

基于可调谐滤波器的高精度宽量程光栅传感解调系统

李锦明^{1,2} 马游春^{1,2*} 闫树斌^{1,2} 刘红雨^{1,2} 冉自博^{1,2} 苏树清^{1,2}

(¹ 中北大学电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051
² 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要 设计了一种基于可调谐滤波器的高精度宽量程光纤布拉格光栅(FBG)传感解调系统,通过动态跟踪与锁定的方法将法布里-珀罗可调谐滤波器(FFP-TF)的输出激光锁定在传感光栅反射谱的-3 dB处,利用对温度不敏感的标准具对光栅反射波长进行校准,再通过插值拟合算法实现传感光栅中心波长的实时高精度解调。该解调系统解决了基于光学滤波器光栅解调系统所存在的精度与测量范围之间相互制约的矛盾。实验结果表明系统的静态波长漂移量在较宽的测量范围内为 2 pm,多项式拟合精度达 0.998。

关键词 传感器; 光栅解调; 动态跟踪与锁定; 可调谐滤波器; 动态应变

中图分类号 TN253; TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0905002

High Precision and Wide Scale Fiber Bragg Grating Sensor Interrogation System Based on Tunable Filter

Li Jinming^{1,2} Ma Youchun^{1,2} Yan Shubin^{1,2} Liu Hongyu^{1,2}
Ran Zibo^{1,2} Su Shuqing^{1,2}

(¹ National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China
² Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract A high precision and wide scale fiber Bragg grating (FBG) sensor interrogation system based on fiber Fabry-Perot tunable filter (FFP-TF) is demonstrated. By dynamic tracking and locking of the driving voltage of FFP-TF, the output wavelength of the laser is locked at the -3 dB reflectivity spectrum of the FBG. A temperature immune Fabry-Perot international telecommunication union filter is used as the reference channel. The interpolation algorithm is then used to realize high precision interrogation of dynamic strain. This design resolves the conflict between resolution and measurement scale in interrogation system based on optical filter. A high resolution better than 2 pm within wide strain measurement range is verified by experiments. The polynomial result of FBG spectrum is 0.998.

Key words sensors; fiber Bragg grating interrogation; dynamic tracking and locking; tunable filter; dynamic strain

OCIS codes 060.2310; 060.2360; 060.2370; 060.2380; 350.2770

1 引 言

由于光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有体积小、波长可选择、便于波分复用和不易受电磁干扰等特点^[1-2],能够用于温度^[3]、应变和压力等物理量的

检测^[4-5],已被广泛用于结构健康、大型机械装备和恶劣环境物理量监测等方面。目前常用的光栅解调方法主要是光学滤波器法^[6]和可调谐滤波器法^[7]等。这些解调方法通常都存在价格高和使用复杂等

收稿日期: 2013-03-08; 收到修改稿日期: 2013-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(61275166, 61178058, 91123036)

作者简介: 李锦明(1971—),男,副教授,主要从事光栅传感及微纳惯性器件等方面的研究。

E-mail: lijnming@mail.tsinghua.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: mycdhmmxy@sina.com

问题,基于可调谐滤波器的光栅解调方法具有较高的分辨率与测量范围,但随着扫描速率的提高,其解调精度与波长扫描范围都会降低。光学滤波器法具有简单、高速和性价比高的优点,但其解调精度受制于动态应变的测量范围,且在滤波器的边缘处测量误差较大,从而影响总体解调精度。

本文提出一种利用可调谐滤波器实时动态跟踪传感光纤光栅反射谱的变化来提高传感精度和量程的解调方法,采用放大自发辐射(ASE)宽带光源和可调谐滤波器实现可调谐的窄线宽激光^[8],解调控制电路通过控制可调谐滤波器的扫描电压来快速跟踪并将其输出波长锁定到光栅反射谱的-3 dB处。再利用对温度不敏感的标准具来进行动态实时标定,很好地解决了强度调制型光纤光栅解调方法所存在的非线性滤波所造成的精度较低的问题,并有效地提高了光纤光栅传感器的动态应变信号测量范围。

2 解调系统的原理与实现

2.1 光纤光栅强度解调原理

图1为强度调制型光栅的解调原理。根据光纤布拉格光栅的特点,当受到外界温度、压力、应变振动等影响时,其反射谱或透射谱曲线会发生偏移^[5]。光纤光栅强度解调系统的传感原理即感受传感光纤光栅反射谱强度的变化^[9],当传感光纤光栅的中心波长由于外界应力改变 $\Delta\lambda$ 时,传感光纤光栅的反射率则会改变 Δs ,最终导致光强的改变 $\Delta s \cdot I_0$ 。其中 I_0 是法布里-珀罗(F-P)可调谐滤波器的输出光强。由于光电探测器的输出电流和输入光强之间存在线性关系,所以输出电流信号强度可表示为

$$I_1 = \frac{1}{2} \times \frac{1}{4} (I_0 R + \beta I_0 \Delta\lambda) mA, \quad (1)$$

式中 A 为光电探测器的响应率; R 为当F-P可调谐滤波器的输出光谱在FBG的反射光谱的-3 dB处

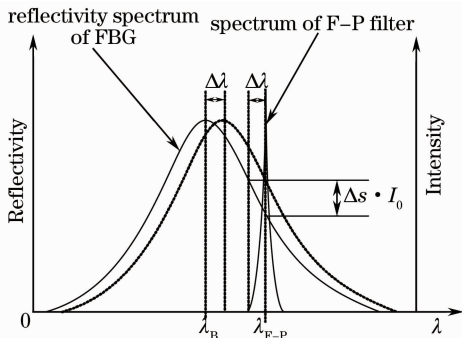


图1 光纤光栅强度解调原理

Fig. 1 Principle of the fiber grating interrogation system

时FBG的反射率; m 为耦合器、FBG传感器、传输光纤等所产生的系统光损耗。 $\beta = \frac{\Delta s}{\Delta\lambda}$ 为光栅反射率变化系数, $\Delta\lambda \approx 0.78\lambda_B \cdot \epsilon_x, \epsilon_x$ 为光纤的轴向压力, λ_B 为光栅中心波长。

解调系统通过感受光栅反射谱移动后光电探测器接收到的光强度的变化,就可以得到波长的改变量 $\Delta\lambda$,进而解调出外部应力信息^[7]。

2.2 光栅传感解调系统组成

基于动态跟踪与锁定的光栅传感解调系统如图2所示,主要包括传感用的FBG、ASE光源(产品型号L80M,功率10 mW)、法布里-珀罗光纤可调谐滤波器(FFP-TF,线宽0.014 nm)、定向耦合器、标准具(FPIF,谱间距800 pm)、光电探测器(PD)、基于LVDS接口的8通道串行模数(A/D)转换器(AD9222,采样频率20 MHz,位数12 bit)、16位数模(D/A)转换器、高压驱动放大电路,以及基于现场可编程门阵列(FPGA)的实时解算与控制电路(包括多扫描步长控制算法、三角波生成电路、A/D与D/A控制电路等)。实时解算与控制电路是本系统的核心部分,控制电路根据预设的扫描过程生成三角波信号,三角波信号在高压放大电路的作用下直接驱动可调谐滤波器并输出可调谐激光。可调谐滤波器输出的光经过耦合器后分为两部分,进入传感光栅反射回来的光又通过耦合器进入光电探测器,另一部分光经过隔离器后进入标准具而产生具有梳状特性的透射峰,通过标准具来进行动态标定可有效提高光栅反射谱峰值波长的解调精度。

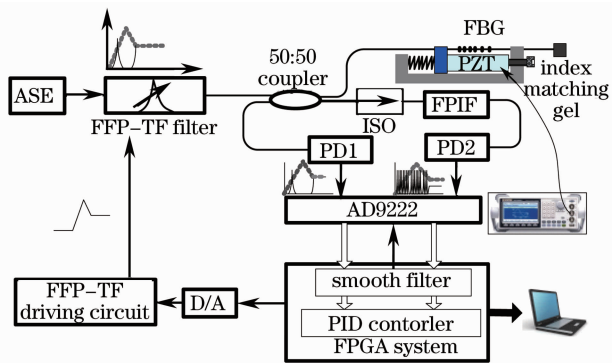


图2 动态跟踪与锁定光栅传感解调系统组成

Fig. 2 Experimental setup for dynamic tracking and locking grating sensor interrogation system

为了实现动态应变信号的传感与测量,实验中将传感光栅的一端直接粘接于动态应变传感装置的固定端,另一端粘接于活动端,活动端在弹簧与压电陶瓷(PZT)的共同作用下产生左右变化的位移,PZT通

过信号发生器来进行直接驱动,实验结果直接以 PZT 的驱动电压来表示动态应变信号的变化特性。

2.3 动态跟踪与锁定的扫描结果

基于 FPGA 的解调与控制电路在动态应变传感之前先产生三角波可调谐滤波器扫描电压,并在三角波驱动电压的上升沿过程寻找传感光纤光栅反射谱的最大值和标准具的峰峰值位置及其 Mag Flag 特征波长标记,而在下降沿开始将可调谐滤波器的输出波长锁定在传感光纤光栅反射谱的-3 dB 处。当传感光纤光栅受外界应力作用时,反射谱的变化超出预先设定的理想线性工作区间后,解调控制电路通过控制可调谐滤波器的扫描电压来快速跟踪并重新将其输出波长锁定到反射谱的-3dB 处;通过解算传感光纤光栅反射谱的变化与扫描电压的值可以精确地解算出光栅反射谱中心波长的变

化^[8]。根据传感光纤光栅反射谱变化速率的不同,解调系统可自适应调节可调谐滤波器的扫描步长,以便快速扫描跟踪并锁定反射谱的-3 dB 位置,由于可调谐滤波器的扫描范围很宽,因而该设计可满足对高速宽量程动态应变信号的测量需求。反射谱信号和可调谐滤波器驱动电压信号分别如图 3(a)和(b)所示。由于可调谐 F-P 滤波器是利用 PZT 调节来改变输出波长,在高速扫描时,PZT 具有非线性效应和迟滞效应,导致 F-P 滤波器扫描波长随温度变化产生漂移,因此在系统中加入参考通道来解决这个问题,参考通道由对温度不敏感的标准具组成,其输出的每个透射峰对应的波长为定值^[10]。利用这些波长值,可对检测到的光栅反射谱进行动态矫正,以消除扫描激光器波长扫描非线性问题。标准具的输出信号如图 3(c)所示。

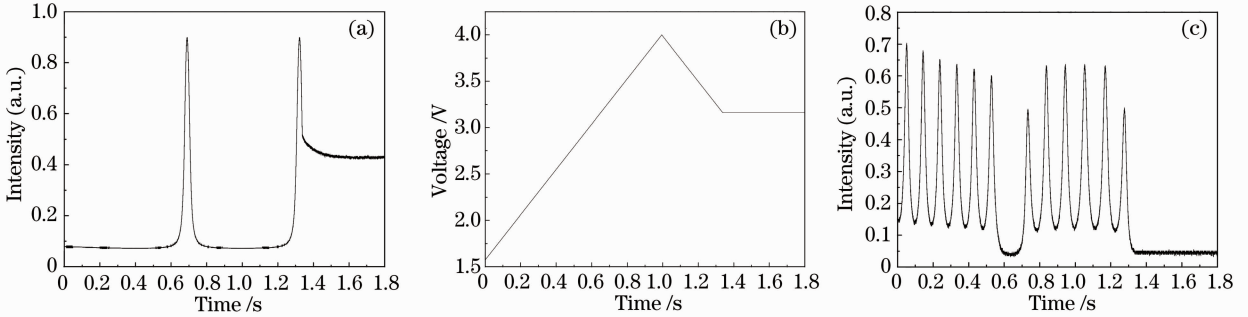


图 3 (a) 光栅反射谱; (b) 滤波器扫描电压; (c) 标准具输出

Fig. 3 (a) FBG reflection spectrum; (b) scanning voltage of filter; (c) equidistant multi-wavelength spectrum of FPIF

4 实验结果与分析

4.1 静态条件下的实验结果与分析

在三角波上升沿扫描过程,将采集到的光栅反射谱和标准具透射谱数据发送到计算机,根据标准具的透射谱可以解算出三角波扫描电压所对应的可调谐滤波器输出波长,再对光栅反射谱与扫描电压所对应的扫描波长进行三次多项式拟合,拟合结果如图 4 所

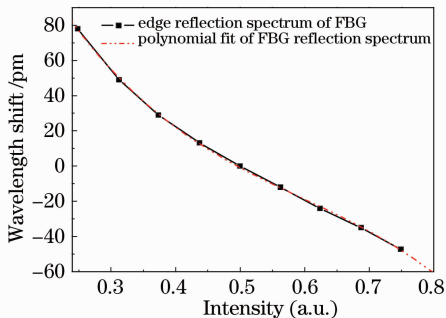


图 4 FBG 反射谱拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of FBG reflective spectrum

示。图中红色点画线为对应的拟合曲线,表示为

$$\Delta\lambda_I = 264 - 1077 \times I + 1519 \times I^2 - 851 \times I^3, \quad (2)$$

式中 I 为光栅反射谱的光强, $\Delta\lambda_I$ 为光栅反射谱强度变化所对应的波长变化量,公式的拟合精度为 0.998。

可调谐滤波器自适应跟踪与锁定的电压变化所对应的光栅中心波长变化计算式为

$$\Delta\lambda_{FP} = k_{FP} \times (V_{FP} - V_{Lock}), \quad (3)$$

式中 $k_{FP} \approx 0.32$ pm/mV,为实验中可调谐滤波器的驱动电压所对应的波长扫描系数, V_{FP} 为可调谐滤波器的自适应跟踪扫描电压, V_{Lock} 为光栅反射谱-3 dB 处的初始锁定电压,结合(2)式与(3)式可得光栅中心波长变化的实时解调结果 $\Delta\lambda_B$ 为两者之和:

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_I + \Delta\lambda_{FP}. \quad (4)$$

在室温条件下,当传感光栅处于静止状态时,将

采集到的光栅反射谱与扫描电压代入(1)式进行解算,解算结果如图5所示。由图可以看出,在没经过滤波时,由于采集噪声的影响,波长漂移为 ± 3 pm左右,而经过8点平滑滤波后,光栅解调系统的波长漂移可以达到2 pm。

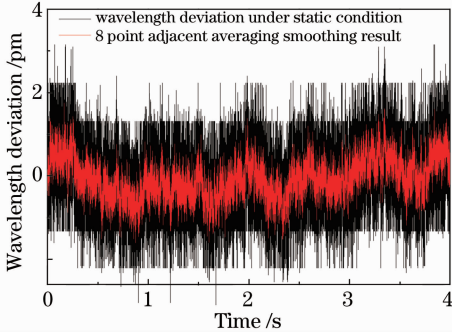


图5 静态时系统的波长漂移量

Fig. 5 Wavelength deviation under static condition

4.2 动态实验结果与分析

图6为PZT在10 V峰峰值驱动电压与2 kHz动态频率条件下传感光栅反射谱-3 dB处的动态锁定与跟踪过程。从图中可以看出光栅反射输出谱的反射率变化区间为0.35~0.65,可调谐滤波器的驱动电压变化规律呈现出非线性特性,即不同位置扫描电压的增幅不一样。这主要是由于光栅反射谱中心波长变化的速度超出了连续跟踪的条件,实验中设计了两个不同的扫描电压的步长,小步长可满足高精度低速宽量程动态应变信号的锁定与跟踪,大步长可满足对高速变化的动态应变信号的时域跟踪与锁定。解调与控制电路可根据光栅反射谱的变化幅度自动选择可调谐滤波器扫描电压的步长,以适应不同速率的动态应变信号测量。对于更高速度的动态应变信号可选择低反射率且具有较宽反射谱的光栅,或选用具有更高响应速度的可调谐滤波器,

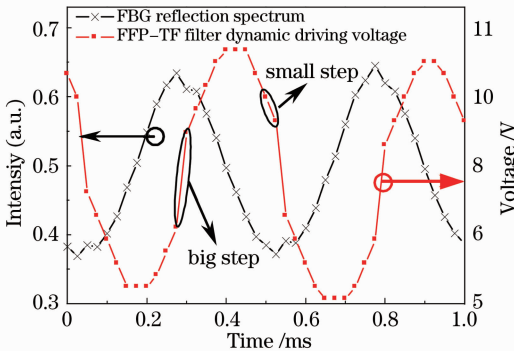


图6 2 kHz动态应变信号跟踪与锁定过程

Fig. 6 Tracking and locking process of 2 kHz dynamic strain

同时增加可调谐滤波器的扫描步长来实现。

图7为图6中动态应变引起的波长变化解调结果。从图中可以看出其信号波形有点失真,这主要是由于PZT在高速驱动下的非线性输出与可调谐滤波器在高速跟踪与锁定过程中非稳态输出波长造成的。

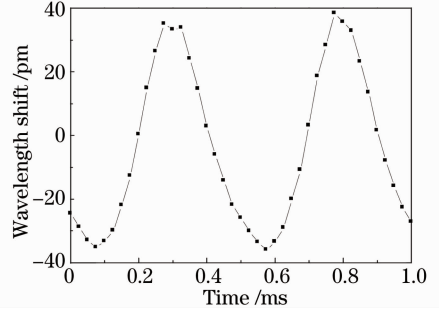


图7 2 kHz动态应变信号解调结果

Fig. 7 Wavelength shift interrogation results of 2 kHz dynamic strain

实验中为了获得更高的解调精度与动态应变信号的测量带宽,需要将可调谐滤波器的输出波长尽可能地锁定在边沿的中心区域,但受限于可调谐滤波器本身的响应速度,实验中将可调谐滤波器驱动电压的更新周设定为25 μ s,对应的实时解调信号的输出采样频率为40 kHz。

5 结 论

通过动态锁定与跟踪的方法将可调谐滤波器的输出激光锁定在光纤光栅反射谱灵敏度最高的一3 dB附近的线性变化区域,该方法可有效提高基于可调谐滤波器光纤光栅传感的测量精度和传感范围,可满足动态应变信号对高精度与宽量程的同时测量需求。对于低速的动态应变信号,解调系统的量程取决于可调谐滤波器的波长扫描范围和传感光栅本身的动态应变范围,全量程范围测量精度优于 ± 3 pm,对采样结果进行8次平滑滤波后的波长偏移量小于2 pm。

参 考 文 献

- 1 A D Kersey, T A Berkoff, W Morey. High resolution fiber grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. Electron Lett, 1992, 28(3): 236-238.
- 2 V G M Annamdas, Y W Yang, H Liu. Current development in fiber Bragg grating sensors and their applications[C]. SPIE, 2008, 6932: 69320D.
- 3 Yang Xiufeng, Zhang Chunyu, Tong Zhengrong, et al.. Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0404005. 杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘, 等. 一种新型光纤光栅温度传感特性

- 的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0404005.
- 4 Pi Haoyang, Liu Qiong, Ye Qing, *et al.*. Analysis and experimental study of inner stress for metallized fiber Bragg gratings[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305008.
皮浩洋, 刘琼, 叶青, 等. 金属化光纤光栅内应力的分析和实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305008.
- 5 Ye Zhenxing, Su Yang, Zhu Yong, *et al.*. Study on the pressure sensing measurement based on Stokes parameters of fiber gratings [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39 (6): 0605003.
叶振兴, 苏洋, 朱勇, 等. 基于光纤光栅斯托克斯参量的压力传感测量研究[J]. 中国激光, 2012, 39 (6): 0605003.
- 6 Q Wu, Y Y Semenova, A Sun, *et al.*. High resolution temperature insensitive interrogation technique for FBG sensors [J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(4): 653-656.
- 7 Li Zhengying, Zhou Zude, Tong Xinglin, *et al.*. Research of high-speed large-capacity fiber Bragg grating demodulator [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306007.
李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306007.
- 8 Hang-Yin Ling, Kin-Tak Lau, Wei Jin. Characterization of dynamic strain measurement using reflection spectrum from a fiber Bragg grating[J]. Opt Commun, 2007, 270(1): 25-30.
- 9 J Y Wang, T Y Liu, C Wang, *et al.*. A micro-seismic fiber Bragg grating (FBG) sensor system based on a distributed feedback laser[J]. Meas Sci Technol, 2010, 21(9): 094012.
- 10 H J Park, M Song. Linear FBG temperature sensor interrogation with Fabry-Perot ITU multi-wavelength reference[J]. Sensors, 2008, 8(10): 6769-7.

栏目编辑: 王晓琪