

文章编号: 1001-3806(2018)06-0849-05

基于 FPGA 的光纤光栅温度传感器高速解调系统

王伟, 张天阳, 陈海滨, 郭子龙

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

摘要: 为了实现对光纤光栅温度传感器的高速解调, 采用了一种基于现场可编程门阵列和小型光谱仪模块的光纤光栅温度传感器高速解调系统, 利用放大自发辐射光源产生的近红外宽带光辐射, 照射光纤光栅温度传感器, 对其反射光通过高斯拟合寻峰算法确定中心波长, 并由中心波长偏移量判定环境温度的解调方法, 进行了理论分析和实验验证。结果表明, 在 30℃ ~ 60℃ 温度范围内, 完成了解调速率达 20kHz、温度灵敏度为 12.49pm/℃ 的高速温度测量, 实现了对光纤光栅温度传感器的高速解调。

关键词: 光纤光学; 高速解调; 高斯拟合; FBG 温度传感器

中图分类号: TP212.1⁺4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.06.023

High-speed demodulation system of fiber Bragg grating temperature sensor based on FPGA

WANG Wei, ZHANG Tianyang, CHEN Hailin, GUO Zilong

(School of Opto-Electronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to realize high-speed demodulation of fiber Bragg grating (FBG) temperature sensors, a high-speed demodulation system of FBG temperature sensor based on field-programmable gate array and small spectrometer module was adopted. Near infrared broadband light radiation from an amplified spontaneous emission light source was used to irradiate the FBG temperature sensor. Center wavelength of the reflective light was determined by Gaussian fitting peak-seeking algorithm. Demodulation method of ambient temperature was determined by center wavelength offset. After theoretical analysis and experimental verification, the results show that high-speed temperature measurement with demodulation velocity of 20kHz and temperature sensitivity of 12.49pm/℃ is completed within the range of 30℃ ~ 60℃. High-speed demodulation of FBG temperature sensors is realized.

Key words: fiber optics; high-speed demodulation; Gaussian fitting; fiber Bragg grating temperature sensor

引言

布喇格光栅光纤 (fiber Bragg grating, FBG) 作为一种均匀光栅光纤, 其内部的折射角度的变化和依据变化所形成的规律周期都沿着光纤轴向固定不变^[1]。光纤布喇格光栅作为传感元件, 具有低损耗、光谱特性好、易于连接、可靠性高的优点^[2], 其传感的信息采用波长编码, 且波长参量不受光源功率起伏以及光路连接或耦合损耗的影响, 抗干扰能力很强。因此光纤光

栅的解调是光纤光栅传感器用的关键技术。

目前的光纤光栅传感器解调方法大部分都是基于波长扫描原理对光纤光栅进行解调, 衡量解调系统的重要指标就是扫描速度和解调精度^[3]。FBG 传感信号的解调方法有很多, 可分为以下几类: 边缘滤波法^[4]、匹配滤波法^[5]、可调谐滤波法^[6]、光栅啁啾解调法^[7]、CCD 测量法^[8]、干涉解调法^[9]。2009 年, WANG 等人采用 2kHz 锯齿波输出控制模块给法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, F-P) 腔提供驱动, 在 50nm 带宽 2kHz 的扫描频率下, 实现了平均寻峰误差小于 0.5pm 的光纤光栅解调^[10]。2013 年, CAI 等人提出了一种基于状态机的自适应半峰检测算法, 采用时间交替技术完成对光谱波形的高速采样^[11]。LI 等人采用半导体光放大器 and 可调谐 F-P 滤波器, 采用 2kHz 的类三角波调制信号, 驱动 F-P 滤波器在 50nm 的光谱范围内进行快速

基金项目: 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室开放基金资助项目 (2015SZSJ603)

作者简介: 王伟 (1973-), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤传感方面的研究。

E-mail: wangwei@xatu.edu.cn

收稿日期: 2017-12-06; 收到修改稿日期: 2018-01-18

扫描^[12],有效减小了FP腔的腔长变化的非线性效应。迄今为止,光纤光栅传感器解调系统存在着光源稳不稳定、解调系统体积庞大、解调速率较慢等亟待解决的问题。

本文中针对上述存在的问题提出了一种高速小型化解调系统的设计。基于小型近红外光谱仪模块和200M高速采样芯片,利用现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)器件作为主控芯片设计了用于光纤光栅温度解调的数字式高速解调系统,具有体积小、结构紧凑、分辨率高的优点,并且显著提高了光纤光栅温度传感器的解调速率。

1 解调原理

根据光纤耦合模理论和 Bragg 反射条件,反射光的中心波长可由下式表示:

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

式中, λ_k 为反射光的中心波长, n_{eff} 为 FBG 的有效折射率, Λ 为 FBG 的写入周期长度。

图 1 为光纤布喇格光栅结构原理图。图中, λ_b 为入射光的波长带宽, $\lambda_b - \lambda_k$ 为透射光的光谱范围。

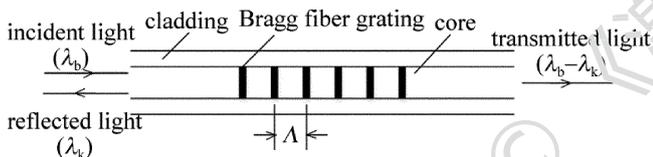


Fig. 1 Schematic diagram of FBG structure

光栅光纤的周期 Λ 和纤芯折射率会随着传感器所处环境温度的改变而改变,可由下式表示:

$$d\lambda_k = \lambda_k(\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

根据 FBG 的热光系数 ξ 和线性热膨胀系数 α ,推导出温度 T 改变时,反射光中心波长的偏移量。普通的掺锗石英光纤的线性热膨胀系数 $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,热光系数 $\xi = 7.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,相对温度灵敏度系数为 $7.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,本文中所采用的单模光纤光栅的中心波长峰值为 1550.938nm,理论计算得到光纤光栅温度传感器的温度灵敏度约 11.71pm/ $^\circ\text{C}$ 。

本文中基于小型近红外光谱仪模块和 200M 高速采样芯片,利用 FPGA 作为主控芯片设计了用于光纤光栅温度解调的数字式高速解调系统,具有小体积、结构紧凑、分辨率高的优点,并且显著提高了光纤光栅温度传感器的解调速率。

1.1 光路设计

本文中所搭建的光路简单,有利于光纤光栅解调系统的小型化。如图 2 所示,光路部分包括放大自辐

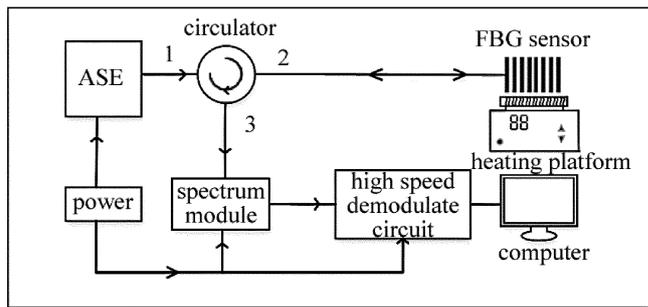


Fig. 2 The integrated block of demodulation system

射(amplified spontaneous emission, ASE)光源、三端口环形器、光谱仪模块、光纤光栅温度传感器。ASE 光源的波长范围为 1536nm ~ 1566nm,ASE 发出的光通过端口 3 光纤环行器的端口 1 进入光纤环行器,光再通过环行器的端口 2 进入 FBG 传感器,FBG 反射的光信号通过光纤环行器的端口 3 和光谱仪模块相连,光谱仪模块的响应波长范围为 1525nm ~ 1570nm,满足对 ASE 光源的发射波长范围探测的需求。光谱仪探测到传感器的反射信号后,将信号发送给采样电路。FPGA 电路驱动控制光谱仪模块和模数转换(analog-digital, AD)采样电路的同时,将采样获得的数据进行处理后送至上位机,在上位机上实时动态显示。

1.2 电路设计

本文中采用的光谱仪模块的解调速度可以达到 20kHz,而且该系统选用了 ADC08200 芯片,最高采样速率可达 200M,可以满足数据采样速率的要求,而 FPGA 芯片具有并行高速处理的特点,因此可以实现较快的数据处理速度,结合上位机显示,能够对光纤光栅传感器进行实时的监测,实现高速解调的效果。图 3 为光谱仪模块的电路设计。

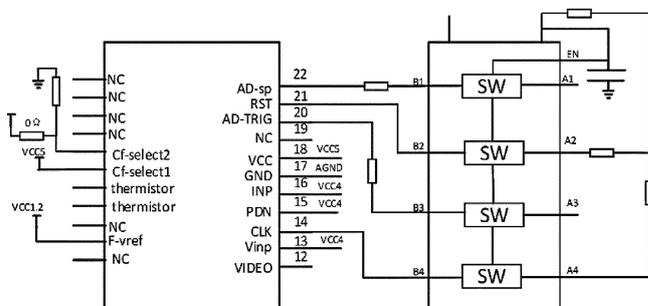


Fig. 3 Circuit of spectrometer module

光谱仪模块选用的是 Ibsen 公司 I-MON 256 系列的 InGaAs 线性像传感器,具有低噪声、低暗电流、易操作性,采用相关的双重采样(correlated double sampling, CDS)电路和无损检测。该光谱模块内部通过线阵扫描输出的方式,通过电流积分的方式,将探测到的

光信号从长波到短波依次输出。其内部是由 256 个线性像素单元,其内部集成有时钟电路,工作过程分为复位阶段、电流积分阶段、电压输出阶段。且设置的电流积分时钟周期数越大,则电流积分的时间周期越长,输出的电压值也就越高,可以使得输出的光谱相对强度值整体增大,同时,I-MON 模块输出信号并不是波的光谱,需要进行区间转换,从而计算出每个波长对应的相对强度,通过寻峰算法,取出最大光强处的中心波长。AD 转换触发信号、AD 转换启动信号 AD-sp、时钟信号和复位信号通过 LSF01088 通道双向多电压电平转换器和 FPGA 控制电路相连,通过控制电路可以实现对光谱仪模块 AD 转换的控制。光谱仪模块的输出信号 VIDEO 和高速采样芯片 ADC08200 相连。可以通过控制光谱仪模块的电流积分时间,改变光谱仪模块的输出信号 VIDEO 值的大小,可以通过修改软件程序实现扫描光谱输出幅值的大小,采样电路如图 4 所示。

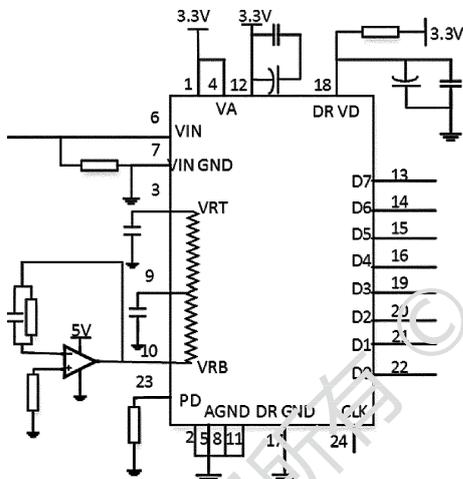


Fig. 4 Sampling circuit

光谱仪模块的输出信号 VIDEO 和采样芯片的 VIN 引脚相连,采样芯片的输出信号 D0 ~ D7 输出到 FPGA 控制电路,然后进行数据处理。该光谱仪模块的时钟可以达到 6MHz,像素单元有 256 个,其中需要额外的积分时间控制输出光谱幅值大小,由此需要 290 个时钟周期,通过计算可知,该光谱仪模块的扫描速率可以达到 20kHz。

解调电路中的光谱仪模块的外形尺寸为 21mm × 50mm × 66mm,电路板的尺寸为 120mm × 99.5mm,此外该解调系统的电源采用的是 6V 的输入电压供电。可以采用两种供电方式:一种是采用线性稳压器,输入 220V 交流电,输出 6V 电路直流电压;还可以采用充电干电池的方式给电路板供电。两种供电方式所占用的解调系统空间都有限,使本文中所设计的光纤光栅

温度传感器解调仪的结构更加紧凑、体积更小、更加便携。

1.3 寻峰算法

寻峰算法是解调系统中的关键也是系统中的一个难点问题。寻峰算法的目的是要对采集得到的大量离散不连续数据寻到峰值点,寻峰算法要满足准确性高、速度快的要求^[13]。FBG 反射光谱含有的白噪声、高斯噪声、相位工频噪声等,会干扰反射光谱峰值对应中心波长值的检测,因此需要有合适的寻峰算法滤除光谱噪声^[14]。噪声幅值应在信号幅值的 0.1 倍以下,否则将产生较大的误差^[15]。

高斯拟合算法先进行高斯多项式变换,采用一般多项式拟合算法得到峰值位置^[16]。光纤光栅的反射光功率密度谱曲线可以用高斯函数近似表示:

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left[-4(\ln 2) \left(\frac{\lambda - \lambda_k}{\Delta\lambda}\right)^2\right] \quad (3)$$

式中, I_0 表示中心波长的光强, λ_k 表示中心波长, $\Delta\lambda$ 表示光谱波长范围, $I(\lambda)$ 表示波长为 λ 时的光强,对上式两端进行对数变换,令: $y = \ln I$, $A = -4\ln 2 / (\Delta\lambda)^2$, $B = 8\ln 2 \times \lambda_k / (\Delta\lambda)^2$, $C = \ln I_0 - 4\ln 2 \times \lambda_k / (\Delta\lambda)^2$, 则(3)式可以改写为:

$$y = A \times \lambda^2 + B \times \lambda + C \quad (4)$$

可以推算出 FBG 的反射谱对应的中心波长为:

$$\lambda = -\frac{B}{2A} \quad (5)$$

本文中采用高斯多项式拟合寻峰算法对 FBG 温度传感器的中心波长进行了解算。为了验证拟合效果,对实验数据进行了高斯拟合,和高分辨率的光谱仪测量结果进行了对比,图 5 为拟合曲线和实验数据曲线图。横坐标为波长,纵坐标为功率谱密度 (power spectral density, PSD)。

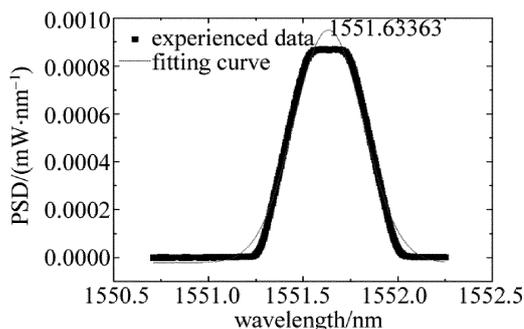


Fig. 5 Fitting curve of the experienced data

然后将其和高分辨率的光谱仪测量数据进行对比,验证算法的拟合效果,光谱仪采集的一组功率谱密度图如图 6 所示。

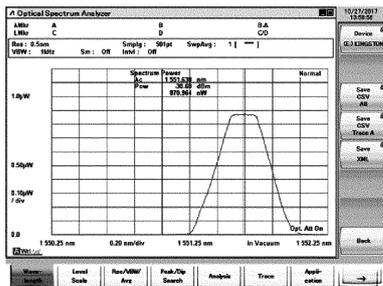


Fig. 6 Power spectral density measured by a spectrometer

2 实验与分析

对中心波长为 1550.938nm 的 FBG 温度传感器进行了实验,其参量如表 1 所示。

Table 1 Parameters of fiber rating sensor

parameter	value
wavelength center	1550.938nm
reflectivity	92.06%
side mode suppression ratio	22dB
coating	acrylate
fiber type	SMF-28 or polyimide fiber
pigtail length	1m

实验环境为室温,测量范围为 30℃ ~ 60℃,以 1℃ 为测量间隔,记录对应的中心波长值,测量的时候,须等到温度恒定后,再将其数值记录下来,然后做 10 次重复性实验,取其均值作为最终的实验结果,最后对测量数据进行线性拟合,确定温度和中心波长的线性关系。

对图 7 中温度和峰值波长散点的实验数据进行了线性拟合,拟合后的线性方程为:

$$\lambda_c = 1551.02473 + 0.01249T_c \quad (6)$$

式中, λ_c 为反射光的峰值波长, T_c 为测量环境的温度,通过(6)式可以得出:温度每上升 1℃,高斯多项式拟合法测得的峰值波长偏移量为 12.49pm。

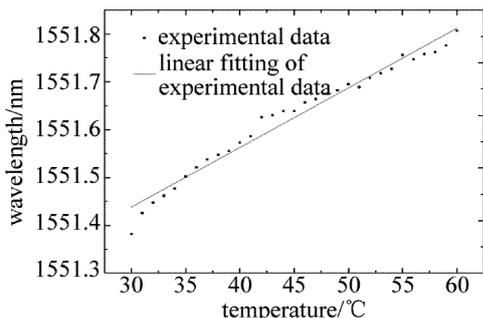


Fig. 7 Relationship between temperature and peak wavelength

通过将实验数据和理论值进行比较,实验结果和理论结果存在差异。计算是在理想条件下进行的,而

实验的时候,测试环境以及光纤材料的折射率等因素都属于不确定因素,会造成理论值和实验数据的差异。而且在测量过程中为了减小这种误差做了多次测量,但是通过多次提高测量的精确度,只能无限逼近准确度,因此这种误差是被允许的。

3 结 论

本文中以高分辨率数字式光谱仪为核心器件,通过 FPGA 控制电路和高速采样电路,在 30℃ ~ 60℃ 的温度范围内,实现了解调速度高达 20kHz、灵敏度为 12.49pm/℃ 的光纤光栅温度传感器解调仪设计。相比于传统的光谱仪解调方式具有解调速度快、体积小而紧凑、便携等特点。相比于其它匹配法等解调方式具有装置简易、系统稳定等优点。本文中所提出的高速的 FBG 光纤光栅,目前的测量温度范围有限,通过进一步的研究,可以将其应用到温度动态变化范围大的领域,比如航空发动机的监测,其高温工作环境和温度的高速变化对传感监测技术产生了挑战,也是未来发展 FBG 传感技术的发展方向之一。

参 考 文 献

- [1] GUO X T. Fiber grating sensing demodulation system design and algorithm [D]. Taiyuan: North University, 2017: 5-6 (in Chinese).
- [2] LIN X L. Fiber-optic vortex flow measurement technology research [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2011: 24-42 (in Chinese).
- [3] REN Y. Design of fiber grating sensor demodulation system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015: 12-17 (in Chinese).
- [4] GONG X, HUA D X, LI Sh Ch, et al. Edge filter demodulation and calibration of time division multiplexed fiber grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1010006 (in Chinese).
- [5] ZHANG D Sh, GUO D, LUO P, et al. Fluorescence sensor based on matched filter demodulation for fiber grating [J]. Acta Mechanica Sinica, 2007, 20(2): 311-313 (in Chinese).
- [6] ZU Y P. FBG demodulation based on tunable F-P filter theory [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2013: 21-33 (in Chinese).
- [7] LIN X. Research on wavelength demodulator based on chirped fiber grating [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017: 25-40 (in Chinese).
- [8] LI X Sh. CCD spectral imaging technology in fiber grating demodulation technology [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2007: 15-39 (in Chinese).
- [9] WU J, WU H P, HUANG J B, et al. Progress in fiber grating sensing signal demodulation [J]. Chinese Optics, 2014, 7(4): 519-531 (in Chinese).
- [10] WANG H. Design of high-speed fiber grating sensing demodulator [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009: 1-5 (in Chinese).
- [11] CAI L J. Design and implementation of high speed fiber bragg grating sensor demodulation system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013: 27-37 (in Chinese).

- [12] LI Zh Y, ZHOU Z D, TONG X L, *et al.* Research on high speed and high capacity FBG demodulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32 (3): 0306007 (in Chinese).
- [13] WANG Y, ZHAO K, LIU J P. Optical fiber Bragg grating temperature monitoring based on volume phase grating dispersion demodulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101202 (in Chinese).
- [14] HU Zh W, PANG Ch X, CHENG F Y. Application of Gaussian-LM algorithm in fiber Bragg grating reflection spectrum peak search [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54 (1): 013001 (in Chinese).
- [15] ZHANG T D, HE F T, ZHOU Q, *et al.* Optimal search algorithm of fiber grating demodulation system [J]. *Laser Technology*, 2013, 37 (1): 36-39 (in Chinese).
- [16] CAI N H, YAN L Sh, CHEN J Z, *et al.* Optimization of fiber grating sensing demodulation system based on tunable F-P filters Law comparative analysis [J]. *Instrumentation Technology and Sensor*, 2013 (4): 100-102 (in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©