

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.02.08

基于 FPGA 的多通道高速光纤光栅解调系统

张爽爽, 申雅峰

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 研发了一种基于波长扫描光源和嵌入式解调的多通道高速光纤布拉格光栅解调系统。该系统采用半导体光放大器(SOA)结合可调谐 F-P 滤波器产生频率为 1 kHz 的稳定波长扫描光。通过使用对称三角波技术和快速 FPGA 解调算法, 系统最终能够同时实现 16 个通道以及 2 kHz 的解调速率, 测量范围 80 nm。

关键词: 光纤光栅; 高速解调系统; FPGA

中图分类号: TB96; TP212

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)02-0043-05

Multichannel High-speed White-light Interferometric Interrogation System for FBG-based on FPGA

ZHANG Shuangshuang, SHEN Yafeng

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A multichannel high-speed FBG sensor interrogation system based on wavelength-scanning fiber laser and field programmable gate array (FPGA) is developed. The system utilizes a semiconductor optical amplifier (SOA) and a fiber Fabry-Perot tunable filter (FFP-TF) to generate a wavelength-scanning fiber laser with a sweep rate of 1 kHz. By combining the symmetric triangular waveform technique and the fast FPGA-based signal processing algorithm, the FBG interrogation system realizes a demodulation speed of 2 kHz and a multiplexing performance of 16 channels simultaneously. In addition, the interrogation wavelength-range can reach 80 nm.

Key words: FBG; high-speed interrogation system; FPGA

0 引言

光纤布拉格光栅(FBG)是目前使用频率最高、应用范围最广的光纤传感器。它是利用对紫外光敏感的掺杂光纤, 将其暴露在光强周期性分布的紫外激光下, 掺杂光纤的纤芯折射率根据照射光强度产生轴向周期性变化, 从而形成的一种芯内相位光栅。与传统电气传感器相比较, FBG 传感器具有体积小、重量轻、结构简单、可复用、损耗小、可长距离测量、电绝缘性好、不受电磁干扰、不受腐蚀、防爆等优点^[1]。

为使用 FBG 传感器测量物理量(温度和压力), 采用波长扫描技术对 FBG 传感器进行解调。在解调过程中, 需要对光谱信号进行采集和处理, 而采用数据采集卡和 PC 机去实现, 存在体积大, 价格昂贵等缺点。基于嵌入式的光纤传感解调仪因体积小、速度快、便携性好等优点而广泛应用于工程领域。在嵌入式领域, FPGA(现场可编程门阵列)具有并行处理、高速运行等优点。本文研发了基于可调谐 F-P 滤波器的光纤布拉格光栅的解调技术, 采用高速 FPGA 芯片作为并行处理器, 实现了高速多通道的光纤光栅信号解调系统。

1 解调系统方案

光纤光栅解调技术的关键在于如何获取 FBG 传感器反射信号的光谱波长值。系统主要包括: 内置可调谐 F-P 滤波器的波长扫描激光器, F-P 标准具, 光电探测器, 启动脉冲电路以及嵌入式解调系统等。由锯齿波电压驱动 F-P 滤波器产生波长扫描光源, 由半导体激光器产生 1510 ~ 1590 nm 的增益, 得到波长扫描光源, 出射的光 1 分 2 耦合器将光分成两束, 一束光注入 1 分 16 路光分路器, 等分成 16 路输送到 FBG 传感器, 并将 FBG 传感器的光反射信号输送到光探测放大模块。另一束光则注入光纤 F-P 标准具中, F-P 标准具的光信号经光电转换并配合放大电路转成 16 路 F-P 标准具电压信号。将转换后的 16 路传感器信号和 16 路 F-P 标准具信号分成 16 组并由 16 路嵌入式解调系统进行处理, 最终将 16 路的解调结果通过以太网上传至交换机, 并最终上传至上位机。其中, 系统中的光源使用的是 SOA 激光器的增益放大器, 通过在可调谐法布里-珀罗滤波器(FFP)上施加扫描电压实现波长扫描。其扫描频率为 1 kHz, 波长变化范围为 80 nm, 线宽为 0.1

nm; F-P 标准具的自由光谱范围为 0.4 nm, 精细度 14。其中抹去 F-P 标准具波长为 1529.568 nm 和 1529.958 nm 两个波长处的峰, 便于通过峰峰间距判定寻找标记位置

来进行波长拟合。嵌入式解调系统则是选用 FPGA 作为处理芯片, AD 转换芯片用于实现信号的采集、计算以及数据传输^[2-5]。系统解调框图如图 1 所示。

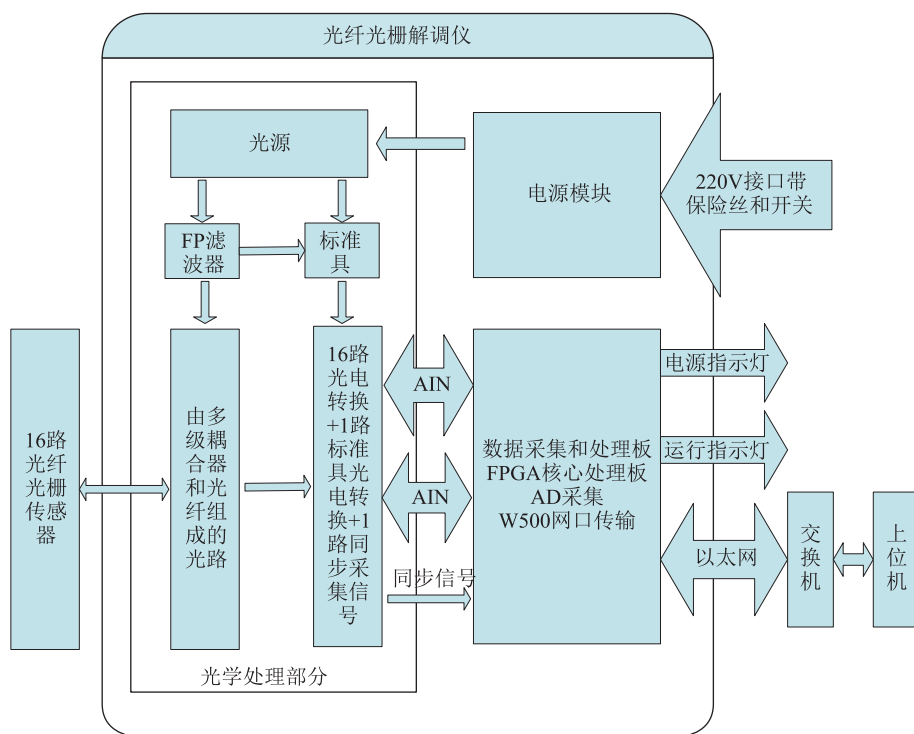


图 1 解调系统原理图

在该解调系统中, 需将测量的光信号通过光电二极管转换为电信号并放大, 并使用芯片 AD 对 F-P 标准具信号和 FBG 传感器的波长信号进行采集, 根据 F-P 滤波器的透射谱峰值波长和扫描电压的关系可计算得出 FBG 传感器波长值, 数据通过以太网发送给计算机。最后根据 FBG 传感器的波长变化量和已标定的待测物理量的编码关系计算出待测物理量的变化^[6]。

2 解调原理及算法实现

2.1 对称三角波

在常规解调方案中, 三角波的扫描频率决定了激光器的波长扫描频率, 从而决定了系统的解调速率。在高速扫描系统中, 每增加系统的扫描频率都将降低系统的稳定性。因此, 为了增加扫描系统的稳定性并且提高三角波的利用率, 本文设计基于对称三角波的波长扫描系统, 即设计的三角波驱动电压在上升和下降期间完全对称。在这种情况下, 基于 FPGA 的数据处理模块将分别在 1 kHz 三角波的上升和下降阶段进行采集处理, 从而实现 2 kHz 的解调速率。由于上升和下降期间采集的对称性, 在三角波下降时采集的数

据需要进行逆向排序, 以保证和波长扫描正相关。本文采用 DDS 芯片来生成对称三角波, 生成的三角波通过运放进行放大, 采用程控放大器来改变放大倍数。整个电路由 ARM (STM32F103) 芯片控制。最终生成的三角波如图 2 所示。

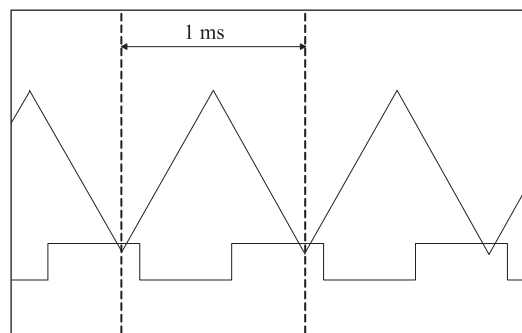


图 2 对称三角波信号

图 2 主要显示了扫描电压信号和同步信号, 其中锯齿波信号周期为 1 ms, 对应重复频率为 1 kHz, 扫描电压最大值为 20 V 左右, 与之对应的同步信号的周期也为 1 ms。由于锯齿波扫描上升和下降的对称性, 实

际应用中将分别产生两组对称的 F-P 标准具及传感器信号,从而实现 2 kHz 的解调速率并增加系统的稳定性。

2.2 FPGA 解调算法

波长解调技术决定了光纤光栅波长的解调算法,也决定了解调过程中所采集的数据和处理数据的方式^[7]。本项目主要研究的是基于 F-P 滤波器的光纤光栅解调系统的波长解调算法,对 F-P 标准具和 FBG 传感器进行数据处理,最终可得到 FBG 传感器的中心波长变化量。数据处理过程主要包括对 F-P 标准具波形和传感器波形的峰值检测和波长的计算。采样得到一个完整的波峰波形时,需要采用合适的寻峰算法确定其峰值位置,寻峰算法是决定标定与解调准确度的关键因素。本系统采用基于 FPGA 的自适应寻峰算法来进行峰值定位。根据系统的情况,通过 FPGA 检测同步信号成的上升沿和下降沿,然后触发 FPGA 控制采集芯片进行采集,FPGA 将采集的信号进行阈值截取并进行滤波去噪声处理,同时将滤波信号存入 FIFO,存储完一定数据之后 FIFO 再读出数据,然后对读出后的数据进行峰值位置判定以及波长拟合。最后将计算出的结果通过以太网发送至上位机并实时显示。

为去除光谱区外的毛刺,需设置合适的阈值,大于阈值的信号保持不变,小于阈值的信号设为阈值大小。为了保证阈值设置的合理性,本文采用实时动态阈值进行判定,在上一次采集的结果中找出数据的最大值和最小值,并取其差值的五分之一左右作为截取阈值(若 F-P 标准具信号电压为 0.2 ~ 1.2 V,则阈值为 0.4 V),去除低电压噪声干扰。同时,采集出的光谱也受到一定噪声的影响,必须对采集到的原始光谱数据进行滤波处理。本系统选用 Newton-Cotes 公式进行滤波降噪处理。

对信号进行滤波处理后即可进行求峰值运算。首先通过峰值最大值比较法进行粗略定位,然后再通过自适应半峰法进行精确定位。峰值计算判定方法如图 3 所示。首先通过计算最大值 75 分位值和寻峰有效点平均值期望来得到标定的阈值 Y_{avr} 。再通过判断标定阈值 Y_{avr} 的前后的点来得到 Y_{avr} 前后处的位置,其中峰值左侧和右侧各一组。正常情况下,峰值左侧和右侧 Y_{avr} 附近的位置的中间位置即为峰值位置,但是由于采样点的时间间隔性,图 3 得到的位置依然比较粗糙。为了实现精确峰值定位,同时避免 FPGA 的浮点运算,本文将横坐标扩展 128 倍,再根据得到的两组标定阈值的前后位置,结合三角相似原理得到阈值处精确位置,

如图 4 和图 5 所示。其中图 4 的 3 dB 值对应图 3 的 Y_{avr} 值,峰值左侧和右侧的两组标定阈值前后位置分别为 $x_i, x_{i+1}, x_j, x_{j+1}$ 。

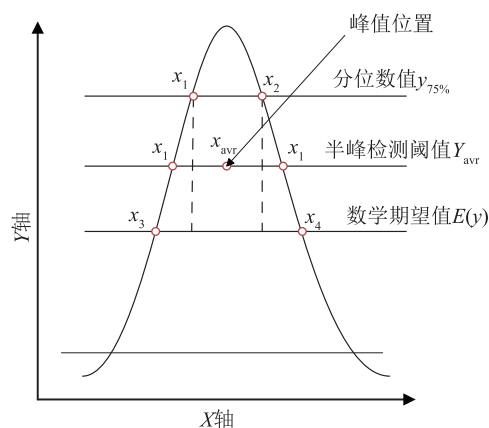


图3 半峰检测方案图

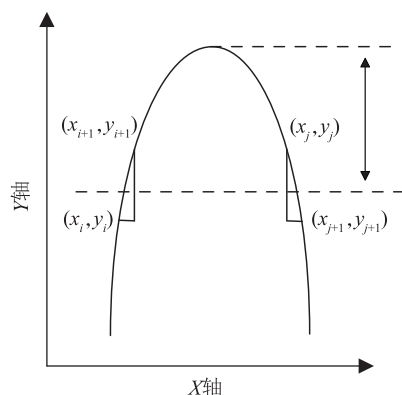


图4 三角原理求精确位置

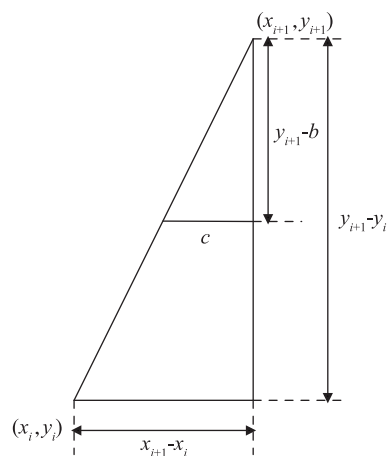


图5 相邻两点构成的三角形

最终,采用四阶拉格朗日插值法进行插值拟合,

并通过 F-P 标准具的波长值对 FBG 传感器的波长进行标定^[8-9]。

3 测试结果

为满足解调速度的要求，本套系统有 16 块 FPGA 开发板同时参与解调计算并将获取的结果经以太网发送至网络交换机，交换机通过分配 IP 地址将数据统一发送至上位机。上位机将显示不同通道下不同传感器的结果。

3.1 波长测量范围测试

使用带标记波长的 F-P 标准具直接连接至光源测量光源带宽，进而验证解调仪波长测量范围。图 6 为一个 FSR 的 F-P 标准具谱，F-P 标准具的自由光谱范围为 0.4 nm，精细度 14。其中抹去 F-P 标准具波长为 1529.568 nm 和 1529.958 nm 两个波长处的峰，便于通过峰峰间距判定寻找标记位置来计算光源带宽。图 6 光谱覆盖 1510.330 ~ 1590.767 nm 波段，因此可得解调仪带宽大于 80 nm。

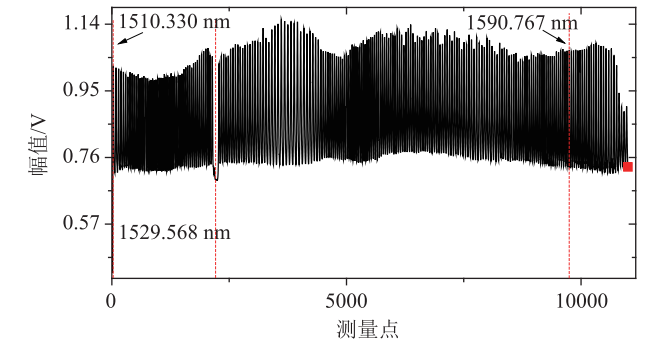


图 6 F-P 标准具谱

3.2 工作频率测试

通过在一定时间内保存数据的个数进行验证(例如，记录时长为 1 s 的数据，对数据进行计数)。工作频率测试结果如表 1 所示。

3.3 波长分辨力测试

使用稳定性高的参考波长作为传感器对解调仪的波长分辨力进行测试，选取通道 1，5，9，13 进行测试，测试结果如图 7、图 8、图 9、图 10 所示。

从图 7、图 8、图 9、图 10 的测试结果可得，该解调系统的波长分辨力为 5 pm。

4 结论

本文根据高速扫描光纤激光器，结合 FPGA 高速处理的优势，开发了一种多通道高速光纤光栅解调系

表 1 工作频率测试结果

实验编号	测试时长/s	数据数量	工作频率/kHz
1	2	4048	2
2	2	4102	2
3	1	2110	2
4	1	2034	2
5	1	2087	2
6	1	2124	2
7	1	2115	2
8	1	2028	2
9	1	2210	2
10	1	2135	2
11	1	2058	2
12	1	2064	2
13	1	2087	2
14	1	2094	2
15	1	2036	2
16	1	2022	2

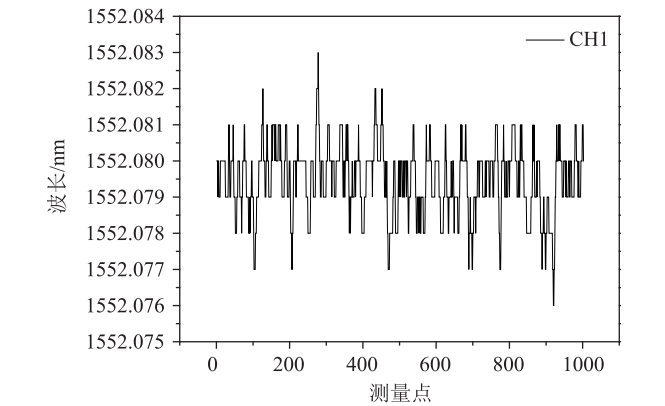


图 7 通道 1 传感器测试结果

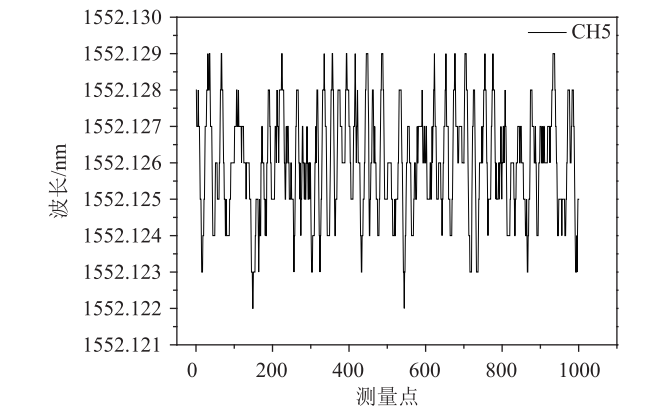


图 8 通道 5 传感器测试结果

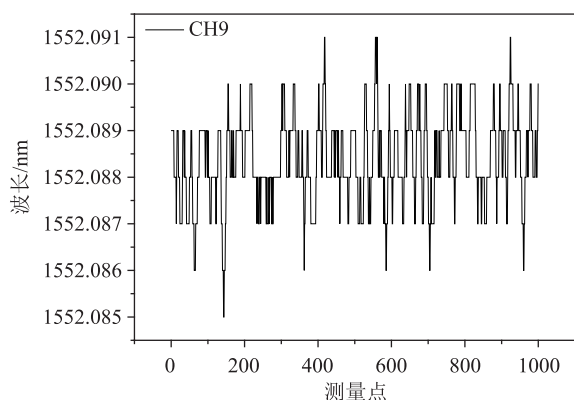


图9 通道9传感器测试结果

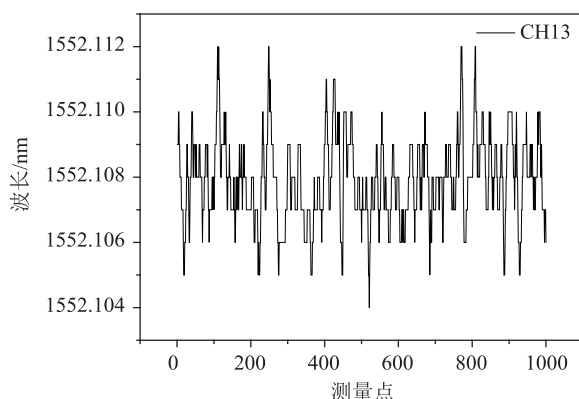


图10 通道13传感器测试结果

统。该系统能够实现 16 通道、2 kHz 解调速率的高速解调，并且具有较高的解调分辨率和测量准确度。

参考文献

- [1] 江毅. 高级光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 元雁龙, 江毅, 池宪. 一种基于 DSP 的 FBG 传感器解调系统及算法[J]. 光学技术, 2014, 40(3): 269–272.
- [3] 张爽爽, 江毅. 宽波长范围窄线宽波长连续可调的光纤激光器[J]. 光学技术, 2019, 45(1): 51–55.
- [4] 周慧栋, 王东, 王宇, 等. 扫描激光器型光纤光栅解调仪设计[J]. 光学技术, 2019, 45(2): 153–158.
- [5] 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): 60–65.
- [6] 陈骁. 基于光纤光栅的 PZT 自适应控制系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [7] 沈漫. 基于可调谐 FFP 的光纤光栅波长解调系统的算法研究[D]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2014.
- [8] 熊涛. 基于 FPGA 的高速光纤光栅解调仪的硬件电路设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [9] 周明. 基于 FPGA 的光纤光栅传感解调系统设计[D]. 上海: 上海师范大学, 2016.

收稿日期: 2020-03-22

作者简介

张爽爽(1992-), 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事光纤光栅传感解调技术研究。

