

文章编号: 0253-2239(2006)08-1132-4

基于虚拟仪器和可调谐激光技术的光纤光栅 传感系统*

汪弋平 李安民 恽斌峰 崔一平**

(东南大学先进光子学中心, 南京 210096)

摘要: 提出了一种新颖的基于虚拟仪器(VI)和可调谐激光技术的光纤光栅(FBG)传感系统,利用可调谐激光对由光纤光栅组成的传感器阵列进行波长扫描,实现了多根光栅的复用准静态解调,并结合抖动技术和反馈环结构,使得探测信号在每一根传感光栅中心波长处过零,以提高系统在测定波长偏移时的分辨力。当反馈环工作在闭环状态下时,该系统还可对单根光栅实现动态跟踪锁定,实现单根光栅的动态解调。该传感系统的数据采集采用虚拟仪器技术,通过多通道同时输入输出实现了在线实时解调。实验采用了4根光栅组成传感阵列,获得了静态多根光栅小于 $1\ \mu\epsilon$ 和单根光栅动态频率 $10\ \text{Hz}$ 时 $3.3\ \text{ne}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的解调分辨力,动态应变范围在 $850\ \mu\epsilon$ 。

关键词: 光纤光学; 光纤光栅传感器; 可调谐激光; 虚拟仪器; 跟踪锁定; 分辨力

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Fiber Bragg Grating Sensor System Based on Virtual Instrument and Tunable Laser Technology

Wang Yiping Li Anmin Yun Binfeng Cui Yiping

(Advanced Photonics Center, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: A novel fiber Bragg grating (FBG) sensor system based on virtual instrument (VI) and tunable laser technology is proposed. The fiber wavelength sweep is made for Bragg grating sensor array by the tunable laser source and thus the quasi-static monitoring for multiple FBG sensors is realized. The system also combines dither technique and a feedback loop arrangement, produces a zero crossing at each of the FBG central wavelength and provides improved resolution in determining the Bragg wavelength shifts. The system can also operate in dynamic tracking mode to realize the dynamic demodulation of a single sensor. The data acquisition device introduces the VI technique and simultaneous multiple-channel input and output make the system perform the function of real-time monitoring. Four-element FBG sensors are adopted in the experiment and demodulation resolutions of less than $1\ \mu\epsilon$ and $3.3\ \text{ne}/\sqrt{\text{Hz}}$ at $10\ \text{Hz}$ for static scanning mode and dynamic tracking mode respectively, are demonstrated.

Key words: fiber optics; fiber Bragg grating sensor; tunable laser; virtual instrument; track and lock; resolution

1 引 言

光纤布拉格光栅具有较低的插入损耗,并且它的频宽窄、反射率高,是一种理想的光学滤波器^[1]。当光纤光栅受到温度或应力的扰动时,其中心波长的漂移呈线性变化,这种线性变化为应力,温度等物理参量的检测提供了一种很好的传感元件,与传统的电传感器相比,光纤光栅传感器具有不受电磁波干扰,抗腐蚀性强,灵敏度高,适合于埋入材料内部构成智能材料和结构等优点。并且光纤光栅传感器

是以波长编码的,这种突出的优点使它更易于构成分布式传感网络^[2,3],因此,以光纤光栅技术为基础的传感器技术已成为研究热点^[4,5]。

本文采用可调谐激光光源和虚拟仪器(VI)技术,结合抖动技术和反馈环结构组成分布式光纤光栅传感系统,实现了对多个光纤光栅传感器的准静态波长解调和单根光栅的动态跟踪解调,该传感系统具有自动化程度高、实时解调和分辨力较高的特点。

* 江苏省自然科学基金(BK2004207)和国家杰出青年科学基金(60125513)资助课题。

作者简介: 汪弋平(1980~),男,江西乐平人,东南大学电子工程系先进光子学中心博士研究生,主要从事光纤光栅及其传感领域的研究。E-mail: jeremy_ff@sina.com

** 通信联系人。E-mail: cyp@seu.edu.cn

收稿日期: 2005-11-02; 收到修改稿日期: 2006-03-06

2 实验装置及工作原理

光纤光栅分布式传感系统如图 1 所示, 主要包括光路和电路两大部分。该系统采用掺铒光纤放大器(EDFA)、可调谐光纤法布里-珀罗滤波器(FPP)、光耦合器(Coupler), 光隔离器(Isolator)构成环形谐振腔产生激光^[6,7], 并通过控制加载在光纤法布里-珀罗滤波器上驱动电压来改变滤波器的腔长, 以获得可调谐的激光输出, 这里光纤法布里-珀罗滤波器的选择原则是, 为了获得单波长的激光, 该滤波器的自由光谱范围(FSR)应大于掺铒光纤放大器的增益带宽。电路部分由乘法器(Mixer), 抖动信号发生器(Dither signal), 低通滤波(LPF)和积分器以及功率放大器(Amplifier)组成。传感光栅阵列应注意选择每个光栅的中心波长 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 及其工作范围 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \dots, \Delta\lambda_n$ 互不重叠, 且各应选

择在光纤法布里-珀罗滤波器的自由光谱范围内。可调谐激光经耦合器输出到光纤光栅阵列后, 逐次扫描各个光栅, 当激光与任一光纤光栅的中心波长逼近时, 将在光电探测管上获得信号输出, 该信号的强度正比于激光模式光谱 $L(\lambda - \lambda_0)$ 和光栅光谱 $G(\lambda - \lambda_0)$ 的卷积积分^[8]。假设它们都是高斯函数, 表示为

$$L(\lambda - \lambda_0) = \frac{2P_0}{\Delta\lambda_m} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \cdot \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_m}\right)^2\right], \quad (1)$$

$$G(\lambda - \lambda_0) = R \cdot \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\Delta\lambda_B}\right)^2\right], \quad (2)$$

其中 P_0 为激光功率, $\Delta\lambda_m$ 为激光的半峰全宽(FWHM), λ_0 为激光中心波长; R 为光纤光栅的反射率, λ_B 为光栅波长, $\Delta\lambda_B$ 为光栅的半峰全宽。

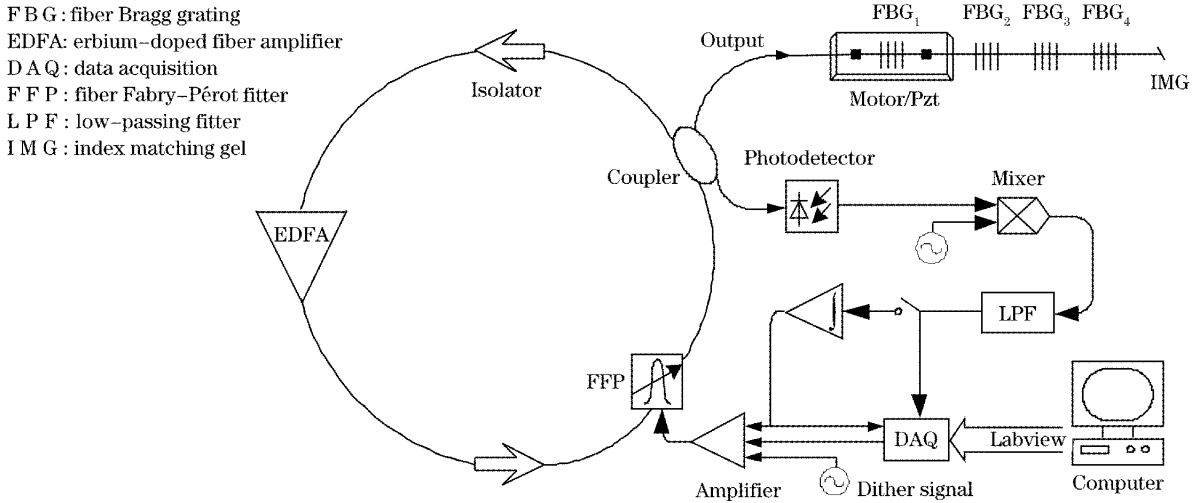


图 1 实验装置原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

探测的输出光功率信号强度为

$$I_{out} = \eta \int_0^{\infty} L(\lambda - \lambda_0) G(\lambda - \lambda_B) d\lambda, \quad (3)$$

其中 η 为与光路损耗有关的常量, 通常光栅的谱宽 $\Delta\lambda_B$ 比激光模式的谱宽 $\Delta\lambda_m$ 大很多, 因此(3)式可化简为

$$I_{out} = \eta P_0 R \cdot \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_B}\right)^2\right], \quad (4)$$

其中 $\Delta\lambda$ 为光纤光栅和激光的中心波长差。为了提高系统解调精度, 引入一个高频低幅度的抖动信号调制该激光谱线, 此时 $\lambda_0 = \bar{\lambda}_0 + \Delta\lambda_0 \sin \omega t$, 则(4)式的 $\Delta\lambda$ 变为

$$\Delta\lambda = \Delta\bar{\lambda} + \Delta\lambda_0 \sin \omega t, \quad (5)$$

其中 $\Delta\bar{\lambda}$ 为光纤光栅和激光模式的平均波长差, ω 为抖动信号的频率, $\Delta\lambda_0$ 为抖动波长调制的幅度。则

$$I_{out} = \eta P_0 R \cdot \exp\left[-4\ln 2 \left(\frac{\Delta\bar{\lambda} + \Delta\lambda_0 \sin \omega t}{\Delta\lambda_B}\right)^2\right], \quad (6)$$

将(6)式进行泰勒展开(这里忽略 3 阶以上的级数):

$$I_{out} = I_{out}(\Delta\bar{\lambda}) + \frac{\partial I_{out}(\Delta\lambda)}{\partial \Delta\lambda} \Big|_{\Delta\lambda = \Delta\bar{\lambda}} \Delta\lambda_0 \sin \omega t + \frac{\partial^2 I_{out}(\Delta\lambda)}{2! \partial (\Delta\lambda)^2} \Big|_{\Delta\lambda = \Delta\bar{\lambda}} (\Delta\lambda_0 \sin \omega t)^2 + \dots, \quad (7)$$

其中第一项为直流分量,第二项为基频分量,第三项为二次谐波分量,将输出光功率信号与参考抖动信号混频再经过低通滤波后将得到基频分量的振幅值,该振幅值与激光和光栅中心波长相关联,当二者的中心波长一致时,光功率处在峰值处,其微分为零,因此上述基波幅度为零^[9]。

因此在复用多根光栅的准静态分布式传感情况下,如果给光纤法布里-珀罗滤波器施加周期性的锯齿波产生持续可调的激光输出,逐次扫描各个光栅,当它们中心波长一致时,上述基波幅度为零,通过记录此时光纤法布里-珀罗滤波器上驱动电压的大小即可解调出光栅的中心波长。

对单根光栅的动态跟踪测量情况下,利用输出光功率基频分量的振幅值经过积分器产生的反馈信号来动态调节激光中心波长,使得激光中心波长与光栅中心波长保持一致,持续记录此时的反馈电压则可解调出传感光栅中心波长的动态变化。

3 实验结果及讨论

实验采用四根光纤光栅,中心波长在 1546 nm, 1548.8 nm, 1554.5 nm 和 1560.1 nm,首先对四根光栅组成的传感阵列进行准静态传感测试,将刻有中心波长在 1554.5 nm 光栅的光纤一端固定,另一端固定在步进电机上,光纤两端长 16.5 cm,步进电机每一步移动的距离是 7 nm,实验中每次电机移动 2000 格。采用 Micron Optics 公司的光纤法布里-珀罗滤波器,其自由光谱范围约为 40 nm,带宽约为 0.1 nm,中心波长和驱动电压关系为 3.6 pm/mV,数据采集系统(DAQ)使用虚拟仪器技术^[10],所用软件是 Ni 公司的 Labview 7,数据采集卡同样使用 Ni 公司的 PCI-6251,该采集卡拥有 16 bit 精度,含 16 个模拟输入及 4 个模拟输出通道,实验通过虚拟仪

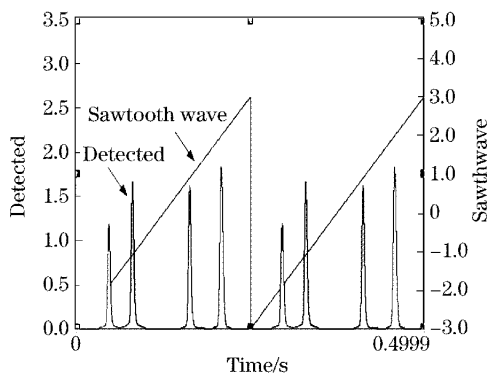


图 2 直接输出光信号

Fig. 2 Direct output signals

器产生频率 4 Hz,幅值 6 V 的锯齿波加在光纤法布里-珀罗滤波器上,产生周期性可调谐激光对光纤光栅进行扫描,直接输出的光信号如图 2 所示,图 3 是对本系统加上峰峰-值 20 mV,频率 1.5 kHz 的抖动信号后的输出光信号,采集卡输入通道 ai0 和 ai2 分别采集图 3 所示的光纤布拉格光栅(FBG)微分信号和锯齿波信号,进入虚拟仪器处理后得到光纤布拉格光栅微分信号过零点所对应的光纤法布里-珀罗滤波器驱动电压。由于存在温度及应力的交叉敏感问题^[11],实验中将 1546 nm 的光栅作为参考光栅,由于参考光栅与传感光栅处于相同的温度环境中,因此传感光栅与参考光栅波长偏移的差值即为纯应力所致的波长偏移,从而减小温度对解调系统的影响。

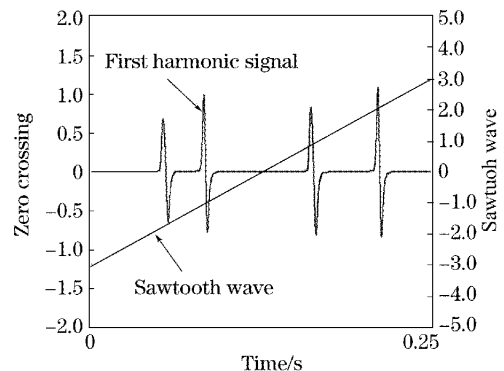


图 3 抖动调制后输出光信号

Fig. 3 Output signals after modulation

图 4 显示了传感光栅及参考光栅驱动电压差与步进电机步数的对应关系,实验中电机每次移动 2000 格,产生 $85 \mu\epsilon$ 的应变,从图 4 得到应变与光纤法布里-珀罗滤波器驱动电压的关系为 $2.98 \mu\epsilon/\text{mV}$,线性度达到 0.998,依据 光纤法布里-珀罗滤波器

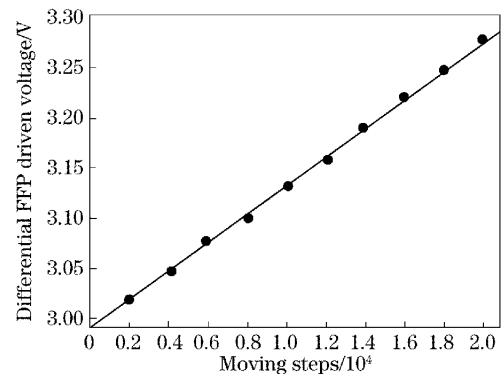


图 4 传感光栅和参考光栅对应的法布里-珀罗滤波器驱动电压差与移动格数的关系

Fig. 4 Relationship between differential fiber Fabry-Pérot filter driven voltage and steps of motor corresponding to sensor and reference grating

3.6 pm/mV的波长电压对应关系,可得到光纤光栅应变与中心波长偏移量的关系为 1.209 pm/ $\mu\epsilon$,与典型的 1550 nm 处的理论值 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ 相符合。该驱动电压静态均方根误差(rms)值约为 0.3 mV,根据 2.98 $\mu\epsilon$ /mv 的对应关系,二者相乘可知系统静态应变条件下的分辨力小于 1 $\mu\epsilon$ 。

随后将中心波长 1554.5 nm 的光栅固定在压电陶瓷上,对单根光栅进行动态跟踪锁定测试。通过压电陶瓷给光栅施加频率 10 Hz 幅度约 120 $\mu\epsilon$ 正弦应变,调节光纤法布里-珀罗滤波器的直流偏置直到有光功率输出,闭合反馈开关,通过积分器的保持作用,输出光功率将始终保持最大,说明可调谐激光的中心波长已锁定至光栅波长的最大反射率处。用采集卡 ai0 和 ai2 通道分别采集外加信号和反馈电压信号,如图 5 所示,可以看到反馈电压随着外加应变信号的变化动态地补偿光纤法布里-珀罗滤波器的驱动电压,以使可调谐激光的中心波长始终与光栅波长保持一致,保持最大光功率输出。通过 Labview 的快速傅里叶变换于虚拟仪器获得该反馈电压的频谱如图 6 所示,系统测量带宽在 30 Hz,从图 6 中可以估算 10 Hz 时系统的动态灵敏度是 3.3 ne/ $\sqrt{\text{Hz}}$,系统的动态锁定范围由反馈电压的最

大值决定,由步进电机测定系统所能达到的最大锁定范围在 850 $\mu\epsilon$,超出量程后反馈电压消失,说明此时激光完全跳出光栅光谱范围,输出光功率为零。本系统所选光纤法布里-珀罗滤波器最大驱动频率可达 48 kHz,因此提高光纤法布里-珀罗滤波器抖动信号的频率和低通滤波器的截止频率可以实现更高频率信号的跟踪锁定。

4 结 论

实现了用可调谐激光对分布式光纤光栅传感器进行解调的传感系统,使用抖动技术和反馈环结构,使得该系统可以用于多光栅传感阵列的准静态解调和单根光栅的动态跟踪锁定,系统基于虚拟仪器技术,实现了在线实时解调,实验获得了静态多根光栅小于 1 $\mu\epsilon$ 和动态 10 Hz 时 3.3 ne/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的分辨力,动态应变范围在 850 $\mu\epsilon$ 。目前该系统只能工作在多根光栅的扫描模式或者单根光栅动态锁定方式下,如果合理地改变扫描锯齿流的流程将有可能使系统同时工作在两种模式下,这将在今后的工作中讨论。

参 考 文 献

- 1 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 2 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi *et al.*. Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 330~336 (in Chinese)
张伟刚,开桂云,董孝义等. 光纤光栅多点传感的理论实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 330~336
- 3 Gao Jianzhong, Jiang Zhuangde, Zhao Yulong *et al.*. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 633~635
- 4 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 5 K. O. Hill, G. Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1263~1276
- 6 Seok Hyun Yun, D. J. Richardson, Byoung Yoon Kim. Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11): 843~845
- 7 Jia Baohua, Sheng Qiuqin, Chen Kai *et al.*. A practical wavelength continuously tunable fiber laser with high-powered and low-noised[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(2): 133~136 (in Chinese)
贾宝华,盛秋琴,陈凯等. 一种实用化的高功率低噪声波长连续可调光纤激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 133~136
- 8 L. A. Ferreira, E. V. Diatzikis, P. J. Moreira *et al.*. Application of multimode laser diodes in the interrogation of fiber Bragg grating sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2000, **6**: 365~387
- 9 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1370~1372
- 10 National Instruments Corporation. *Labview TM User Manual* [M]. April 2003 Edition
- 11 Xingfa Dong, Yonglin Huang, Li Jiang *et al.*. Active temperature compensation design of sensor with fiber gratings [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10): 562~564

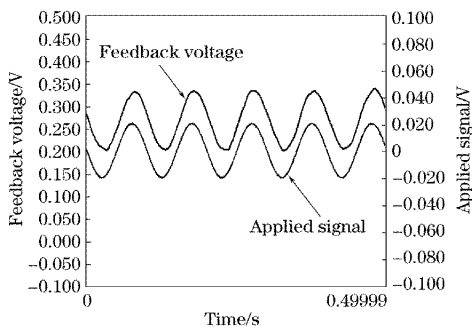


图 5 反馈电压与外加动态信号关系

Fig. 5 Relationship between the feedback voltage and applied dynamic signal

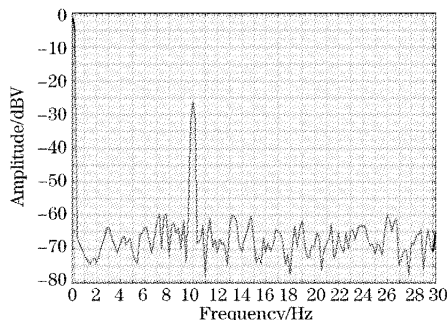


图 6 反馈电压频谱图

Fig. 6 Fourier transform spectrum of the feedback voltage