

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005540

基于FPGA的红外光谱传感器驱动采集电路设计*

刘浩¹ 任乾钰¹ 刘佳¹ 贾平岗^{1,2}

(1.中北大学电子测试技术重点实验室 太原 030051; 2.仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要:针对传统光谱采集设备体积大,成本高的缺点,基于HAMAMATSU公司开发的MEMS-FPI型光谱传感器C14272,设计了以FPGA作为主控的红外光谱传感器驱动采集电路。电路包括可调谐滤波器的电压驱动模块、光谱与温度的信号采集模块、USB传输模块等。实验证明,该电路采集的C+L波段ASE光源的光谱与仿真所得光谱相近,实现了对光谱传感器的驱动以及光谱数据的采集。电路可以探测的波长范围为1 350~1 650 nm,全波段光谱分辨率小于18 nm。电路整体设计结构紧凑,成本低,在物质成分定性检测等特定领域有一定应用价值。

关键词: FPGA; MEMS-FPI; 光谱传感器; 红外

中图分类号: TH89 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design of driving and acquisition circuit for infrared spectrum sensor based on FPGA

Liu Hao¹ Ren Qianyu¹ Liu Jia¹ Jia Pinggang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of the Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of large volume and high cost of traditional spectrum acquisition equipment, a driving and acquisition circuit of infrared spectrum sensor controlled by FPGA is designed based on MEMS-FPI spectrum sensor C14272 developed by HAMAMATSU. The circuit includes voltage driving module of the tunable filter, spectrum and temperature signal acquisition module, USB transmission module and so on. The test results show that the spectrum of the C+L band ASE light source obtained by the circuit is similar to the simulation spectrum, which realizes the driving of the spectrum sensor and the collection of spectrum data. The wavelength detection range of the circuit is 1 350~1 650 nm and the full band spectral resolution is less than 18 nm. The design is compact in structure and low in cost, which is helpful in specific fields such as qualitative detection of material composition.

Keywords: FPGA; MEMS-FPI; spectrum sensor; infrared

0 引言

光谱技术在航天遥测、医学诊断、光学传感等领域有着广泛的应用^[1-6],但是传统光谱探测设备往往体积大,价格昂贵,这限制了光谱探测设备的应用^[7-8]。随着微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)技术的进步,已有部分结构紧凑、相对便携的光谱采集设备面市,这些设计中相当一部分采用相对小型的电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)作为光谱探测器件^[9-11],不过CCD尤其是红外波段CCD成本仍然较高^[12],限制了该类型光谱设备的进一步应用。得益于MEMS加工工艺的进步,基于MEMS法珀干涉仪(Fabry-Perot interferometer, MEMS-

FPI)原理的光谱传感器也逐渐得到应用,由于采用了MEMS技术,往往具有体积小、功耗低、易于集成的特点,不同于常见的CCD型光谱探测器件,该传感器中集成的光电探测器件是镓砷化铟(indium gallium arsenide, InGaAs)光电二极管,十分有利于系统整体设计成本降低^[13-14]。

1 传感器工作原理

HAMAMATSU公司开发的C14272是一款基于法珀干涉原理的红外光谱传感器,如图1(a)所示,其整体体积小,质量轻,便于系统集成。其光谱扫描覆盖范围为1 350~1 650 nm,半波分辨率<18 nm,波长重复性为±2 nm。

图1(b)所示为C14272的结构,C14272中集成了基于

收稿日期:2020-12-14

* 基金项目:国家自然科学基金(51935011, 52075505)项目资助

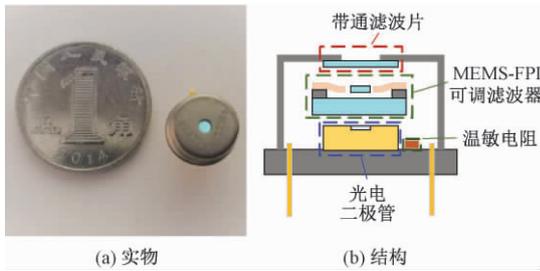


图 1 C14272 光谱传感器

MEMS 技术加工而成的 MEMS-FPI 型可调谐滤波器,该滤波器由两块镀膜的微动镜片构成,根据法珀干涉原理,当两镜片之间距离为 $\lambda/2m$ 时(其中 m 为整数),波长为 λ 的光透射率最高^[15]。当加在可调谐滤波器上的驱动电压发生变化时,两镜片间距离也将在静电力的作用下发生变化,其透射波长也将发生变化,集成在可调谐滤波器后端的光电二极管对不同波长的透射光强进行扫描测量,如此实现入射光的光谱探测。对于 C14272 型光谱传感器,其峰值透射光波长 λ 与施加驱动电压 V 之间的关系满足:

$$V^2 = a\lambda^5 + b\lambda^4 + c\lambda^3 + d\lambda^2 + e\lambda + f \quad (1)$$

式中: a, b, c, d, e, f 为与加工等有关的固有参数,每一个具体的传感器有所不同,具有一定的分立性,通常由出厂前标定得到。一般的, C14272 型的光谱传感器其驱动电压与所对应的扫描波长关系如图 2 所示。同时 C14272 内部集成有一个负温度系数(negative temperature coefficient, NTC)热敏电阻,可以实现对传感器温度的监测,以此可做相应的温度补偿。

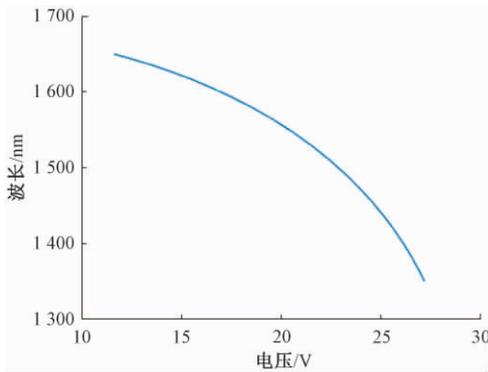


图 2 峰值透射波长与滤波器控制电压关系

2 电路设计方案

电路总体设计方案如图 3 所示。采用 Cyclone IV 系列的 EP4CE30F23C8N FPGA 芯片作为主控模块的控制芯片, FPGA 芯片主要实现扫描信号的输出以及光电信号处理等功能。电压驱动模块通过 DAC 以及驱动放大电路实现对 MEMS-FPI 滤波器的驱动。信号采集模块通过光电转换以及压阻转换电路结合 ADC 电路实现对传感器中集

成的光电二极管与 NTC 的信号采集。另外,电路设计中还包括有 USB 通信模块以及电源模块。

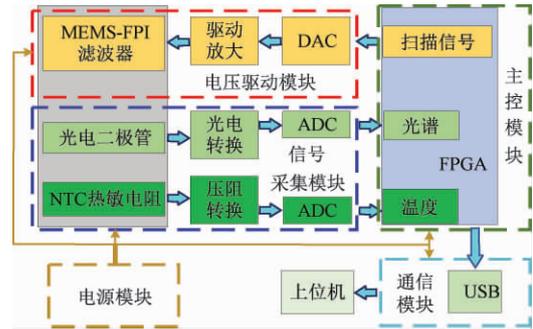


图 3 电路整体设计

2.1 电压驱动模块电路设计

1) DA 转换电路

C14272 中可调谐滤波器的驱动电压,采用 DA 转换加电压放大的方案实现。由于可调谐滤波器驱动电压的最终输出精度直接受 DA 转换的精度影响,为了保证精度,选用 ADI 公司推出的 16 位高精度 AD5541 芯片,该芯片支持 SPI 接口,控制方便,其输出模拟电压分辨率可以达到约 0.04 mV。设计中为了防止参考电压波动对 DA 芯片精度造成影响,使用专门的基准电压芯片 ADR423 提供 3 V 参考电压,该芯片输出噪声仅为 $2.0 \mu\text{V}$,同时基准电源与 DA 芯片之间以及 DA 输出后端分别连接以 AD8628 芯片设计的电压跟随器,起到阻抗匹配作用,其电路设计如图 4 所示。在 FPGA 芯片的控制下,该电路可以实现 0~3 V 可调电压输出。

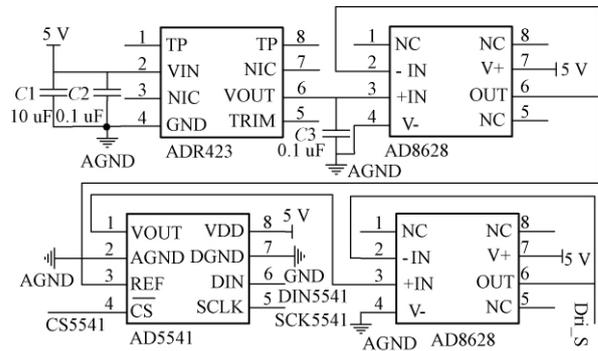


图 4 AD5541 DA 转换电路

2) 驱动放大电路

MEMS-FPI 型可调谐滤波器作为静电力驱动器,属于典型的容性负载。一般运放的容性负载驱动能力相对较弱,本文选用的驱动运放 LM7321 芯片可以带无限容性负载,其压摆率为 $18 \text{ V}/\mu\text{s}$,典型供电电压为 $\pm 15 \text{ V}$,可以实现轨到轨输出,其电路设计如图 5 所示。

考虑到 C14272 所需驱动电压达到 27 V,所以运放

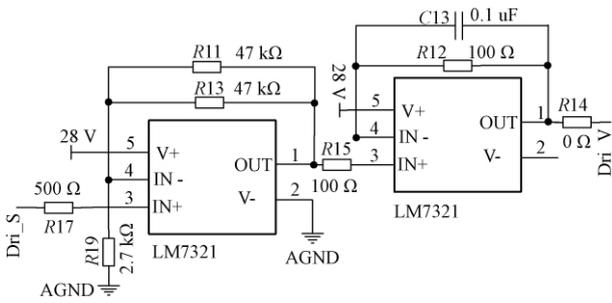


图5 LM7321驱动放大电路

LM7321的供电电压需高于27V,设计中采用28V的单电源供电方式。同时因为DA转换电路的输出电压最高值为3V,为了满足驱动电压要求,放大电路至少需要9倍的电压放大能力,设计中以LM7321搭设同相比例放大器,反向输入端电阻R19设计为2.7kΩ,反馈电阻设计为两个47kΩ电阻并联,放大倍数约为9.7倍。同时为了保证足够的负载能力,在放大电路之后,使用一片LM7321芯片做电压跟随。

2.2 信号采集模块设计

1) 光电转换电路

光电转换电路如图6所示,C14272内置的光电二极管设计工作在光导模式,使用OPA657N作为运算放大器实现I/V转换。OPA657N是TI公司推出的一款高增益、大带宽、低失真的电压反馈型运算放大器,其增益带宽积为1.6G,典型压摆率为700V/μs,适用于宽带光电放大。

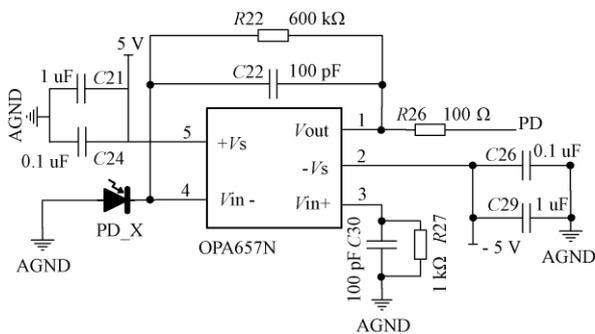


图6 OPA657N I/V转换电路

传感器实际输出的光电信号都为正值模拟电压,但为了保证在光信号强度较弱,输出电信号较小时的运放响应速度,设计采用±5V双电源为运放供电。运放反馈回路电阻R22为I/V转换电阻,在不同的光强下,调整该电阻大小可以使运放输出信号的大小在合适的电压范围内。并联反馈电容C22在运放的反馈回路中,对于维持电路稳定是必要的,一方面该电容可以补偿光电二极管在运放输入端引入的电容,另一方面,在进行实际调试时,适当地调整C22的电容值可以起到一定的滤波效果,提高光电转换之后的信号质量。

2) NTC 压阻转换电路

C14272中集成的NTC热敏电阻是一种负温度系数半导体温度传感器,其阻值随温度上升呈指数关系减小,设计如图7所示的电路实现对NTC电阻与电压的转换,其中电容C6起稳定输出电压作用。利用A/D转化电路得到NTC上的数字电压,通过查表法可得到传感器内部的实时温度。

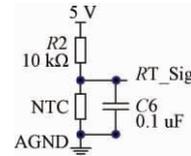


图7 电阻/电压转换电路

3) AD 转换电路

电路中对光电信号与NTC温度信号的AD转换都采用16位精度AD7667芯片,该芯片具备1MSPS的采样率,足够满足采样需求。并且该芯片具有BYTESWAP引脚,通过对芯片BYTESWAP引脚的高低电平控制,可以实现输出数字信号高8位字节与低8位字节在输出引脚上的相互转换,其转换如图8所示,借助BYTESWAP功能,ADC芯片与FPGA芯片之间16位的数据传输可以通过8根数据线实现,节约了IO口。

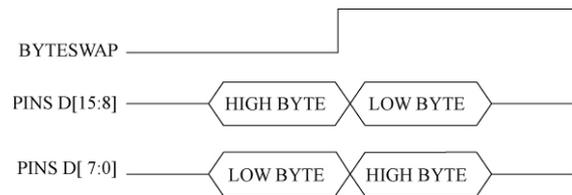


图8 AD7667高低字节转换

对于光电转换电路后端的AD转换采集电路,如图9所示,由于前端输出信号的电压范围在0~5V之间,而AD7667芯片输入电压范围在2.5V以内,所以在光电输出信号与AD芯片之间加入分压电路,并使用两片AD8031运放作电压跟随器,起到缓冲作用,避免引起光电信号失真,电阻R25、电容C23构成无源低通滤波器,减少信号噪声。对于温度采集电路,其分压电阻需做适当的调整,使得输入AD转换芯片的信号电压也在合适的范围之内。

2.3 通信模块设计

本文选用CYPRESS公司的专用USB微控制芯片CY7C68013实现FPGA与PC之间的数据传输,该芯片以8051控制器为内核,并集成了USB2.0协议,支持GPIF、PROTS、Slave FIFO 3种模式,该电路设计中采用CY7C68013作为从机的Slave FIFO模式,另外在电路中配置一块24LC64 EEPROM芯片用于烧录程序。CY7C68013及其外围配置电路如图10所示。

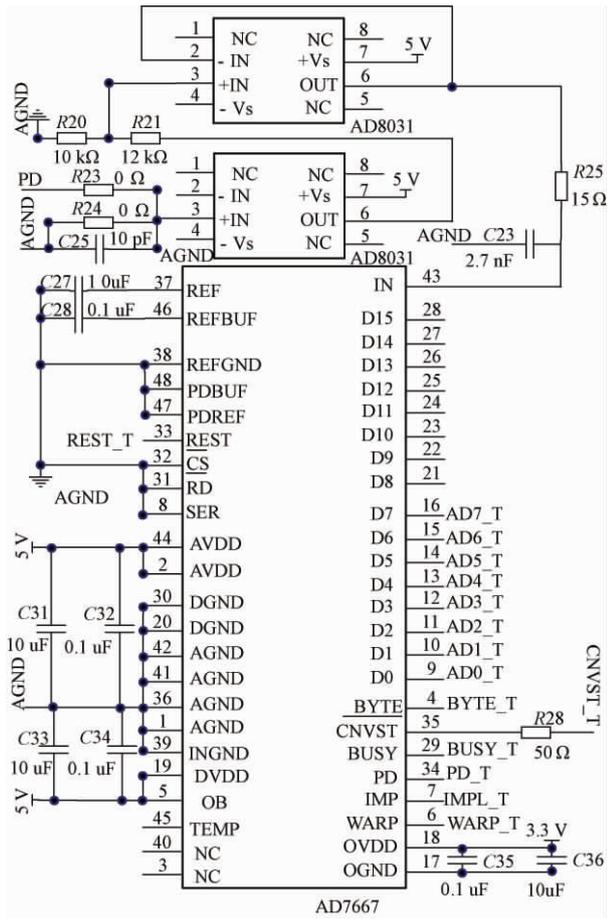


图 9 AD7667 AD 转换电路

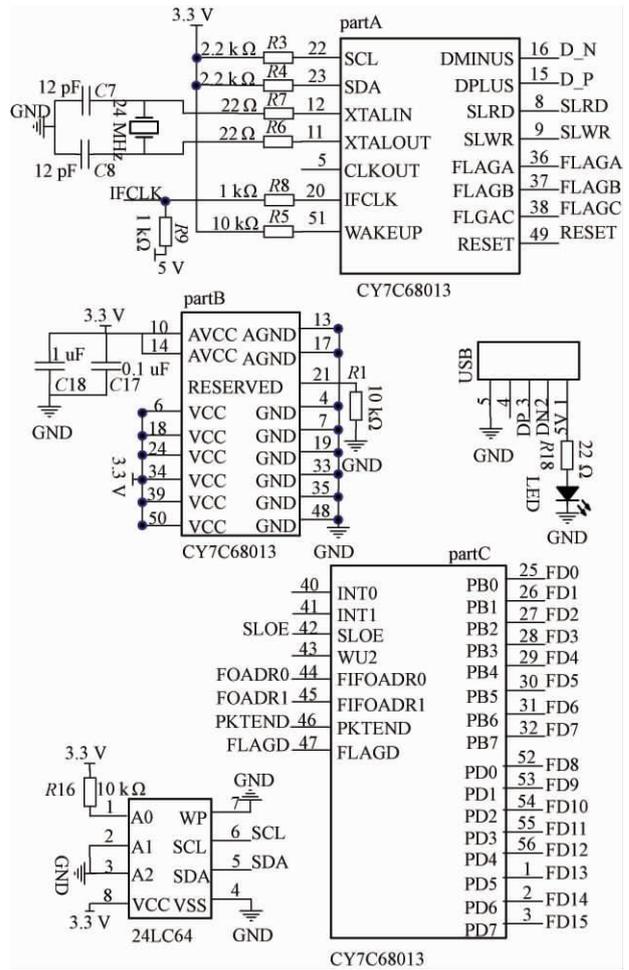


图 10 CY7C68013 USB 接口电路

2.4 电源模块设计

电路的电源设计以及器件选型方案如图 11 所示。考虑到驱动可调谐滤波器的运放芯片需要 28 V 供电，而主控 FPGA 芯片包括其最小系统以及光电转换、信号采集、USB 传输等单元的所需电源电压集中在 5 V 及以下，包括 3.3、2.5、1.8、1.2、-5 V 等，所以选用电压等级居中的 12 V 电源作为系统供电，这样可以较方便地实现不同电压间的转换。

电路中光电转换、驱动放大电路以及 AD 采集电路由于模拟器件的使用，对供电质量要求更高，使用开关电源芯片分别将 12 V 电源转换为 30、7、-7 V 后，为了尽量减小电源噪声，在开关电源之后使用线性稳压芯片，降低纹波保证供电质量，并且在实际的电路设计中，加入了多级 LC 无源滤波，尽量减少电源所引入的干扰。对于数字器件的供电，使用 TPS5430 将 12 V 电源转换为 5 V，并采用 AMS1117 系列稳压芯片来满足多电压等级的设计要求。

3 实验与分析

使用本文电路设计进行光谱数据采集时，首先需根据可调谐滤波器驱动电压与峰值透射波长的对应关系式(1)，

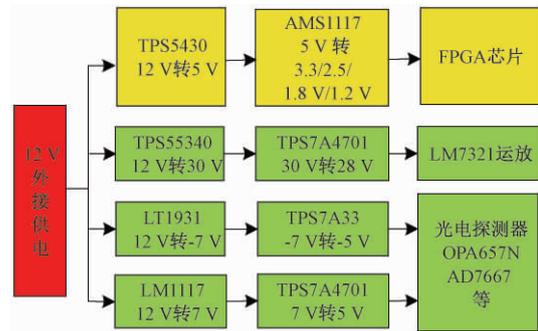


图 11 电源设计

利用 MATLAB 软件计算并生成驱动电压的 mif 文件，将 mif 文件写入 FPGA，控制 DA 芯片 AD5541 输出所需扫描驱动电压，LM7321 芯片对 DA 输出电压进行放大，实现传感器驱动，传感器的扫描波长以及扫描速度均可通过程序的更改灵活地进行调节。接着由 AD 转换电路对温度与光谱信号进行采集，FPGA 对采集的数据进行处理，并通过 USB 接口将最终采集的光谱数据传至计算机。

MEMS-FPI型的光谱传感器其性能很大一部分取决于其中集成的可调谐滤波器的滤波性能。通过本文设计的驱动采集电路,对C14272中集成的MEMS-FPI型可调谐滤波器的性能进行相关测试,实验系统如图12所示。以波长可调的激光器(UC INSTRUMENTS, GM82009C)作为光源,输出1525~1565 nm波段的扫描激光,通过光纤与法兰将扫描激光耦合进光谱传感器,改变驱动电路的输出电压,将可调谐滤波器的中心透射波长分别设置为1535、1540、1545、1550以及1555 nm,采集传感器对应的输出数据如图13所示,其峰值波长以及光强关系如图14所示。可以看出可调谐滤波器的透射光谱大致符合高斯分布,其分辨率也即透射光谱半波宽在18 nm以下,光谱峰值对应波长与设定的中心透射波长误差在2 nm内,不同中心透射波长的光谱峰值大小存在一定差异,且在1525~1625 nm波段下有随波长增大的趋势,这会给实际光谱测量造成一定误差。



图12 传感器滤波性能测试实验系统

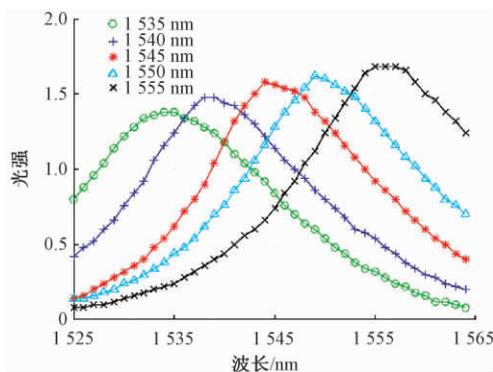


图13 可调谐滤波器不同中心波长处透射光谱

使用该光谱驱动采集电路对C+L波段放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)宽带光源(CONNET, VASS-CL-B)光谱进行采集。为了便于对比分析,同时使用横河光谱仪(YOKOGAWA, AQ6374)采集ASE光源光谱,并利用光谱仪所采集的数据,结合C14272传感器中集成的可调谐滤波器透射光谱的数学模型对C14272的输出光谱进行MATLAB仿真。

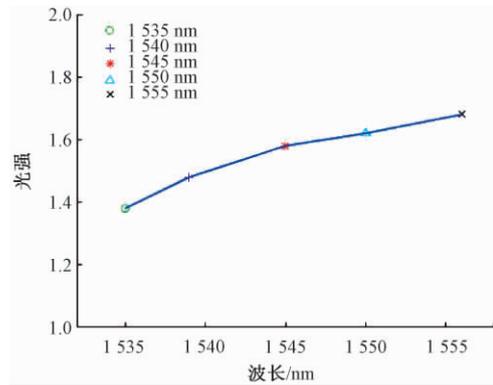


图14 可调谐滤波器中心波长与透射光强关系

如图15所示,对于C+L波段的ASE光源,横河光谱仪所测得光谱细节保留丰富,在1530~1565 nm即C波段中,可以观察到不同波长处的光强存有明显的波动。而C14272实测光谱受限于可调谐滤波器分辨率,失去了原始光谱中的细节,导致整体精细度不高,但仍可容易观察到实测光谱在C波段以及L波段存在两个明显的波峰,这与C+L波段光源特性以及AQ6374光谱仪采集结果均是相符的,如图16所示。另外从图16中可以观察到实测光谱与仿真光谱其峰值对应波长是相近的,但在实测光谱的1565~1625 nm即L波段处,其光谱峰值光强比仿真光谱

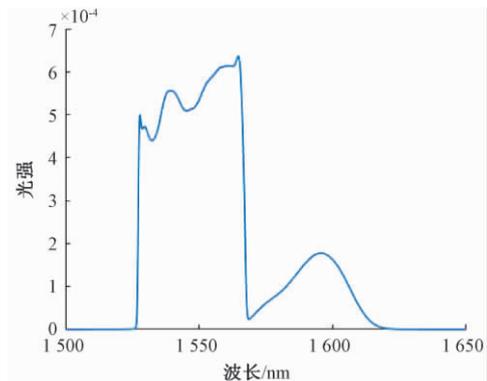


图15 横河光谱仪采集的ASE光源光谱

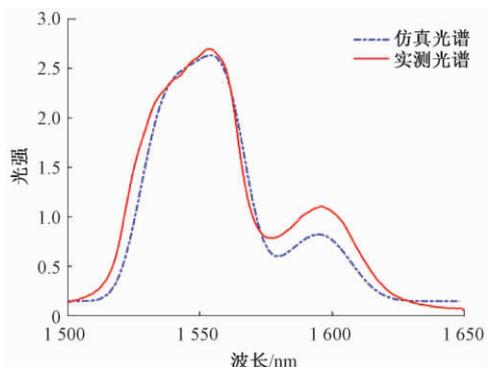


图16 ASE光源的光谱仿真与实测对比

更大,这是传感器中可调谐滤波器的滤波性能参数随波长增大变化而导致的。以上实验结果证明该电路设计可以实现对 C14272 光谱传感器的驱动与信号采集。

4 结 论

基于 MEMS-FPI 型红外光谱传感器,利用 FPGA 芯片作为主控,搭建了相关电压驱动与信号采集电路,并进行了相关实验,实现了对传感器中可调谐滤波器的滤波性能测试,以及对 C+L 波段 ASE 光源光谱的采集。电路整体设计方案简单,结构紧凑,成本低,使用灵活,这使得其在石化领域研究以及农副产品无损检测等需要光谱采集的领域存在一定应用前景。

参考文献

- [1] 刘银年.“高分五号”卫星可见短波红外高光谱相机的研制[J].航天返回与遥感,2018,39(3):25-28.
- [2] 杨明莉,范玉刚,李宝芸.基于 LDA 和 ELM 的高光谱图像降维与分类方法研究[J].电子测量与仪器学报,2020,34(5):190-196.
- [3] 高克铨,李志刚,徐长明,等.混合整体趋势扩散的虚拟样本构建及其血液光谱分析应用[J].仪器仪表学报,2019,40(8):167-175.
- [4] 唐瑛,王伟,张天阳.基于光谱法的法珀压力传感器腔长解调方法研究[J].电子测量技术,2019,42(3):1-6.
- [5] 李湘眷,张峰,李宇,等.基于波段选择和空-谱组合核函数的高光谱图像目标检测[J].国外电子测量技术,2019,38(5):101-108.
- [6] 王多加,周向阳,金同铭,等.近红外光谱检测技术在农业和食品分析上的应用[J].光谱学与光谱分析,2004,24(4):447-450.
- [7] 任兴.小型手持式低成本红外光谱仪关键部件研制[D].合肥:合肥工业大学,2016.
- [8] 张珮,王银红,江靖,等.便携式近红外光谱仪在果蔬品质定性和定量分析中的应用[J].食品科技,2020,45(5):287-292.
- [9] 刘丽莹,李野,郑峰,等.小型 CCD 光谱仪波长定标精度控制与影响分析[J].仪器仪表学报,2019,40(5):19-27.
- [10] 何艺桦,辛娟娟,徐开来,等.微型 CCD 光谱仪在光谱分析中的应用[J].化学研究与应用,2005(4):574-576.
- [11] 袁谦,黄波,张多英,等.基于 FPGA 的可见光波段便携式光谱仪的设计[J].现代电子技术,2019,42(6):100-104.
- [12] 陈通.Android 系统的微型近红外光谱仪开发及在食品质量检测中的应用[D].镇江:江苏大学,2016.
- [13] 刘宇龙.微型光谱采集系统设计[D].长春:长春理工大学,2014.
- [14] 孙武坚.微型近红外光谱仪的开发及植物油品质检测的应用[D].镇江:江苏大学,2017.
- [15] 江毅,唐才杰.光纤 Fabry-Perot 干涉仪原理及应用[M].北京:国防工业出版社,2009.

作者简介

刘浩,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感器解调技术。

E-mail: yongyule2012@163.com

贾平岗(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为光纤传感技术、高温压力传感技术、MEMS 传感器技术。

E-mail: pgjia@nuc.edu.cn