

基于 FPGA 的 FBG 温度传感器解调系统设计

郎月 佟首峰

(长春理工大学 空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要 提出一种针对光纤布拉格光栅(FBG)温度传感器的解调系统设计。基于直接数字合成器(DDS)原理,利用现场可编程门阵列(FPGA)构成可调法布里-珀罗(F-P)滤波器的驱动电压,电压峰峰值可达 10 V。提出利用 FPGA 控制多个模/数(A/D)转换器来流水线式读取数据构成采集模块,实现四通道检测。为增加解调的实时性,实现实时校准功能,摒弃常用的参考光纤,引入梳状滤波器。对 FBG 进行定标,并在 30 ℃~100 ℃间对所设计的解调系统进行检测,利用电子温度计与光谱仪同时检测,比较两组数据来对设计的解调系统进行性能评估。平均温度误差为 0.19129 ℃,最小温度差值为 0.045 ℃,分辨率 1 pm。

关键词 光纤光学;解调系统;现场可编程门阵列;法布里-珀罗滤波器

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.090601

Design of Demodulation System of Fiber Bragg Grating Temperature Sensor Based on FPGA

Lang Yue Tong Shoufeng

(Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract A design scheme of demodulation system based on field programmable gate array (FPGA) for fiber Bragg grating(FBG) temperature sensor is proposed. Using the principle of (direct digital synthesizer (DDS), the drive voltage of Fabry-Perot (F-P) filter is constituted by FPGA. It can achieve 10 V. Many analog-to-digital (A/D) converters are controlled by FPGA to make up the successive data acquisition module. It can get the result in real time. The comb-shaped filter is used to correct the system in time. The index of a FBG sensor is calibrated confirmed. The system is used for denodulation between 30 ℃ and 100 ℃, and electronic thermometer and spectrograph are used to get the accurate result. The different records can be compared to assess the performance of system. The mean error of temperature is 0.19129 ℃, and the minimum temperature is 0.045 ℃, with the resolution being 1 pm.

Key words fiber optics; demodulation system; field programmable gate array; Frbry-Perot filter

OCIS codes 060.2370; 120.2230; 120.2440

1 引言

随着光纤光栅传感器的广泛应用,信号解调技术也成为研究的重点。光纤布拉格光栅(FBG)作为当前光纤无源器件的代表,在传感测量方面占有极其重要的地位^[1]。FBG 传感器是将被测信息转化为其响应波长的微小移动,如何解调,是其应用的关键^[2]。由于 FBG 传感器是以光信号为信息的传输载体,因此要借助电子处理手段构成硬件解调仪器^[3]。目前多数的解调系统结构复杂、成本高、易受外界环境干扰、动态范围小和解调速度慢^[4]。本文利用可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器,提出了一种通过现场可编程门阵列(FPGA)的核心控制,来对 FBG 温度传感器进行实时解调的系统设计。此系统便于搭建,成本低,体积小,

收稿日期: 2013-04-22; 收到修改稿日期: 2013-04-28; 网络出版日期: 2013-08-05

作者简介: 郎月(1987—),女,硕士研究生,主要从事 FPGA 在光学系统中的应用方面的研究。

E-mail: langyuegogo@163.com

导师简介: 佟首峰(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事激光通信和跟踪控制等方面的研究。

E-mail: tsf1998@sina.com

精度高,移植方便。目前国内常用的四通道高速光纤光栅解调器是BGD-4M40,其扫描速率为50~200 Hz,解调范围为40 nm,而分辨率为1 pm,平均温度误差为0.24 °C。与其相比,本文所设计的解调系统在同分辨率下,动态测量范围有所提高且平均误差更小。

2 解调系统的设计与搭建

解调系统主要由以下部分构成:宽带光源、3 dB耦合器、FBG、可调谐F-P滤波器、光电探测器、信号处理电路以及由FPGA构成的驱动和信号采集电路。该解调系统的组成框图如图1所示。

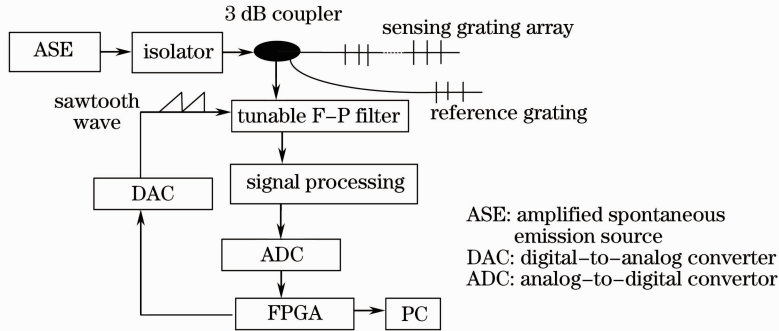


图1 基于可调谐F-P滤波器的光纤光栅解调系统

Fig. 1 Demodulation system of FBG temperature sensor based on tunable F-P filter

信号处理电路由前置放大电路、光电探测、二级放大电路、低通滤波电路构成。前置放大电路的作用是抑制噪声,引入去耦电容去除噪声。本文采用CA3140高输入阻抗放大器。光电探测器选用PIN光电二极管。由于从FBG反射回的光信号经过光电探测器后输出电流信号小且受噪声影响,对其进行二次放大,选用OPO7构成。系统采用专用滤波器芯片LT1568实现滤波电路。

解调系统硬件电路框图如图2所示,FPGA的主要作用是产生可调F-P滤波器的驱动电压及控制数据采集模块。具体模块将在下文分别介绍。

驱动电压模块利用FPGA产生F-P腔驱动电压值的相应数字,数/模(D/A)转换器将其转换为周期三角波电压模拟信号并驱动压电陶瓷PZT来调整F-P腔长。

直接数字合成器(DDS),工作原理如图3所示,相位累加器由加法器与累加寄存器级联构成^[5]。

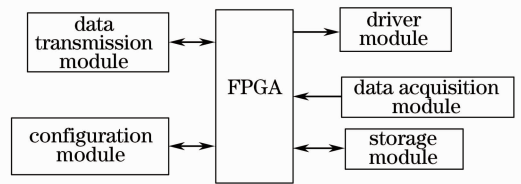


图2 解调系统硬件电路框图

Fig. 2 Circuit chart of demodulation system

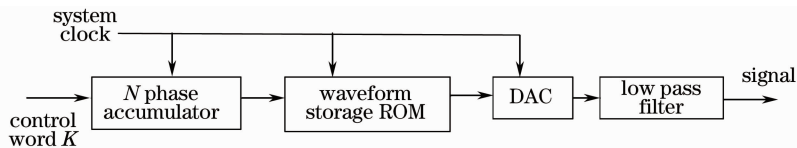


图3 DDS基本工作原理

Fig. 3 DDS principle

用Signal Tap II嵌入式逻辑分析仪对引脚信号进行实时观测。得到的信号波形如图4所示;时序仿真结果如图5所示。



图4 引脚输出信号

Fig. 4 Output signal of pins

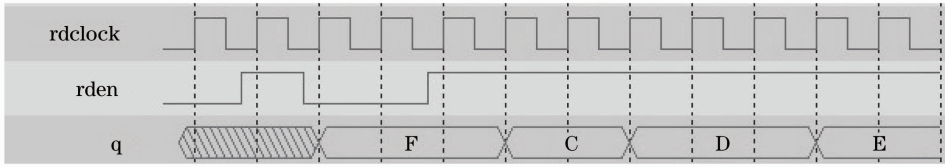


图 5 时序仿真结果

Fig. 5 Timing simulation result

数字信号经 D/A 转换,经示波器测试,三角波的电压峰峰值可以达到 10 V。

数据采集模块不断提取信号处理电路的输出信号,将其转换为数字信号,传送至 FPGA,与前一次读取值比较,至发现最大值,此时 F-P 腔的透射波长与 FBG 的反射中心波长重合,记录此时 F-P 腔驱动电压,待对 FBG 定标后,根据输出电压与波长漂移的拟合曲线,进行数据处理,实现信号解调。

本系统采用的核心芯片是 Xilinx Spartan XC3S250E,由 FPGA 驱动多个模/数(A/D)转换器对数据进行轮流采集,利用时序分配和以及握手信号将多个数据通路速率进行同步,以确保采样速率及系统稳定性。数据采集系统的结构如图 6 所示,其中采用 4 通道同步 A/D 转换芯片 AD7865。



图 6 数据采集系统总结构

Fig. 6 Data acquisition system structure chart

选用网络数据传输接口来实现数据的传输任务。采用 RTL8019AS 来实现网络传输接口^[6-7],选用跳线方式。以 FPGA 驱动网络控制器搭建多通道同步高速数据采集模块,使系统的数据采集和解调控制参考可以有机结合。

系统实时校准采用梳状滤波器,依据采集的参考信息及解调的状态对系统自动控制及解调算法进行校准和补偿,并以此信号作为依据,对数据采集与解调控制给出标志位。数据采集模块根据标志位对采集的数据进行保存,当扫描上升沿时对数据进行读取,当扫描下降沿时进行峰值判别与动态补偿等数据处理。

3 解调实验

定标实验如图 7 所示,采用的光纤光栅反射光中心波长为 1541 nm,电压变化往返测量 4 次。其中采用 HPV 系列压电陶瓷(PZT)驱动电源,AQ6370B 型光谱仪。测量数据如图 8 所示,其中四条曲线为实验数据的拟合曲线。

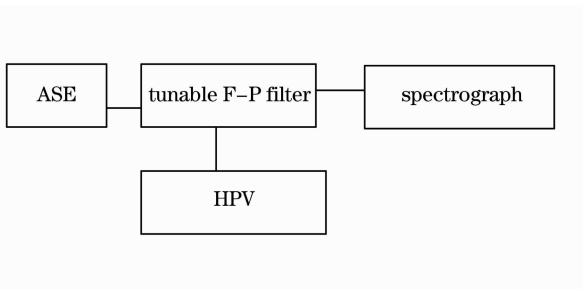


图 7 解调系统硬件电路框图

Fig. 7 Schematic of the experiment for calibrating the index of FBG

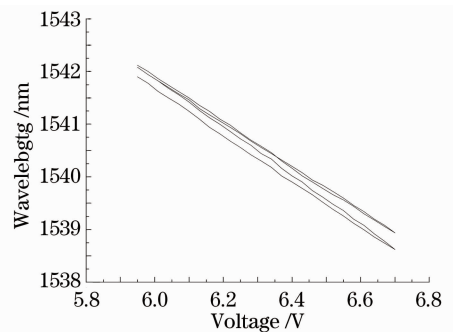


图 8 实验数据示意图

Fig. 8 Experiment data

图 8 中的拟合曲线并不重合主要由 PZT 电压控制的滞后和蠕变对 F-P 腔透射波长的影响所致。这是压电陶瓷固有特性,且正反曲线之间没有对称性^[8]。

在利用自制解调系统解调的同时利用光谱仪测量波长,采用精度为 0.01 °C 的电子温度计测量传感器所处的环境温度。将两数值与解调系统的测量结果对比,从而评估自制解调系统的检测性能。由电子温度计

及光谱仪测得的结果如图 9 所示。解调系统所测结果如图 10 所示。

图中 T_1 为由电子温度计测得的温度值, W_1 为光谱仪测得相应波长, T_2 与 W_2 分别是由解调系统得到的温度和波长, 直线为数据点的拟合结果。

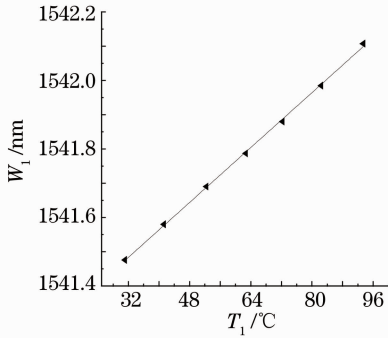


图 9 实际波长与温度值

Fig. 9 Value of wavelength and temperature

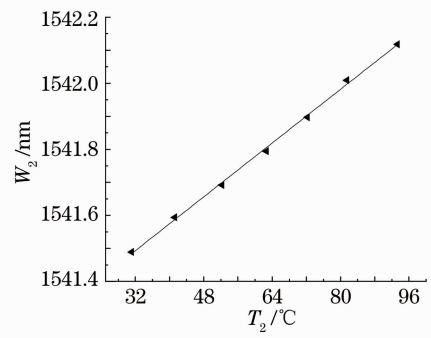


图 10 解调系统测得波长与温度值

Fig. 10 Experiment data of wavelength and temperature

实际温度值与测量值的分析如表 1 所示, 其中 D_T 表示两组数据的温度差。各温度点测量温度的相对误差如表 2 所示。

表 1 温度数据差统计图 (单位: °C)

Table 1 Statistics of temperature error (unit: °C)

	N total	Mean	Standard deviation	Sum	Minimum	Median	maximum
D_T	7	0.19129	0.3224	1.339	-0.045	0.083	0.91

表 2 测量温度的相对误差

Table 2 Error of temperature measurement

Real temperature	31.1	41.3	52	62.7	72.3	82.4	93.4
Error	0.14	0.29	0.3	0.09	0.09	1.1	0.08

4 结 论

由实验结果可以看出, 本文所设计的基于 FPGA 的 FBG 温度传感器解调系统可以对温度进行实时检测。在 30 °C ~ 95 °C 测量实验中, 平均温度误差为 0.19129 °C, 分辨率达 1 pm, 测量精度达 0.01 nm, 动态测量范围达 50 nm, 扫描速率为 400 Hz, 能够实现 4 路信号实时采样、处理。所设计的解调系统可以实现温度的快速检测, 误差小, 操作简单。与 BGD-4M40 相比, 在同分辨率下, 动态测量范围提高 10 nm, 平均误差更小, 并且可以根据需要来增加采集路数。

参 考 文 献

- Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen, *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency looking of a FBG F-P cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0406006.
张乐, 吴波, 叶雯, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0406006.
- Bao Jilong, Zhao Hongxia, Cheng Peihong, *et al.*. Research on optical-spectral characteristics of two-section and multi-layer long-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0106001.
鲍吉龙, 赵洪霞, 程培红, 等. 一种双段多层长周期光纤光栅光谱特性研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0106001.
- Kumazaki H, Yamada H, Nakamura H. Tunable wavelength filter using a Bragg grating fiber thinned by plasma etching [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2011, 13(11): 1206-1208.
- Wang Qingwei, Liu Yueming, Tian Weijian, *et al.*. Review and progress on sensing signal interrogation techniques of long period fiber grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080004.
王清伟, 刘月明, 田维坚, 等. 长周期光纤光栅传感信号解调技术研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 080004.
- Zhang Zhiqiang, Zhang Jinbo. The design of harmonic signal generator based on DDS/SOPC [J]. *Automation & Instrumentation*, 2008, 28(8): 18-21.

- 张志强, 张金波. 基于 DDS/SOPC 的谐波信号发生器的设计[J]. 自动化与仪器, 2008, 28(8): 18-21.
- 6 Lu Luoxian, Ren Lizhi. Design and application of the network interface based on FPGA[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2008, 45(12): 56-58.
- 卢珞先, 任立志. 基于 FPGA 的网络接口设计与应用[J]. 电测与仪表, 2008, 45(12): 56-58.
- 7 Chen Chuanhu. The design of converter between serial and ethernet interface based on RTL8019AS [J]. Electronic Engineer, 2008, 34(3): 51-53.
- 陈传虎. 基于 RTL8019AS 的串口与以太网接口转换器的设计[J]. 电子工程师, 2008, 34(3): 51-53.
- 8 Lin Sen. Study the Output Characteristic of Piezoelectric Ceramics Micro-Displacement Driver[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. 20-22.
- 李 森. 压电陶瓷微位移驱动器输出特性的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007. 20-22.