

利用调谐滤波技术的光纤光栅复用传感器*

刘云启 刘志国 郭转运 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

郑建成

(香港城市大学电子工程系, 香港)

摘 要 采用光纤光栅悬臂梁线性调谐技术, 提出了利用调谐滤波技术对光纤光栅复用传感信号进行检测的方案, 在分析其基本工作原理的基础上, 实验研究了其波分复用传感特性, 传感测量的结果与光谱分析仪直接测量的结果基本一致。传感器的波长分辨率主要取决于系统的最小可探测光功率, 由于采用了高灵敏度的光电测量系统, 传感测量的波长分辨率可达 0.005 nm, 应变分辨率可达 5.7×10^{-6} 。

关键词 光纤光栅, 复用传感, 可调谐滤波器。

1 引 言

近年来光纤光栅在光传感方面的研究^[1]已经越来越引起人们的重视, 光纤光栅传感器的突出优点是可以实现准分布式传感, 在一根光纤中连续制作多个光纤光栅, 构成光栅阵列, 就可以利用复用(波分复用、时分复用和多路复用)技术实现对各种传感量的准分布式测量, 这在智能和灵巧结构中有着重要的应用。光纤光栅的传感信息是以波长编码的, 研究实用的复用信号检测技术是实现复用传感的关键。国外学者提出了许多光纤光栅波长位移检测方法, 如文献报道的有: 非平衡马赫-曾德尔干涉仪法^[2]具有较高的测量灵敏度, 但这一方法只适用于动态检测; 可调法布里-珀罗滤波器法^[3]具有较宽的调谐范围, 应变探测分辨率可达 $\pm 3 \times 10^{-6}$, 但由于光路中含有非光纤元件, 因而光损耗较大, 且高性能的可调法布里-珀罗滤波器一般价格昂贵; 压电陶瓷匹配光纤光栅滤波法^[4], 应变探测分辨率可达 4.12×10^{-6} , 不足之处是压电陶瓷调谐范围小, 多点探测需要多个匹配光栅, 而且光路中使用了较多的耦合器, 光损耗较大, 使系统信噪比较低; 成像光谱技术^[5]虽然光能利用率高, 价格低廉, 但由于系统中含有体光栅, 对光路调节有较高的要求, 这势必影响其实用性。

本工作采用光纤光栅悬臂梁线性调谐技术, 提出了利用调谐滤波技术实现对光纤光栅复用传感信号进行检测的方案, 并对其波分复用传感特性进行了实验研究。这一复用传感器具有光能利用率高、信噪比高、操作简单和价格低廉等优点, 其波长测量分辨率可达 0.005 nm,

* 国家自然科学基金(69878001)和国家攀登计划资助项目。

收稿日期: 1999-01-02; 收到修改稿日期: 1999-05-04

应变分辨率可达 5.7×10^{-6} 。

2 基本原理

2.1 波长检测原理

光纤光栅调谐滤波技术的基本原理如图 1 所示, 由传感光纤光栅反射宽带光源后形成窄带光谱, 由 3 dB 耦合器耦合到可调谐的滤波光纤光栅上, 经调谐滤波后由光电探测器接收, 再经多级电路放大后由毫伏表显示测量结果。图中 IMG 为折射率匹配液, 用于减小光纤的端面反射, 提高系统信噪比。由文献的分析可知^[6], 探测器上的光强是传感光栅反射谱与滤波光栅透射谱的卷积, 滤波光栅线性调谐过程中光电流强度的变化曲线即为输出光谱曲线, 曲线的极小值位置即为传感光栅的峰值波长位置。

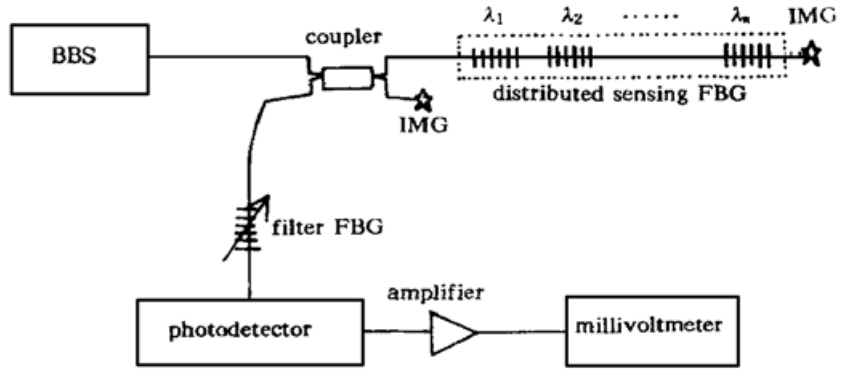


Fig. 1 Wavelength demodulation scheme of multiplexed FBG sensor

当传感光栅温度改变或受力形变时, 光栅峰值波长发生改变, 光电流输出曲线的极小值位置也将产生位移, 而机械调谐刻度与滤波光栅中心波长的关系是事先由光谱仪定标的, 因此在实际应用中就可以避免使用价格昂贵的波长检测仪器, 直接利用测得的光电流变化曲线确定传感光栅的波长位移。这种波长检测方法可以取得很高的信噪比和测量灵敏度。

图 1 的光路中包含有 n 个传感光栅, 其中心波长分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, 为了能够独立确定每个光栅的波长位移, 要求传感测试中各个光栅的布拉格波长及其工作范围互不重叠, 并且所有光栅的工作波长均处于滤波光纤光栅的波长调谐范围之内, 因此系统容许的复用光栅个数主要取决于滤波光栅的调谐范围的大小。

2.2 悬臂梁调谐原理

本文采用可调谐的滤波光纤光栅作为传感器的波长分析器, 其调谐技术采用高灵敏度的光纤光栅悬臂梁线性调谐技术^[7], 其调谐的基本原理如图 2 所示。

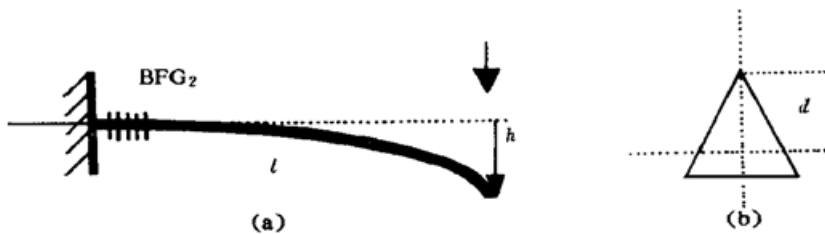


Fig. 2 Schematic diagram of FBG cantilever beam tunable technique. (a) Cantilever beam, (b) Cross section of the beam

调谐光纤光栅粘接在悬臂梁固定端附近, 由材料力学悬臂梁形变原理可知, 当悬臂梁自由端在集中力作用下产生位移 h 时,

光纤光栅中心波长的相对改变量(温度恒定)为^[7]

$$\Delta \lambda_B / \lambda_B = 3 \eta' \eta (d/l^2) h, \tag{1}$$

其中 l 为悬臂梁长度, d 为悬臂梁中性面到光栅的距离[如图 2(b)所示]; λ_B 为光纤光栅的中心波长, $\eta = 0.76$, 为与光纤材料弹光效应有关的常数; η' 是一个与光栅和悬臂梁粘接紧密程度有关的小于 1 的系数(由作者的实验经验可知, 对于本文所采用的粘接技术, η' 一般在 0.8 左右)。根据以上原理, 可以通过调节悬臂梁自由端位移的方法, 对滤波光纤光栅进行线

性调谐, 实现波长扫描。

2.3 系统配置

实验中, 宽带光源采用峰值为 1530 nm 的宽带发光二极管, 其带宽可达 80 nm, 总光谱功率为微瓦量级, 由稳压电路供电; 光电探测器采用高灵敏度的 InGaAs 光电二极管, 暗电流为 2.5×10^{-11} A, 尾纤输出封装; 采用低噪声高倍率放大系统放大微弱的光电流信号(10^{-11} ~ 10^{-9} A 量级), 由毫伏表显示光电流的大小。消除光电两种白噪声十分关键, 否则信号完全被噪声淹没。

滤波光纤光栅的调谐采用图 2 所示的悬臂梁线性调谐技术, 其中悬臂梁由有机材料制成, 长度为 60 mm, 截面为三角形, d 值为 2 mm。形变量 h 调节器采用每周进给量为 0.2 mm 的螺旋测微器, 所用光纤光栅的反射率大于 96%, 带宽为 0.2 nm。由于实验条件所限, 选用了两个光纤光栅演示系统的波分复用传感特性, 光栅的中心波长分别为 1523.26 nm 和 1524.86 nm, 两个光栅分别粘贴于不同结构的悬臂梁上, 通过调节施力螺钉即可模拟光栅的位移传感特性。实验中光栅 1 的悬臂梁长度 l 为 53 mm, 截面为矩形, d 值为 0.65 mm, 模拟传感的施力螺钉的螺距为 0.300 mm; 光栅 2 的悬臂梁长度为 92 mm, 截面为三角形, d 值为 2 mm, 模拟传感的施力螺钉的螺距为 0.200 mm。因此由公式(1)的计算可知, 两个光栅的位移传感灵敏度分别为 0.643 nm/mm 和 0.657 nm/mm。

3 实验结果与分析

本工作利用光谱分析仪(AV6361 型)作为波长检测仪器, 对滤波光栅的调谐特性进行了实验研究, 其调谐曲线如图 3 所示, 图中的横坐标为形变量 h 调节器的刻度数, 对于本工作设计的调节器, 每刻度对应的形变量 h 的进给量为 0.008 mm。由图 3 可知悬臂梁调谐具有较好的线性特性, 通过数据拟合的结果可知, 形变量调节器每刻度的调谐量(波长调谐灵敏度 $\Delta \lambda/\text{div}$) 为 1.25×10^{-2} nm, 实验中滤波光栅总的调谐量约为 5.6 nm, 对于一般的传感测量, 这一调谐范围容许的复用光栅个数为 45 个, 进一步改进梁结构提高滤波光栅的线性调谐范围, 还可以获得更高的复用容量。

旋转传感头上的调节螺钉, 使传感光栅悬臂梁自由端产生横向位移, 传感光栅中心波长发生变化, 由光谱分析仪分别测得两个传感光栅的位移传感特性曲线, 如图 4(a)、(b)所示,

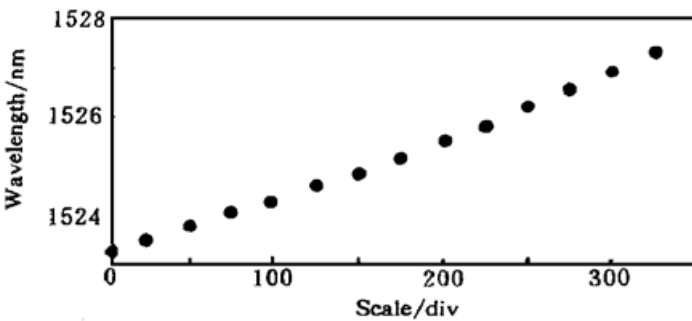


Fig. 3 Tunable curve of filter fiber grating

实验研究, 其调谐曲线如图 3 所示, 图中的横坐标为形变量 h 调节器的刻度数, 对于本工作设计的调节器, 每刻度对应的形变量 h 的进给量为 0.008 mm。由图 3 可知悬臂梁调谐具有较好的线性特性, 通过数据拟合的结果可知, 形变量调节器每刻度的调谐量(波长调谐灵敏度 $\Delta \lambda/\text{div}$) 为 1.25×10^{-2} nm, 实验中滤波光栅总的调谐量约为 5.6 nm, 对于一般的

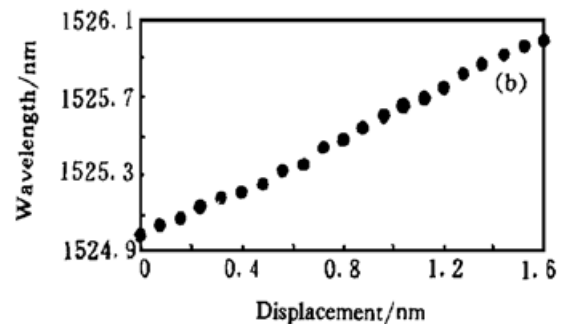
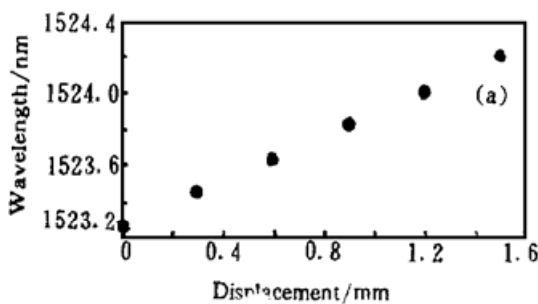


Fig. 4 Displacement response of sensor grating. (a) Grating 1, (b) Grating 2

由数据拟合可知其位移传感灵敏度分别为 0.635 nm/mm 和 0.648 nm/mm, 与理论分析的结果基本一致。

分别将两个传感光栅的悬臂梁自由端位移调为 0.5 mm 和 1.6 mm(由图 4 可知, 这一调谐量对应的传感光栅中心波长分别为 1523.62 nm 和 1526.07 nm), 调谐滤波光纤光栅, 同时由光电探测器进行测量, 图 5 为滤波光栅线性调谐过程中, 毫伏表电压信号的变化曲线, 图形的极小值位置即为传感光栅的峰值波长位置, 由此可以确定出传感光栅的波长位置和波长位移的大小。因为光栅在波形极小值位置附近的调谐灵敏度低, 而波峰两侧的线性区域调谐灵敏度较大, 因此将线性区两条拟合直线的交点视为极小值位置, 这种确定中心波长的方法产生的测量误差较小。依据这种方法, 结合图 3 和图 5 可知, 两个传感光栅的峰值波长分别为 1523.50 nm 和 1525.93 nm, 波长差为 2.43 nm。图中显示的波形的半强度带宽分别为 0.26 nm 和 0.30 nm, 比光纤光栅 FBG₂ 的带宽 0.2 nm 大, 这是传感光栅与滤波光栅的光谱曲线卷积的结果^[6]。利用光谱分析仪测量了传感光栅的反射谱, 如图 6 所示, 由图可知, 两个传感光栅的峰值波长分别为 1523.60 nm 和 1526.06 nm, 峰值波长差为 2.46 nm, 与传感器的测量结果基本一致。

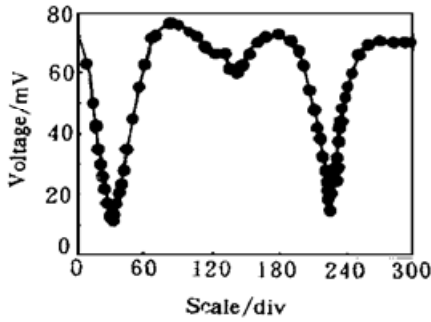


Fig. 5 Curve of voltage output of the sensor when filter grating is tuned

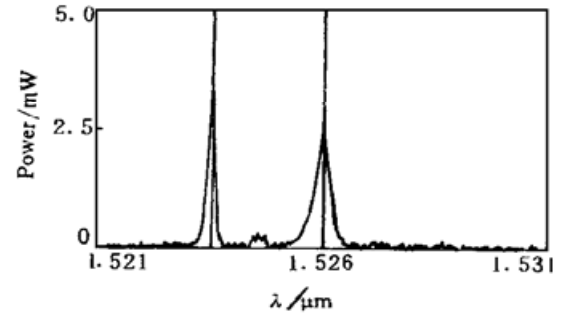


Fig. 6 Reflection spectrum of multiplexed sensing grating 1 and 2

实验中传感光栅的峰值波长位置主要是通过测量毫伏表电压信号的变化曲线来确定的, 因此波长测量的分辨率主要取决于毫伏表的最小可分辨电压值, 由以上的波长位置确定方法可知, 波长测量分辨率 $\delta\lambda$ 可以由以下方法确定: 波长分辨率由图 5 中波形两侧线性区域拟合直线斜率的平均值 $\Delta V/\text{div}$ 、毫伏表可分辨的最小稳定显示值电压 δV 和波长调谐灵敏度 $\Delta\lambda/\text{div}$ 三方面因素共同决定, 即波长分辨率可表示为

$$\delta\lambda = \left(\frac{\Delta V}{\text{div}}\right)^{-1} \delta V \frac{\Delta\lambda}{\text{div}} \quad (2)$$

(2) 式中 $\Delta V/\text{div}$ 可由毫伏表电压变化曲线实验测得, 由图 5 可知两个透射峰的 $\Delta V/\text{div}$ 平均值分别为 2.295 mV/div 和 2.630 mV/div; δV 主要决定于放大电路和毫伏表的精度, 对于本工作的实验测量系统, 由于信噪比较高, 毫伏表可分辨的最小稳定值电压 δV 为 1.0 mV, 因此由 (2) 式可知, 传感器的波长测量分辨率 $\delta\lambda$ 近似为 0.005 nm。由于这一波长分辨率远高于常规光谱分析仪的波长分辨率, 因此目前尚无法对这一波长分辨率进行直接测量。

光纤光栅的峰值波长变化与其最小可探测应变量 $\delta\varepsilon$ 有以下关系:

$$\delta\varepsilon = \delta\lambda \eta_{\lambda B} \quad (3)$$

由上式可知, 基于 0.005 nm 的波长分辨率, 复用传感器的应变测量分辨率为 5.7×10^{-6} 。

实验中, 采用的是透射型复用传感检测方案(由光电探测器测量滤波光栅的透射信号),

这一方案可以避免不必要的功率损失,在单点传感测量和波分复用传感的光栅数目较少时,可以获得很高的测量灵敏度;当波分复用传感的光栅数目较多时,图 5 中波峰两侧线性区拟合直线的斜率将会减小,从而导致测量灵敏度降低,这时可以采用反射型复用传感检测方案,即由光电探测器测量滤波光栅的反射信号,然后进行信号处理。反射型方案的优点是传感光栅波分复用数目的增多,并不引起测量灵敏度的降低,但是反射型方案含有较多的耦合器,光能利用率较低。

结 论 利用调谐滤波技术可以实现对多个光纤光栅的复用传感信号进行检测,其测量信噪比高、分辨率高,操作简便,成本低廉。进一步增大滤波光栅的线性调谐范围,并结合时分和多路复用技术,可以获得很高的复用容量。

参 考 文 献

- [1] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J *et al.*. Fiber grating sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442-1463
- [2] Weis R S, Kersey A D, Berkoff T A. A four-element filter grating sensor array with phase-sensitive detection. *IEEE. Photonics Tech. Lett.*, 1994, **6**(12): 1469-1472
- [3] 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
- [4] Jackson D A, Ribeiro A B L, Reekie L *et al.*. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14): 1192-1194
- [5] Hu Y, Chen S, Zhang L *et al.*. Multiplexing Bragg gratings using combined wavelength and spatial division techniques with digital resolution enhancement. *Electron. Lett.* 1997, **33**(23): 1973-1975
- [6] Wang Jiang, Liu Zhiguo, Ge Chunfeng *et al.*. The measurement of broad-band fiber grating transmission spectrum using tunable fiber grating ring laser. *Proc. SPIE*, 1998, **3555**: 474-478
- [7] 刘志国, 张艺兵, 开桂云等. 新型光纤光栅线性调谐方法. *光学学报*, 1998, **18**(12): 1731-1734

Multiplexed Fiber Bragg Grating Sensor Using Tunable FBG Filter Technique

Liu Yunqi Liu Zhiguo Guo Zhuanyun Dong Xiaoyi
(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

K S Chiang

(*Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong*)

(Received 2 January 1999; revised 4 May 1999)

Abstract A scheme of detecting multiplexed signal of fiber Bragg grating (FBG) sensor using cantilever beam tunable filtering technique is presented. The principle of the sensor is analyzed and the wavelength divided multiplex sensing property is demonstrated experimentally. The results of sensing measurement are accord with the results measured with optical spectrum analyzer. The wavelength resolution of the sensor is mainly determined by the minimal detectable optical power of the system. The wavelength resolution of the measurement is 0.005 nm and strain resolution is 5.7×10^{-6} , due to the high sensitivity photodetection system.

Key words fiber Bragg grating, multiplexed sensing, tunable filter.