耳孙干涉仪两端镜的反射率相等, 接近 90%, 平均臂长为 441 cm , $L = 3.5 \text{ mm}$, 光纤介质的折射率为 1.4489, 锯齿波驱动信号的频率为 80 Hz, 占空比接近 1; 红外探测器工作波长为 900 nm ~

* 香港研究资助局(RGC)资助项目(Polyu 5123/97E)。

** 通讯地址: 黑龙江大学光纤技术研究所, 哈尔滨 150080。

收稿日期 2000-01-12; 收到修改稿日期 2000-04-21

1700 nm 相位计的响应时间为 1×10^2 ms, 灵敏度为 1×1 V, 分辨率为 0.01° 。掺铒光纤放大自发辐射源 (ASE) 的输出功率为 2 mW。示波器的三个输入端子分别与参考信号、待测信号以及经滤波处理后的待测信号连接, 用以观察条纹间的相对移动。

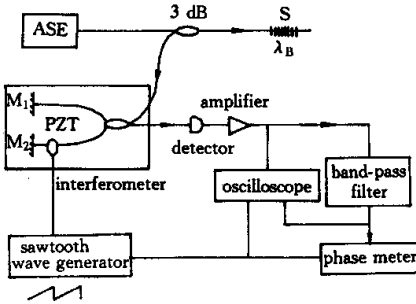


Fig. 1 Experimental arrangement for applied strain measurement. S: FBG sensor; PZT: piezoelectric transducer; M_i ($i = 1, 2$), Mirror; 3 dB, 50:50 coupler

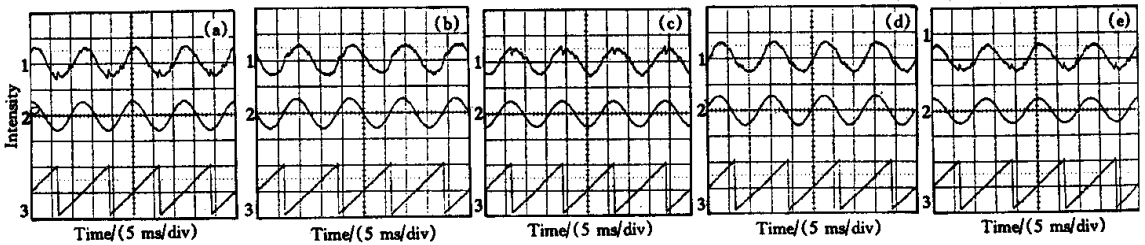


Fig. 2 Characteristics of the outputs of the interferometer and the filter for different tensions. 1. output of the interferometer (100 mV/div); 2. filtered signal (measured signal) (1.00 V/div); 3. reference signal (0.50 V/div). (a) $\epsilon_x = 0 \mu\epsilon$; (b) $\epsilon_x = 52.1 \mu\epsilon$; (c) $\epsilon_x = 96.8 \mu\epsilon$; (d) $\epsilon_x = 147.4 \mu\epsilon$; (e) $\epsilon_x = 199.4 \mu\epsilon$

随着光纤光栅轴向应变的增加, 示波器显示的曲线向左平移, 减小应变, 曲线移动方向相反, 而撤除应力后, 曲线立刻恢复到原始位置。图 2 显示待测信号发生 365° 相移的过程中不同应变作用下对应曲线的位置。单凭曲线移动的周期数难以保证准确判断相位变化, 引入相位计则可提高相移的测量精度, 从而提高待测应变的精度。相位计读数 ϕ 的范围为 $-180^\circ \sim 180^\circ$, 移动几个周期时, 相位计显示的值从 -180° 变化至 180° 然后又跳到 -180° , 或者从 180° 变化至 -180° 然后又跳到 180° , 如此周期性地变化。其不是单一的值不便定标, 如果规定主值区间 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 内 $\Delta\phi$ 对应的应变范围为本系统的测量范围, 则可测应变的上限为 $196.7 \mu\epsilon$ 。图 3 中虚线为 $-\Delta\phi$ 与 ϵ_x 间变化关系的实验曲线, 两者呈线性关系, 其斜率值 $1.80^\circ/\mu\epsilon$ 为系统的传感灵敏度, 而典型的石英光纤中 $p_e = 0.22^{[4]}$, 由 (3) 式确定的理论值 (绝对值) 为 $1.83^\circ/\mu\epsilon$ (图中实线斜率)。造成实验值与理论值间出现少量差别可能的原因有: 1) 引用的 p_e 值与所用光纤的实际值有出入; 2)

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, 需要进行滤波处理; 非平衡干涉仪条纹的对比度一般不高, 探测到的信号非常微弱, 往往要进行放大处理。图 1 中带通滤波器允许通过的频率范围是 75 Hz \sim 90 Hz, 其增益设置为 20 dB, 放大器增益为 45 dB。

锯齿波信号源借助压电陶瓷驱动源, 用以驱动压电陶瓷。为了正确获取待测信号相位的变化值, 保证参考信号与待测信号同频率是至关重要的, 为此调节锯齿波信号源提供的电压信号的幅值和直流电平, 并调节压电陶瓷驱动源的增益。实验中观察到锯齿波信号源提供信号的峰-峰值为 1.1 V, 直流电平为 0.6 V, 而压电陶瓷驱动源输出电压峰峰值为 13.2 V, 直流电平为 6.2 V 时, 两信号频率达到一致。滤波后待测信号的强度随时间呈正弦函数变化规律 (如图 2 所示)。

光纤固定端出现弛豫。

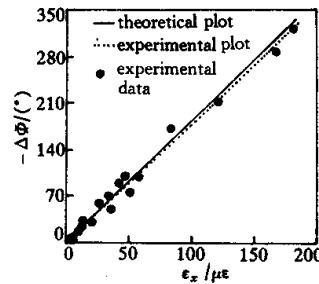


Fig. 3 Relationship between the variations of the phase and the applied strain

系统的传感分辨率主要取决于干涉仪两臂间光程差以及相位计的读数精度, 所用干涉仪和相位计对应传感系统的分辨率为 5.5 ne。

系统的传感灵敏度与 L 成正比, 增加 L 将以降低干涉条纹的对比度进而降低系统信噪比为代价。光纤光栅反射光的相干长度为 8.36 mm, 考虑到光在光纤光栅中反射时有效深度不为零, 我们选择 $L = 3.5$ mm, 此时测得条纹的对比度为 0.4 。

该系统具备监测静应变和动态应变的能力,后者只不过需详细分析相位随时间变化的规律而已。如果引入条纹计数器,使之配合相位计,共同监测相位的变化,则可极大地拓宽本系统的测量范围,此时它主要取决于光栅所在光纤的应变承受能力以及干涉仪的扫描范围。干涉仪体积不大,只要它不受干扰,传感结果就不受影响,因此该系统对工作环境要求不高,比较实用。

结论 利用非平衡扫描迈克尔孙干涉仪对传感光栅的波长信息进行解码,成功地对应变进行了感测。该传感系统具备的传感分辨率为 $5.5 \text{ n}\epsilon$,灵敏度为 $1.80^\circ/\mu\epsilon$ 。若对光源信号进行脉冲调制,用时分复用技术对接收信号进行处理,该系统具备查询、解调光纤光栅网络传感信号的能力。该微应变监测技术将可广泛应用于国防和民用工业中,并可能会使皮蒙技术变为现实。

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研究时完成的,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] Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9):692~694
- [4] 江毅,陈伟民,杨礼成等. 光纤光栅用于应变/温度传感初探. *传感技术学报*, 1997, **10**(3):43~47
- [5] 余有龙,关柏鸥,董孝义等. 光纤光栅压力传感器的无源温漂补偿技术. *光学学报*, 2000, **20**(3):400~404
- [6] Culshaw B, Dakin J. *Optical Fiber Sensors*, Boston: Artech House, 1996. 45~46
- [7] 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
- [8] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16):1370~1372
- [9] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1):72~74
- [10] Ohn M M, Huang S Y, Measures R M *et al.*. Arbitrary strain profile measurement within fiber gratings using interferometric Fourier transform technique. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(14):1242~1243
- [11] Flavin D A, McBride R, Jones J D C. Short optical path scan interferometric interrogation of a fiber Bragg grating embedded in a composite. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(4):319~320
- [12] Brady G, Kalli K, Webb D J *et al.*. Simultaneous interrogation of interferometric and Bragg grating sensors. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11):1340~1342

A Fiber Bragg Grating Sensor System with Interferometric Demodulation Technique

Yu Youlong Tam Hwayaw Chung Wenghong

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

(Received 12 January 2000; revised 21 April 2000)

Abstract: Based on the interferometric demodulation technique, a fiber Bragg grating sensor system employing an unbalance wavelength scanning Michelson interferometer to transpose the strain related spectral signal into phase signal is reported. The strain can be recovered by measuring the phase change of the signal with a phase-meter. Experiment demonstrated that the sensing sensitivity of this system with a resolution of $5.5 \text{ n}\epsilon$ is $1.80^\circ/\mu\epsilon$. It basically matches the prospected value of $1.83^\circ/\mu\epsilon$.

Key words: fiber Bragg grating; sensor; sensing resolution; interferometric demodulation