

文章编号: 1001-4322(2005)12-1773-05

一种新型温度自适应光纤光栅动态传感系统*

吴晓冬, 陈 军, 陈哲敏

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 研究了采用温度控制光纤 Bragg 光栅(FBG)作为信号解调器件的自适应光纤光栅动态传感系统。系统利用半导体制冷器件对滤波用 FBG 进行温度控制,以改变 FBG 的窄带滤波波长,使之在合适的滤波波长工作,以适应测量环境温度变化,实现对传感器环境温度变化的自适应。通过采用参考信道,去除系统噪声,提高测量精度。系统动态应变传感精度达到 $9.745 \times 10^{-10}(\text{Hz})^{-1/2}$ 。

关键词: 光纤光栅; 传感器; 温度控制

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

近年来,光纤 Bragg 光栅(FBG)作为新型传感器件在应变和温度传感领域受到广泛关注^[1-3]。光纤光栅传感器在应变传感领域可以分为准静态传感和动态传感。准静态传感目前已在桥梁、隧道和矿井监测和材料检测等现场获得一定的应用^[4,5]。动态测量主要侧重于频域信号的分析,目前也有较大的进展^[6,7]。对于光纤光栅传感系统的关键技术 Bragg 波长信号的解调,目前在该领域已进行了多方面研究:基于 FBG 滤波法^[8,9],马赫-泽德干涉法^[10],法布里-珀罗滤波法^[11],可调光源法^[12],DWDM(dense-wavelength demultiplexing)调制法^[13],AOTF(acoustic tuned integrated optics filter)法^[14]等。

本文阐述了一套新型的 FBG 动态信号传感系统,采用滤波 FBG 作为对传感 FBG 信号的解调器件,通过温度控制滤波 FBG 达到解调系统对传感 FBG 环境温度的自适应。

1 原理与装置

1.1 实验系统

实验装置如图 1 所示。光纤光栅传感器(传感光纤光栅 Sensor FBG)采用嵌入粘合方式安装在岩石结构中。滤波 FBG 反射率大于 90%,波长宽度为 3 dB($<0.3 \text{ nm}$)。宽带光源(ASE Broadband Light Source)发出的宽带光经过光纤循环器(Optical Fiber Circulator)后进入传感光纤光栅,传感光纤光栅 Bragg 波长光被反射。反射光经光纤循环器后被耦合器(3 dB Coupler)分为两路,一路通过温控的滤波光纤光栅(Filter FBG)后

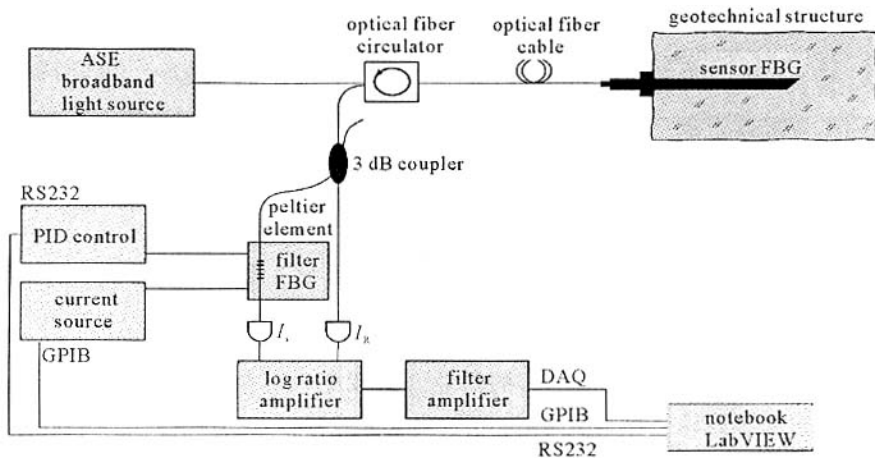


Fig. 1 Setup of FBG measurement system

图 1 FBG 测量系统装置图

* 收稿日期 2005-04-20; 修订日期 2005-09-30

基金项目 国家自然科学基金委-中国工程物理研究院联合基金资助课题(10376033)

作者简介 吴晓冬(1978—),男,博士研究生,主要从事光纤光栅传感方面研究,E-mail:xfuwxd@hotmail.com。

联系作者 陈 军(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事激光及其应用方面的研究,E-mail:chenjun1@zju.edu.cn。

由光电二极管接收并转换为电流信号,另一路直接被光电二极管接收转换为电流信号作为参考信号。两路电流信号经 Log 放大器(Logarithmic Ratio Amplifier)信号相除,经过低通滤波放大器(Filter Amplifier)后由数据采集卡(DAQ)进行 A/D 转换采样。计算机(Notebook)中的 LabVIEW 程序对数据进行分析 and 处理。PID 控制器(PID Control)对滤波 FBG 上的 Peltier 贴片调节温度,并通过 RS232 接口和计算机上 LabView 程序通信,同时 LabView 程序通过 GPIB 控制直流电源为 Peltier 贴片供电。

系统的工作流程如下:首先通过测量滤波 FBG 温度以及传感 FBG 环境变化带来的漂移,计算出工作点温度和所需的电流。调节通过滤波 FBG 上 Peltier 片的电流,调制工作点。将滤波 FBG 的温度调整到最佳工作点之后开始进入动态传感,等待触发。获得触发信号之后,记录信号,并做数据处理。系统每隔设定的时间,调制工作点,重复以上步骤进行持续的工作。

1.2 传感原理

传感器上传感 FBG 的 Bragg 波长和应变的关系为

$$\varepsilon = \Delta\lambda / 0.78\lambda_0 \quad (1)$$

式中 λ_0 是传感光纤光栅的 Bragg 波长, ε 是应变, $\Delta\lambda$ 是应变引起的传感光纤光栅的 Bragg 波长变化。

为实现温控滤波 FBG 对传感 FBG 的 Bragg 波长变化信号的解调,需使滤波 FBG 的透射率曲线波长和反射 Bragg 波长相匹配。如图 2 所示,传感 FBG 的中心 Bragg 波长在滤波 FBG 的透射率曲线斜坡上,此时滤波 FBG 可正常工作。当传感 FBG 因应变产生 Bragg 波长漂移 $\Delta\lambda$ (从 λ_1 到 λ_2)时,其透射率变化 Δs 。在测量范围内,由于 Bragg 波长变化 $\Delta\lambda$ 相对较小,根据小信号模型原理,可认为 Δs 和 $\Delta\lambda$ 具有线性关系。另由于光电二极管的输出电流和光强成线性关系,可得到信号通道光电二极管输出电流 I_s 与应变 ε 关系

$$I_s = (I_0 + \alpha\Delta\lambda)n = (I_0 + 0.78\alpha\lambda_0\varepsilon)n \quad (2)$$

式中 I_0 为基电流, α 为常数,取决于系统器件(包括光电二极管、滤波 FBG、光源等), n 为由光源、循环器、传感器、耦合器、光纤等光学系统带来的噪音。而参考通道的光电二极管接受到的信号为

$$I_R = An \quad (3)$$

其中 A 为常数,取决于光学系统各器件。Log 放大器对 I_s 和 I_R 作相除取 Log 的实时处理后得到电压信号

$$U = \lg\left(\frac{I_s}{I_R}\right) = \lg\left[\frac{(\alpha\Delta\lambda + I_0)n}{An}\right] = \lg\left(\frac{\alpha}{A}\Delta\lambda + \frac{I_0}{A}\right) = \lg(k\Delta\lambda + q) = \lg(0.78k\varepsilon\lambda_0 + q) \quad (4)$$

其中 $k = \alpha/A$, $q = I_0/A$ 为常数。令

$$R = 10^U = 0.78k\varepsilon\lambda_0 + q \quad (5)$$

得到

$$U = \lg(R) \quad (6)$$

经过滤波放大器后,得到

$$U' = \beta\lg(R) \quad (7)$$

其中 β 为常数,取决于 Log 放大器和滤波放大器的增益。得到此电压信号并由数据采集卡(NI-DAQ)高速采集后,经 LabView 软件的数学处理还原得到 R ,即可得到应变信号。

1.3 温度控制 FBG 和自动环境适应

在传感环境温度变化的情况下,传感 FBG 的 Bragg 波长将受到温度影响发生漂移,为匹配传感 FBG 和滤波 FBG 的波长,需调整滤波 FBG,通过对滤波 FBG 温度的控制,可跟踪滤波 FBG 处于正确的工作点上。如图 3 所示,通过对温控滤波 FBG 的温度扫描($0 \sim 50^\circ\text{C}$),可拟合得到在不同温度下输出电压信号曲线,一阶求导得到的极值(33.9°C 和 16.7°C)为系统工作点,此时滤波 FBG 具有最大的灵敏度。得到工作点后,软件通过控制温控系统,可将系统稳定在工作点。

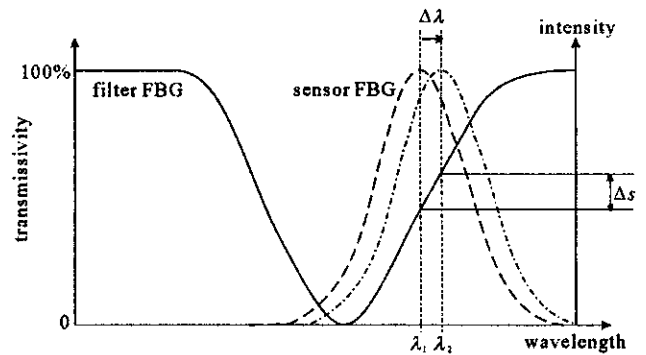


Fig. 2 Principle of the filter demodulation

图 2 FBG 滤波解调原理

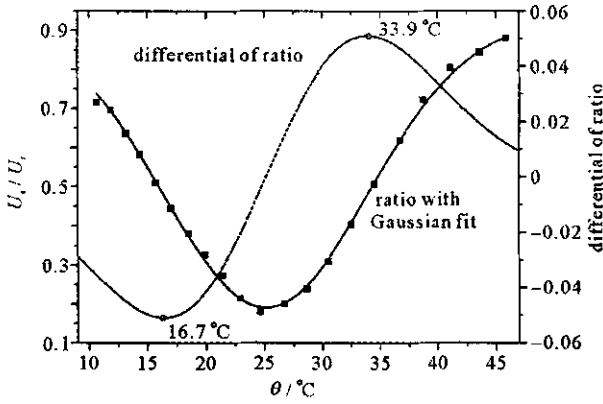


Fig. 3 Working point of the temperature controlled FBG filter

图 3 温控滤波 FBG 的工作点

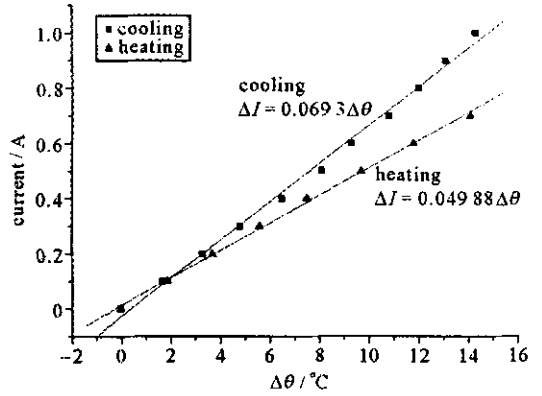


Fig. 4 Input current of temperature controller vs temperature

图 4 温控器输入电流与温度的关系

为准确设置系统的工作点,实验测定了温控滤波 FBG 模块的输入电流与温度变化关系,如图 4 所示。实验证实两者具有线性关系,但是在加热和制冷过程中其系数不同, ΔI 分别为 $0.069 3\Delta\theta$ (制冷)和 $0.049 88\Delta\theta$ (加热)。

2 实验结果

实验中光纤光栅传感器被埋入长度为 1.5 m 的长方体岩石中,同时采用了传统加速度传感器(Geophone)作为比较。激励信号为金属球沿长方体轴向敲击。FBG 传感系统采样频率为 5 kHz,系统采用自触发模式记录信号。图 5 为采样的波形时域信号和频域信号。采样时间窗口为 100 ms,其中前 10 ms 为触发前噪音。通过频谱分析(图 5 中的 FFT FBG signal 图)可以看到 FBG 信号在 1.66 kHz 具有极大的峰值,另在 0.39, 1.0, 1.8 kHz 处有较小峰值;在 Geophone 的对比信号中,也有 1.66 kHz 的尖峰,在 0.39 kHz 和 1.0 kHz 处信号较小。

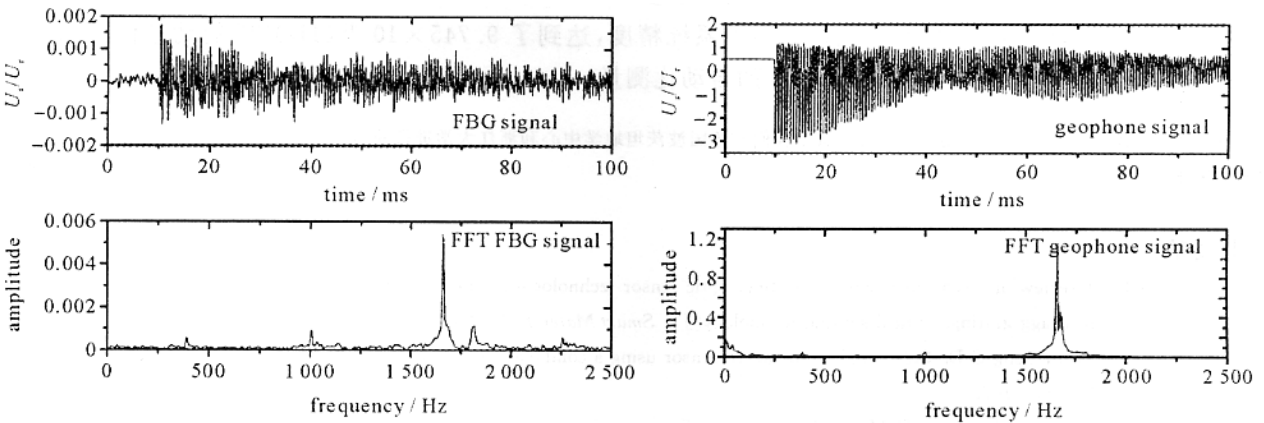


Fig. 5 Sampled signal of FBG

图 5 FBG 采样信号

图 6 显示了在频域上信号与噪声的比例,FBG 的信噪比达到了 15 dB,而 Geophone 达到了 20 dB。

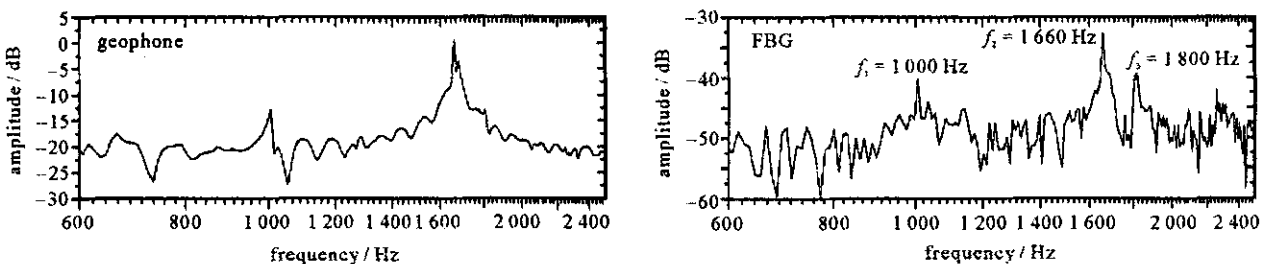


Fig. 6 Comparison of the signals in frequency domain

图 6 频域信号比较

通过实验数据我们得到系统的精度。在实验中测得的采样信号的前 10 ms 中的噪音的峰峰值为 $\Delta R_{pp} = 0.000\ 785$,得到均方根值(取 Nyquist 因子为 5)

$$\Delta R_{rms} = \frac{\Delta R_{pp}}{5} = 1.57 \times 10^{-4} \quad (8)$$

根据式(1)和式(5)可得到精度

$$\frac{\varepsilon_{rms}}{\sqrt{\nu}} = \frac{\Delta R_{rms}}{0.78k\lambda_0\sqrt{\nu}} = 9.745 \times 10^{-10} \text{ Hz}^{-1/2} \quad (9)$$

实验中 FBG 的 $\lambda_0 = 1\ 550\ \text{nm}$ k 通过以下公式实验标定获得

$$k = \frac{\Delta R}{\Delta \lambda} = \frac{\Delta R}{\Delta \lambda'} = \frac{\Delta R}{\Delta \theta} \frac{\Delta \theta}{\Delta \lambda'} \quad (10)$$

其中 λ' 为滤波 FBG 的波长。实验中,工作点温度为 $33.9\ ^\circ\text{C}$,据图 3 所示 $\Delta R/\Delta \theta = 0.052\ (1/^\circ\text{C})$ 。 $\Delta \theta/\Delta \lambda'$ 为通过实验标定,如图 7 所示 $\Delta \theta/\Delta \lambda' = 78.342\ 49$ 。

系统测得的最小应变为

$$\varepsilon_{\text{signal}} = \frac{\Delta R_{pp}}{0.78k\lambda_0} \cong 160.7 \times 10^{-9} = 160.7n\varepsilon \quad (11)$$

3 结 论

本文采用滤波 FBG 作为窄带滤波器解调模块的 FBG 动态应变传感系统,测量环境温度对 FBG 短时间内动态信号测量的影响可忽略,但长时间温度变化将导致 FBG 的 Bragg 波长漂移,常规窄带滤波装置将无法适应。本系统对滤波 FBG 进行温度控制使之在合适的窄带滤波工作波长以适应测量环境温度变化。系统的温度控制与测量操作由计算机程序控制,可实现系统对于环境温度变化的自适应。系统中引入了参考信号,消除了大部分光学系统的噪音,提高了系统精度,达到了 $9.745 \times 10^{-10}\ (\text{Hz})^{-1/2}$ 的动态传感精度。系统各模块都采用计算机通信控制,实现系统的自动化测量。

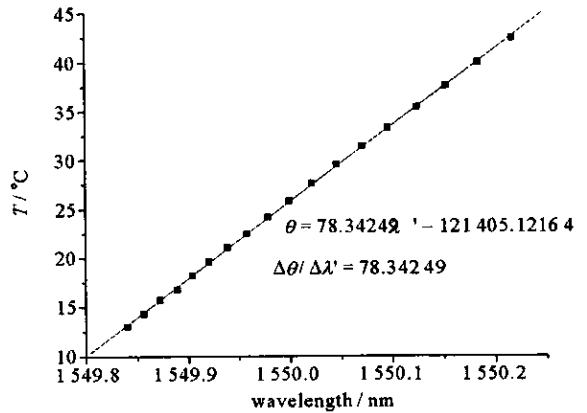


Fig. 7 Temperature variation vs Bragg wavelength of the FBG filter

图 7 温度变化与滤波 FBG 的 Bragg 波长关系

致 谢 本文提出的温控 FBG 滤波法、实验及测试是在德国波茨坦地学中心和浙江大学进行的,对于德国波茨坦地学中心的合作和帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Kersey A D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology[J]. *Opt Fiber Technol*, 1996, 2(3) 291—317.
- [2] Poloso T. Fibre Bragg gratings optical sensing technology[J]. *Smart Mater Bull*, 2001 7—10.
- [3] Liu H B, Liu H Y, Peng G D. Strain and temperature sensor using a combination of polymer and silica fibre Bragg gratings[J]. *Opt Commun*, 2003, 219 139—142.
- [4] Maaskant R, Alavie T, Measures R M, et al. Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring[J]. *Cem Concr Compos*, 1997, 19 21—33.
- [5] Ferdinand P, Jarret B, Kotrotsios G, et al. Mine operating accurate stability control with optical fiber sensing and Bragg grating technology: the European BRITE/EURAM STABILOS project[J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 1995, 13 1303—1313.
- [6] Ferraro P, Natale G D. On the possible use of optical fiber Bragg grating as strain sensors for geodynamical monitoring[J]. *Opt Lasers Eng*, 2002, 37 115—130.
- [7] Baldwin C, Yu M, Miller C, et al. Bragg-grating-based Fabry-Perot sensor system for acoustic measurement[A]. *Proc of SPIE[C]*. 1999, 3670: 342—351.
- [8] Melle S, Liu K, Measures R M. Practical fibre optic Bragg grating strain gauge system[J]. *Appl Opt*, 1993, 32 3601—3609.
- [9] Fallon R W, Zhang L, Everall L A, et al. All-fibre optical sensing system: Bragg grating sensor interrogated by a long-period grating[J]. *Meas Sci Technol*, 1998, 9 1969—1973.
- [10] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. High resolution fibre grating based strain sensor, with interferometric wavelength-shift detection[J]. *Electron Lett*, 1992, 28 236—238.
- [11] Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. Multiplexed fiber Bragg grating strain sensor with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. *Opt Lett*, 1993,

18 :1370—1372.

- [12] Liu J G , Schmidt-Hattenberger C , Borm G. Dynamic strain measurement with a fibre Bragg grating sensor system[J]. *Measurement* ,2002 ,**32** : 151—161.
- [13] Sano Y , Yoshino T. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensors[J]. *IEEE J Lightwave Technol* ,2003 ,**21** :132—139.
- [14] Christmas S P , Jackson D A. A new method for interrogation of serial arrays of dynamic FBG strain sensors[J]. *Meas Sci Technol* ,2001 ,**12** :897—900.

A temperature self-adapting fiber Bragg grating dynamic sensor system

WU Xiao-dong , CHEN Jun , CHEN Zhe-min

(*The State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation , Zhejiang University , Hangzhou 310027 , China*)

Abstract : A self-adapting FBG (Fiber Bragg grating) dynamic sensor system based on the temperature controlled filter FBG is investigated. Using the semiconductor cooling device the temperature of the FBG filter was controlled , so that the wavelength of the narrow-band filter FBG could be controlled to suit the environment temperature variation , and the self adaptation of the temperature variation be realized. Using the reference channel and wiping off the system noise , the measurement precision was improved. The system dynamic strain resolution is $9.745 \times 10^{-10}(\text{ Hz })^{-1/2}$.

Key words : Optical fiber grating ; Sensor ; Temperature control