

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0120-04

# 基于 Nios II 的光纤光栅传感系统解调技术的研究

柏俊杰<sup>1</sup> 吴 英<sup>1</sup> 陈念军<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 重庆科技学院电子信息工程学院, 重庆 401331; <sup>2</sup> 南京奥能科技有限公司, 江苏 南京 210006)

**摘要** 基于 Altera 公司的 32 位嵌入式软核处理器 Nios II, 设计了一种四通道分布式光纤光栅传感网络的并行波长解调系统, 对解调系统的光路和硬件电路进行设计。解调系统的硬件电路以现场可编程门阵列(FPGA)为核心, 对整形为矩形脉冲的光电转换信号电压进行采集和信号处理, 可与上位机实现通用异步收发传输器(UART)和通用串行总线(USB)通信, 在上位机上实现光纤光栅波长解调的动态显示和光栅中心波长标定, 可高速、高精度并行解调上百个外界被测信号。与目前具有同样功能的其他波长解调系统相比, 具有灵活、稳定、易维护、高速、高精度等优点, 可被应用到大型多点安全监测工程。给出具体的波长解调和标定的实例, 精度可达到  $\pm 2 \text{ pm}$ 。

**关键词** 光纤光学; 波长解调; Nios II; 光纤布拉格光栅

**中图分类号** TN253; TP212.14

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL200835s2.0120

## Research on the Demodulation Techniques for the Sensing System of Fiber Grating Based on the Nios II

Bai Junjie<sup>1</sup> Wu Ying<sup>1</sup> Chen Nianjun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic and Information Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China  
<sup>2</sup> Nanjing AUN Technology Limited Company, Nanjing, Jiangsu 210006, China

**Abstract** Based on Altera's 32 bit embedded soft-core processor Nios II, the parallel wavelength demodulation system of a four-channel distributed fiber Bragg grating sensor network was designed. The optical system and hardware circuit for demodulation system were designed specifically. Field-programmable gate array(FPGA) is the core of the hardware circuit, which can collect and process the photoelectric signal voltage transformed to rectangular voltage pulse. The hardware circuit can communicate the signal to the computer through the universal asynchronous receiver transmitter(UART) and universal serial bus(USB). The computer can display a dynamic fiber grating wavelength demodulation process and calibrate the Bragg grating center wavelength. The system can demodulate accurately hundreds of outside signals at one time. Compared with other wavelength demodulators with the same functions, it has many advantages, such as flexibility, stabilization, easy maintenance, high-speed, high-precision, and so on. The wavelength demodulation system can be used extensively in large-scale multipoint monitor engineering. At last, an example of wavelength demodulation and calibration is given and precision can reach to  $\pm 2 \text{ pm}$ .

**Key words** fiber optics; wavelength demodulation; nios II; fiber Bragg grating

### 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)具有体积小、重量轻、可集成、抗干扰, 并且能够实现传感信息波长编码等特点, 它的性能优于光强编码或相位编码的光纤传感器<sup>[1, 2]</sup>。因为多个光栅可以都写入到一根光纤上, 并利用多路复用技术来编址, 所以 FBG 传感器具备了分布式传感测量的能力, 一个多通道分布式

的传感网络可有数百个 FBG 传感器。但是, 如何将传感网络中的数百个 FBG 传感器皮米级的谐振波长位移  $\Delta\lambda$  实时的、高精度的解调出来, 是 FBG 传感技术走向实用化所面临的关键技术<sup>[3~5]</sup>。为实现光纤传感技术的实用化与产业化, 已经设计出基于单片机、数字信号处理器(DSP)和自动化程序管理(ARM)等处理器的波长解调器<sup>[6~8]</sup>。本文基于

Altera 公司的 32 位嵌入式软核处理器 Nios II 实现多通道分布式波长解调。

## 2 FBG 传感原理

FBG 最大的特性是能起到反射镜的作用，但必须满足反射条件——布拉格条件

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

其中  $\lambda_B$  为 FBG 反射光的中心波长， $n_{\text{eff}}$  为光纤芯区中有效折射率， $\Lambda$  为光栅周期。当  $\Lambda$  和  $n_{\text{eff}}$  受外界环境的影响(温度、应力、压力)而发生变化  $\Delta n_{\text{eff}}$  和  $\Delta\Lambda$  时，导致符合布拉格条件的波长发生移位  $\Delta\lambda_B$ ，由布拉格条件可得

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda. \quad (2)$$

由弹性力学可知,FBG 中心波长  $\lambda_B$  随温度和轴向应变的变化可表示为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \left\{ \left[ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \right] \times \epsilon_a + (\alpha_s + \xi_s)\Delta T \right\} \quad (3)$$

其中  $\epsilon_a$  为轴向应变， $P_{11}$  和  $P_{12}$  为光纤材料的光弹性系数， $\mu$  为光纤材料的泊松比， $\alpha_s$  和  $\xi_s$  分别为光纤材料的热膨胀系数和热光参数， $\Delta T$  为温度变化量。对于锗硅光纤，把材料的各特性参数代入(3)式可得

$$\Delta\lambda_B = 0.78\lambda_B\epsilon_a + 6.67 \times 10^{-6}\lambda_B\Delta T, \quad (4)$$

由(4)式可知，若仅考虑温度或应力的变化，FBG 传感器反射的中心波长与温度或应变都有良好的线性关系，所以，只要检测出 FBG 反射波长的变化  $\Delta\lambda_B$  就可以检测出外界的温度、应力、压力等被测信号。

## 3 基于 Nios II 实现四通道 FBG 传感系统波长解调

### 3.1 四通道分布式 FBG 传感系统并行解调方案

如何高精度地实现 FBG 波长编码的解调，即检测出 FBG 传感器皮米级波长谐振位移，主要涉及两个方面：一是因为光纤光栅的布拉格波长谱宽约小于 0.3 nm，要提高测量布拉格波长移动量的精度，就必须精确测量布拉格波长峰值点的移动量，因此找准布拉格波长峰值点并跟踪峰值点的移动量是研究光纤光栅传感器要解决的第一个问题；二是要把测量到的布拉格波长峰值点的移动量转换为便于显示的电信号<sup>[9]</sup>。

该方案的光通道利用法布里-珀罗(F-P)滤波器来实现四通道分布式 FBG 传感系统并行解调，能

实时同步监测上百个外界被测信号，解调方案如图 1 所示。让超发光二极管(SLED)发出的宽带光通过 F-P 滤波器，其在三角波扫描电压的作用下，不同的扫描电压对应不同中心波长的窄带光通过 F-P 滤波器，它的透射光再对各通道的传感光栅同步扫描。当 F-P 滤波器透射峰的中心波长与传感光栅反射峰的中心波长相等时，各 PIN 管的光电转换电压最大。在扫描电压的每个周期内，通过各 PIN 管的电压信号为不同传感光栅反射峰所对应的电压尖峰脉冲序列。这 4 个通道对应的电压尖峰脉冲序列再分别经过放大、滤波和整形(整形为矩形脉冲)等模块后传输到基于 Nios II 处理器的信号采集与处理系统，最后在上位机上实现光纤光栅波长解调的动态显示和光栅中心波长标定。

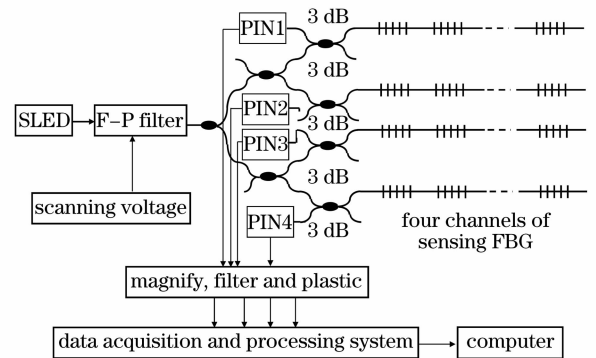


图 1 四通道分布式 FBG 传感系统并行解调方案  
Fig. 1 Parallel demodulation scheme for four channels of the distributed FBG sensing system

由于光源 SLED 的谱宽一般为 40~50 nm，传感 FBG 的谱宽通常为 0.07~0.6 nm，检测外界信号时，FBG 中心波长要漂移 1~2 nm，所以为了使不同 FBG 的反射光的谱峰不相互重叠，每个通道内只能接约 30 个以内的 FBG 传感器。一个大型工程往往需要同时监测上百个不同位置的信号，这就需要开发出多通道分布式光纤光栅传感系统，并实现并行实时解调。该方案能对四通道分布式 FBG 光栅传感系统并行、实时、高精度(皮米级)波长解调，并且性能稳定，可被应用到大型工程。

### 3.2 基于 Nios II 的数据采集与处理模块

Nios II 是 Altera 公司在 2004 年 6 月推出的 32 位嵌入式软核处理器，用户可以根据自己的要求定制处理器，按照需要选择合适的外设存储器和接口，还可以轻松集成自己专有的功能(如数字信号处理器 DSP 和用户逻辑)，创建一款“完美”的处理器，使用户具有独特的竞争优势。

图 1 所示方案中的数据采集与处理模块是 FBG 解调系统的核心功能模块, 该模块是基于嵌入式软核处理器 Nios II 的可编程片上系统(SOPC)实现的。使用集成在 Quartus II 中的 SOPC Builder 工具来配置生成 SOPC 系统, SOPC Builder 自动产生一些必需的仲裁逻辑来协调系统中各个部件的工

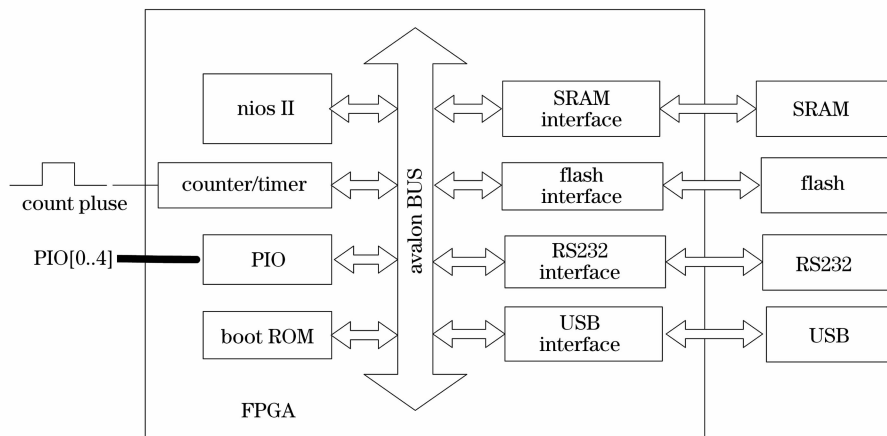


图 2 数据采集和处理系统硬件框图

Fig. 2 Hardware scheme for data acquisition and processing system

数据采集与处理的方法是把尖峰电压信号整形为矩形脉冲信号, 再用基于 Nios II 的信号采集与处理系统采集并处理数据, 找出每个矩形脉冲的中心位置在一个电压扫描周期内出现的相对位置(即计数脉冲数), 这些相对位置与信号矩形脉冲所对应的光脉冲信号的波长(即 FBG 的反射中心波长)一一对应, 有较好的线性关系<sup>[10]</sup>, 利用这一对应关系来标定传感光栅的实时波长, 解调出被测信号。

找出每个矩形脉冲的中心位置在一个扫描电压周期内的相对位置, 可通过一些方法来实现: 设计一个电路用来产生稳定的计数脉冲, 接入计数器; 与四通道测量光栅对应的被整形为矩形脉冲电压的光电转换信号, 接入 PIO[1..4]; 图 1 中的三角波扫描电压通过电路转换成等宽的脉冲信号输入到图 2 中的 PIO[0], 使用外部中断功能。当中断产生时, 计数器开始计数, PIO[1..4]采用 I/O 口查询方式, 通过判断高低电平来判定脉冲的上下沿; PIO

作, 系统的工作频率设为 33 MHz, 系统硬件设计框图如图 2 所示。图 2 中的 PIO 为并行输入/输出内核, 配置 PIO<sub>0</sub> 为电平触发方式的外部中断, 只要高电平出现时并且中断使能, 就申请一个中断; PIO[1..4]配置为标准并行的输入/输出口。

[1..4]接口的脉冲上下沿到来时存储计数器的值, 这样就得到了测量光栅的相对位置值; 三角形扫描电压到最高点时计数器清零, 把采集到的脉冲相对位置装入静态随机存储器(SRAM), 等待下一次计数; 若矩形脉冲下降沿和上升沿对应的计数器的值分别为  $N_1$  和  $N_2$ , 那么该矩形脉冲的中心位置对应的脉冲数为  $N = (N_1 + N_2)/2$ 。中心位置对应的脉冲数通过 RS232 或者 USB 口传输到上位机进行光纤光栅波长解调的动态显示和光栅中心波长标定。

#### 4 应用波长解调器进行波长标定的实例

基于 Nios II 的四通道分布式 FBG 传感系统并行解调方案, 研发出四通道的波长解调器, 利用该解调器进行波长标定实验, 标定实验系统结构如图 3 所示。

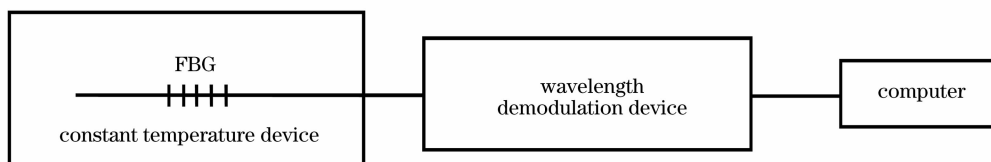


图 3 标定实验系统结构图

Fig. 3 Structural diagram of experimental system for calibration

1) 确定作为标定标准的数据对

把解调器的一个外置通道接上标准光栅，放在恒温装置内，这些标准光栅在该温度下的波长已知，解调器测得该通道和内置通道光栅的相对位置

通过串口传给计算机。由于一些不稳定的因素，通过多次测量后计算每个相对位置的平均值，并把这些平均值和对应的已知波长构成的数据对作为标定未知光栅中心反射波长的标准，数据如表 1 所示。

表 1 作为标定标准的数据对

Table 1 Standard data for calibration

Known wavelength /nm	1306.482	1305.345	1304.209	1303.076	1301.944	1300.814	1299.687
Average relative Position	14440	17258	20068	22961	26038	29373	33022

2) 把解调器的外置通道接 3 个待测光栅，为检验解调器的精度，放在恒温装置内，用高精度光谱仪测量这 3 个待测光栅的波长，分别为 1306.655 nm, 1304.022 nm 和 1300.766 nm。解调器测得被测光栅的实时位置分别为 14000, 20537 和 29494。

3) 插值计算待测光栅的波长

利用表 1 中作为标定标准的数据对来插值计算未知波长，多次实验验证该解调仪的测量精度达到 ±2 pm 以内。光谱仪测量的波长、三次样条插值计算的波长和绝对误差如表 2 所示。

表 2 未知波长标定实验结果

Table 2 Experimental result of unknown wavelength calibration

Determination of wavelength spectrometer/nm	Cubic spline interpolation wavelength/nm	Absolute error/pm
1306.655	1306.6563	1.3
1304.022	1304.0218	0.2
1300.766	1300.7642	1.8

5 结 论

FBG 是近年来光纤传感领域的研究热点，波长编码信号解调是实现光纤光栅分布式传感网络的关键。实验表明，基于 Nios II 的四通道分布式 FBG 传感并行解调系统具有灵活、稳定、易维护、高速、高精度等优点，可被广泛地应用于大型桥梁安全检测、电力系统温度测量及火灾报警等领域。该解调方案有助于加速光纤传感技术的实用化与产业化，但还有待于进一步提高其解调精度和速度以达到更好的波长解调效果。

刘丽辉, 赵启大, 张 昊. 光纤光栅传感器的解调技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(7): 35~39

5 Wang Min, Qiao Guangxue, Jia Zhenan. Research on demodulating techniques for fiber Bragg grating sensor system [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2004, 41(12): 54~58  
 王 敏, 乔光学, 贾振安. 光纤布喇格光栅传感系统信号解调技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(12): 54~58  
 6 Zuang Qiren, Gong Dongmei, Wang Jing. A high precise sensing demodulation technology based on fiber-grating sensors and single-chip microcomputer [J]. *Journal of Huaqiao University(Natural Science)*, 2004, 25(3): 254~257  
 庄其仁, 龚冬梅, 王 静. 单片机的高精度 FBG 传感解调技术[J]. 华侨大学学报: (自然科学版), 2004, 25(3): 254~257  
 7 Zhao Liming, Wang Xing, Diao Chunnuan. FBG sensor demodulation system based on F-P fiber interferometer filter[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008, 2: 76~79  
 赵立明, 王 鑫, 刁春暖. 基于 F-P 滤波器 FBG 传感的解调系统[J]. 仪表技术与传感器, 2008, 2: 76~79  
 8 Xiong Haoyu, Gao Xueqin. Design and implementation of FBG sensor signal processing and collection system [J]. *Electric Technology(Shanghai)*, 2005, 32(2): 37~40  
 熊浩宇, 高雪清. FBG 传感信号处理及采集系统的设计与实现[J]. 电子技术(上海), 2005, 32(2): 37~40  
 9 Jia Zhenan, Zhang Lei, Qiao Guangxue et al.. Experimental study of signal demodulation key hardware electric circuit for fiber grating [J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2008, 19(3): 315~317  
 贾振安, 张 磊, 乔光学等. 光纤光栅传感信号解调关键硬件电路的实验研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(3): 315~317  
 10 Bai Junjie, Wang Lixin, Ran Changyan et al.. Demodulating and calibrating for fiber Bragg grating based on Fabry-Perot filter[J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2006, 25(3): 10~11  
 柏俊杰, 王立新, 冉昌艳等. 基于 F-P 滤波器的光纤光栅解调和标定[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(3): 10~11

参 考 文 献

1 Li Chan, Zhang Yimo, Zhao Yonggui et al.. Principle, Sensing Technology and Application of Fiber Bragg Grating[M]. Beijing: Science Press, 2005. 1~8  
 李 川, 张以谟, 赵永贵等. 光纤光栅: 原理、技术与传感应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 1~8  
 2 Liao Yanbiao. Fiber Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 197~212  
 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 197~212  
 3 Lin Junyou, Wang Wenhua, Wang Xiaoxui. Study of application and evolution of fiber grating sensors technique [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2004, 44(6): 931~956  
 林钧岫, 王文华, 王小旭. 光纤光栅传感技术应用研究及其进展[J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(6): 931~956  
 4 Liu Lihui, Zhao Qida, Zhang Hao. Progress in demodulation technology of fiber Bragg grating sensor [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2004, 41(7): 35~39