

基于体相位光栅色散解调的布拉格光纤光栅温度监测

王彦 赵凯 刘加萍

安徽工业大学电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243000

摘要 搭建了基于光纤布拉格光栅分析仪(FBGA)解调模块的光纤光栅温度监测系统,实现了对外界环境的温度监测。利用FBGA中的数字信号处理模块获取反射光的峰值波长,拟合获得峰值波长与温度的关系,采用LabVIEW编写相应的上位机程序。该测量方法精确度较高,与恒温箱温度相比,该系统的温度误差在 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 之内。系统响应时间小于 0.5 s ,系统监测温度灵敏度约为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。当置信概率为 95.40% 时,重复性指标在 $\pm 0.0210\%$ 之内。

关键词 测量; 光纤光栅; 解调; 数字信号处理

中图分类号 TN206; TH811 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.101202

Optical Fiber Bragg Grating Temperature Monitoring Based on Volume Phase Grating Dispersion Demodulation

Wang Yan Zhao Kai Liu Jiaping

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243000, China

Abstract A fiber grating temperature monitoring system based on the fiber Bragg grating analyzer (FBGA) demodulation module is constructed, and the temperature monitoring for the external environment is realized. The peak wavelength of the reflected light is obtained through the digital signal processing module in FBGA, and the fitting method is used to obtain the relationship between the peak wavelength and the temperature. LabVIEW is used to write the corresponding upper computer program. The measurement accuracy of the proposed measuring method is high. Compared with the constant temperature experiment, the temperature error of the proposed system is within $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$, the system response time is less than 0.5 s , and the temperature sensitivity of the system is about $0.1\text{ }^\circ\text{C}$. When the confidence level is 95.40% , the repeatability index is within $\pm 0.0210\%$.

Key words measurement; optical fiber gratings; demodulation; digital signal processing

OCIS codes 120.4640; 120.4820; 120.4570

1 引言

光纤布拉格光栅(简称光纤光栅,FBG)作为传感元件,不仅具有损耗低、光谱特性好、可靠性高、易于连接等优点,并且传感信息采用波长编码,波长参量不受光源功率的波动以及连接或耦合损耗的影响,因此FBG还具有很强的抗干扰能力。此外,在一根光纤中可连续制作多个光栅,制得的光栅阵列轻巧柔软,适合作为分布式传感元件埋入材料和结构内部或贴装表面,从而实现对温度、压力、应变等的多点检测。光纤光栅传感器在土木工程、电力、能源化工等领域得到了普遍应用^[1]。目前,国内外学者广泛研究了FBG传感监测系统,包括解调技术、封装方法、温度补偿、稳定性等方面^[2-3]。郭明金等^[4]研究了光纤光栅温度传感器的不同封装形式,发现采用细不锈钢管封装的FBG温度传感器的中心波长在温度为 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 时发生突变,采用镀金封装方式的温度传感器的中心波长随温度($-70\sim 0\text{ }^\circ\text{C}$)呈线性变化。王喜昌等^[5]研究了线性滤波器解

收稿日期: 2016-04-29; **收到修改稿日期:** 2016-06-08; **网络出版日期:** 2016-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(51309001)、安徽省教育厅自然科学基金(KJ2013A055)

作者简介: 王彦(1975—),女,博士,教授,主要从事智能监测与控制、分布式光纤传感技术、结构健康监测方面的研究。

E-mail: wangyan@ahut.edu.cn

调法中光功率的比值对传感解调系统稳定性的影响,发现光功率比值恒定有利于系统的稳定性。1999年, Henderson等^[6]率先将 LabVIEW 虚拟仪器技术应用到光纤光栅解调系统中,促进了解调技术的进步。近年来,王桂英等^[7]对 LabVIEW 在光纤光栅解调系统中的应用进行了研究,但存在 FBG 系统成本过高、解调系统上位机程序编写复杂等问题。

本文搭建了基于光纤布拉格光栅分析仪(FBGA)解调模块的快速实时监测系统,对 FBG 的反射光信号进行波长解调。该系统主要包括电源、光路、信号解调及上位机显示 4 个部分。利用 FBGA 中的数字信号处理(DSP)模块获取反射光的峰值波长,拟合获得峰值波长与温度的关系,并采用 LabVIEW 编写相应的上位机(PC)程序。该系统的测量精度较高,对温度监测的响应时间小于 0.5 s,具有良好的重复性。该系统测量原理简单、成本较低、稳定可靠,可满足大型传感系统多点实时测量的需求,在实际工程中得到了初步应用。

2 光纤光栅传感基本原理

光纤光栅传感技术是在光纤内部刻入光栅。宽带光源入射时,在满足布拉格条件的情况下发生选择性反射;光栅受到外部物理场的作用时,反射光的波长随之发生变化。因此,研究反射光波长的变化可实现对被测物理量的测量^[8-10],传感原理如图 1(a)所示。图 1(b)为入射谱,图 1(c)为反射谱。图中 I 为光谱强度, λ 为波长, λ_0 为中心波长, Λ 为光栅周期。

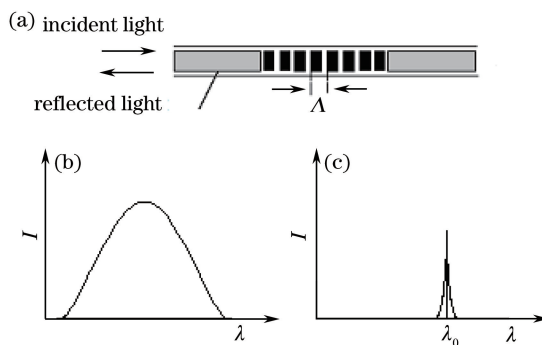


图 1 (a) 光纤光栅传感原理图; (b) 入射谱; (c) 反射谱

Fig. 1 (a) Schematic of FBG sensing; (b) incidence spectrum; (c) reflection spectrum

光纤光栅的反射光谱与光栅周期和反向耦合模的有效折射率有关,其中任意两个参量的改变都会引起 FBG 波长的变化。光纤光栅的波长表达式为^[11]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为芯模的有效折射率。当光栅所处环境的温度 (T) 变化时,光纤光栅的周期或纤芯折射率均改变,将等式两边同时对 T 作微分运算,得到 FBG 谐振波长的温度灵敏度为

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2\left(\Lambda \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + n_{\text{eff}} \frac{d\Lambda}{dT}\right). \quad (2)$$

设 ξ 为光纤光栅折射率的温度系数(热光系数), $\xi = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT}$; α 为光纤光栅的线性热膨胀系数, $\alpha =$

$\frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$, (2)式可表示为

$$d\lambda_B = 2(n_{\text{eff}}\xi\Lambda + n_{\text{eff}}\alpha\Lambda) dT. \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式,得到光纤布拉格光栅的温度传感基本公式为

$$d\lambda_B = \lambda_B(\xi + \alpha) dT. \quad (4)$$

设 $\lambda_B(\xi + \alpha) = K_T$, 其中 K_T 为光纤布拉格光栅的温度灵敏度系数。温度变化引起光纤光栅中心波长改变的表达式为

$$\Delta\lambda_B = K_T \Delta T. \quad (5)$$

对于掺铈的普通单模石英光纤,热光系数 $\xi = 7.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 线性热膨胀系数 $\alpha = 0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 光纤

光栅相对温度灵敏度系数 $K_T = 7.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。因此,通过检测光纤光栅的中心波长变化即可得到温度的变化^[12-13]。

3 基于 FBGA 的解调

搭建了基于 FBGA 的快速温度实时监测系统,该系统包括电源、光路、信号解调、上位机数据实时显示 4 个部分。采用 LabVIEW 编写相应的程序获取光纤光栅的波长信息,并完成温度监测所附加的其他功能,将温度在 LabVIEW 程序上实时显示。上位机软件部分包括实时波长显示、温度实时显示以及其他基本信息显示^[14-15]。

3.1 光纤光栅监测系统硬件部分

系统硬件部分包括宽带光源、FBGA 解调模块、环形器等。系统使用的光源(型号:ASE-C-10-FA)为频率范围为 4~8 GHz 的宽带光源,工作波长范围为 1525~1565 nm,输出功率为 10 mW。为了保证输出光功率的稳定性,使用单片机提供 5 V 直流电压。FBGA 模块在 1525~1565 nm 波段范围内的绝对波长精度为 $\pm 30 \text{ } \mu\text{m}$,显示波长分辨率为 1 μm ,响应频率最高可达 5 kHz。FBG 检测系统可实现覆盖多波长的精确测量,具有响应快速、波长分辨率高等特点。通过无运动部件的机械设计,可提高系统的可靠性,无须定期校准,且使用通用串行总线(USB2.0)可实现高速通信。

体相位光栅(VPG)为解调模块中的光谱色散元件,采用具有高灵敏度的钢钾砷(InGaAs)阵列探测器作为探测元件。FBGA 模块的输入端使用单模光纤接收光信号,光信号经过微透镜准直并通过体相位光栅色散,再经过聚焦透镜,最终将衍射场聚焦到 InGaAs 阵列探测器上。

FBG 解调系统框图如图 2 所示。

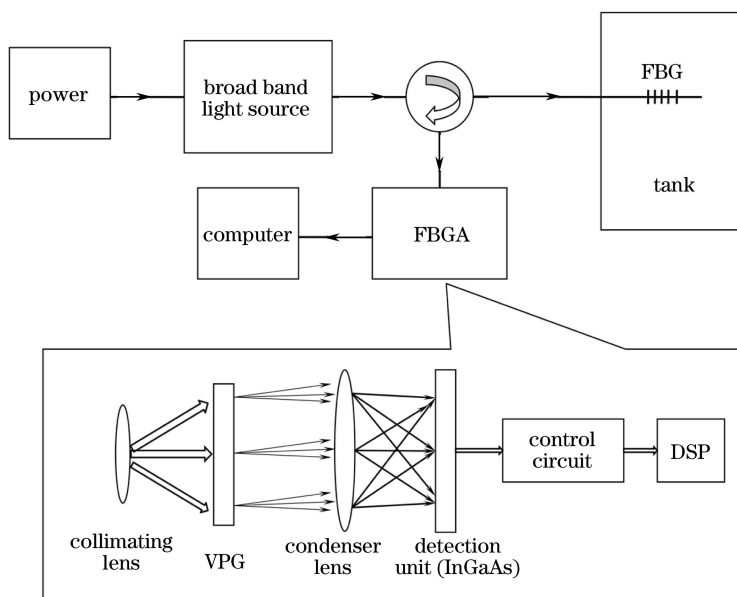


图 2 FBG 解调系统框图

Fig. 2 Diagram of FBG demodulation system

环形器的一个端口用于接收光源信号,另一个端口接入 FBG,FBG 经过环形器的第 3 个端口连接至 FBGA 解调模块。宽带光源发出的光进入光纤环形器,经过 FBG 反射的光进入 FBGA 模块,信号经过 FBGA 处理,由上位机显示峰值波长的变化等信息,从而测得温度或应力的变化。此外,可以使用光开关同时连接多路 FBG。

3.2 光纤光栅监测系统软件设计

3.2.1 连续采集

软件部分作为系统的重要组成部分,直接影响系统的稳定性、精确度及应用范围。系统采用 LabVIEW 调用 FBGA 模块内动态链接库(DLL)的方法进行编程,解决了有关动态链接库的配置问题。DLL 为包含可由多个程序同时使用的代码和数据的库,使用导入共享库工具可以方便地获取每个子 VI(VI 为实现一定功

能的 LabVIEW 代码模块)。利用这个工具,自动生成针对 DLL 每个函数的子 VI。

整个程序采用 while 循环结构与顺序结构相结合的方式实现连续采集。利用 DLL_Open_Device 函数打开设备,利用 DLL_Get_Pixel_Count 函数获取设备的像素数,并依次获取设备温度、校准数据、校准波长,利用波长与温度的拟合方程获取系统监测的温度,如此循环实现信号的连续采集。调用 FBGA 的 DLL 编写的上位机显示程序,前面板程序如图 3 所示。

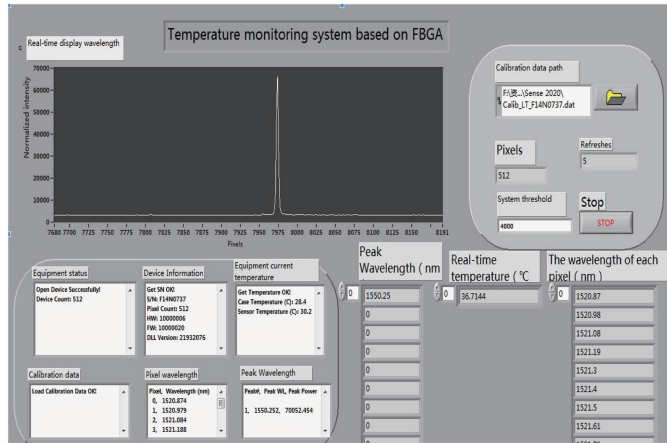


图 3 光纤光栅温度监测系统的前面板程序框图

Fig. 3 Diagram of front panel program of FBG monitoring system

3.2.2 获取峰值波长

通过软件设计,光纤光栅温度监测系统可以直接获取峰值波长,提高了监测系统的精度。FBGA 直接获取像素数据,需要根据 FBGA 用户手册,通过像素与波长的转换公式,将像素数据转换为波长数据,在数据转换过程中产生较大的系统误差,影响系统的精度。

该系统将校准数据嵌入程序中,扫描的同时进行数据校准,可直接在 LabVIEW 中读取 FBGA 的峰值波长,提高了系统的精度,同时也提高了系统的可操作性及便利性。

4 基于 FBGA 解调的测温实验

波长-温度关系的确定是解调系统精确显示温度的关键。确定波长-温度关系的主要的方法为温度-波长的标定。采用所设计的系统进行测温实验,实验中 FBG 的中心波长为 1549.312 nm,栅区长度为 10 mm。

系统标定实验使用低温恒温槽(7008 型,美国 Fluke 公司)。当介质为蒸馏水时,测量精度在 $\pm 0.0007\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,蒸馏水的温度范围为 $0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,实验环境温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验从 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始,温度每升高 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测量一次。为保证温度的准确性,每测一个温度点,待恒温槽稳定一个小时后记录数据,并使用 LabVIEW 程序获取各个点的波长峰值。每个温度点的峰值波长记录 10 次,并对波长数据取平均;温度数据记录 10 次,并对温度数据取平均;两次取平均后的结果作为最后的结果。所有记录的数据精确到小数点后 4 位,以减小系统的误差。将得到的峰值波长数据进行拟合,拟合结果如图 4 所示。

图 4 中温度-峰值波长的拟合关系式为

$$\lambda = 0.0117T + 1550.0023. \quad (6)$$

由(6)式可知,温度每变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,光纤布拉格光栅峰值波长变化约为 11 pm,与理论值相符合,此时监测温度灵敏度约为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

为验证实验系统的可靠性,在温度范围为 $30\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内进行了两次重复实验。重复性实验结果以及对实验数据的拟合结果如图 5 所示。

由图 5 可知,该系统具有良好的重复性,且当置信概率为 95.40% 时,重复性指标 e_R 在 $\pm 0.0210\%$ 以内。

为了验证该系统的温度测量精度,与高精度恒温箱(美国 Fluke 公司)作对比实验,实验结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,该系统的温度与恒温箱温度的误差范围在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,系统测量精度较高。

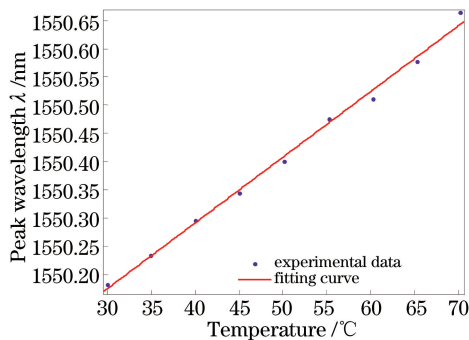


图4 温度和峰值波长的关系

Fig. 4 Relationship between peak wavelength and temperature

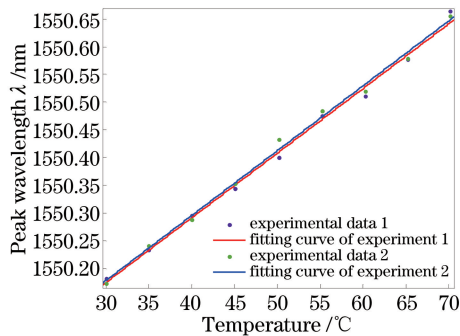


图5 重复性实验中得到的温度和峰值波长的关系

Fig. 5 Relationship between peak wavelength and temperature in the repetitive experiments

表1 实验结果

Table 1 Experimental results

	°C								
Temperature of incubator	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Temperature of the proposed system	30.4489	34.5985	40.3567	45.2983	49.6702	54.7829	60.4526	65.3459	69.6078
Error	0.4489	0.4015	0.3567	0.2983	0.3298	0.2171	0.4526	0.3459	0.3922

5 结 论

搭建了基于FBGA解调的光纤光栅温度监测系统,该系统具有结构简单、响应快速、成本较低的优点。该系统的测量精确度较高,测量误差范围在 ± 0.5 °C以内。完成了系统方案的设计与初步测试,为后期相关产品的研制提供理论与技术指导,对FBG传感的使用和推广具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- Fan Yan'en, Wu Shuai, He Shengnan, *et al.* Research on current sensing technology using fiber Bragg grating demodulated by fiber Michelson interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080602.
樊彦恩, 武 帅, 贺胜男, 等. 基于光纤迈克尔孙干涉仪调谐技术的光纤光栅电流传感技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080602.
- 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.
- Fan Zhuo, Wang Shuang, Liu Tiegeng, *et al.* Research of optical fiber Fabry-Perot acoustic vibration sensing demodulation system based on dual tunable lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(4): 042801.
樊 茁, 王 双, 刘铁根, 等. 基于双可调谐激光器的光纤法布里-珀罗声振动传感解调系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 042801.
- Guo Mingjin, Jiang Desheng, Yuan Hongcai. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(3): 326-330.
郭明金, 姜德生, 袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(3): 326-330.
- Wang Xichang, Pang Qi, Xu Wenjun, *et al.* Stability of demodulation system for fiber Bragg grating based on linear filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2786-2790.
王喜昌, 庞 启, 徐文军, 等. 基于线性滤波器的布拉格光纤光栅解调系统的稳定性[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(11): 2786-2790.
- Wang Pengzhi, Liu Chuntong, Li Hongcai, *et al.* A quasi distributed fiber Bragg grating sensing demodulation system design based on LabVIEW[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 022801.

- 王鹏致, 刘春桐, 李洪才, 等. 一种基于 LabVIEW 的准分布式光纤光栅传感解调系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 022801.
- 7 Wang Guiying, Jin Jie, Lü Chengang. A novel fiber Bragg grating sensors interrogation system based on Labview[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(6): 824-827.
王桂英, 金 杰, 吕辰刚. 基于 Labview 的光纤光栅波长解调系统[J]. 压电与声光, 2012, 34(6): 824-827.
- 8 Zhang Caixia, Zhang Zhenwei, Zheng Wanfu, *et al.* Study of a quasi-distributed optical fiber sensing system based on ultra-weak fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0405004.
张彩霞, 张震伟, 郑万福, 等. 超弱反射光栅准分布式光纤传感系统研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0405004.
- 9 Zhang Liangyue, Shen Xiaoyan, Sun Jie, *et al.* Practical FBG characterization system based on OLCR[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(11): 48-53.
张良岳, 沈小燕, 孙 杰, 等. 用于 FBG 检测的 OLCR 系统实用化技术[J]. 光电工程, 2015, 42(11): 48-53.
- 10 Luo Zhihui, Cai Desuo, Wen Hongqiao, *et al.* A location method for ultra-weak fiber Bragg grating array[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1206006.
罗志会, 蔡德所, 文泓桥, 等. 一种超弱光纤光栅阵列的定位方法[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1206006.
- 11 Quan Wenwen, Kang Juan, Yang Li, *et al.* Young's modulus measurement of metal beam based on fiber Bragg gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 040604.
全文文, 康 娟, 阳 丽, 等. 基于光纤布拉格光栅的金属梁杨氏模量的测量[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 040604.
- 12 Wang Kang, Gu Jinliang, Luo Hong'e. Dynamic calibration for Bragg grating strain measurement system[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(6): 913-917.
王 康, 顾金良, 罗红娥. 布拉格光栅应变测试系统的动态标定[J]. 应用光学, 2015, 36(6): 913-917.
- 13 Liu Bin, Wang Liming, Zhao Xia. Cylinder-shaped dimensions measuring system based on laser displacement sensor[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(5): 40-45.
刘 宾, 王黎明, 赵 霞. 基于激光位移传感器的缸套内部形廓尺寸测量系统[J]. 光电工程, 2014, 41(5): 40-45.
- 14 Xu Fuxin, Zhu Fengyan, Huang Yuxiu, *et al.* Database access of oil droplets electric charge quantity testing system based on LabVIEW[J]. Modern Electronic Technology, 2013, 36(12): 151-154.
徐富新, 朱凤燕, 黄玉秀, 等. 基于 LabVIEW 的油滴电量测试系统的数据库访问[J]. 现代电子技术, 2013, 36(12): 151-154.
- 15 Yang Zhongren, Rao Cheng, Zou Jian, *et al.* Study on DAQ system by using LabVIEW[J]. Journal of Chongqing University, 2004, 27(2): 32-35.
杨忠仁, 饶 程, 邹 建, 等. 基于 LabVIEW 数据采集系统[J]. 重庆大学学报, 2004, 27(2): 32-35.