

Remote Real-Time Hyperspectral Video Acquisition Based on Zynq

Gaofeng Pang¹, Zhiyun Wang¹, Zhigang Zhao^{2*}, Chaoming Chen¹, Shaoshun Jin¹, Jianheng Huang¹, Yaohu Lei¹, Junle Qu¹

¹College of Optoelectronic Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong

²College of New Materials and New Energies, Shenzhen Technology University (Preparatory), Shenzhen Guangdong
Email: 464922827@qq.com, *zhaozhigang127@163.com

Received: Mar. 3rd, 2018; accepted: Mar. 19th, 2018; published: Mar. 28th, 2018

Abstract

As the application of hyperspectral image becomes more and more widespread, its use value is further explored, and the demand of hyperspectral video is getting stronger. Most of the hyperspectral acquisition was based on the principle of grating spectroscopy, however, with the development of MEMS technology, achieved with a CMOS-based monolithic integrated hyperspectral sensor. In this paper, we use Xilinx's Zynq to drive CMOS hyperspectral sensors and build DMA (Direct Memory Access) through FPGA in Zynq to achieve high-speed transmission of hyperspectral data from spectrometer to terminal. The current majority of hyperspectral acquisition systems need to acquire data through the spectrometer and then process the data by the high performance host computer. The hyperspectral acquisition system designed in this paper collects and processes data by the spectrometer. The terminal can remotely view the hyperspectral images in real time through the browser, which reduces the performance requirements of the host computer and has important potential application value.

Keywords

Hyperspectral Image, Remote, Real-Time, Zynq, DMA

基于Zynq的远程实时高光谱视频采集

庞高峰¹, 王志云¹, 赵志刚^{2*}, 陈超民¹, 金绍勋¹, 黄建衡¹, 雷耀虎¹, 屈军乐¹

¹深圳大学光电工程学院光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳

²深圳技术大学(筹)新材料与新能源学院, 广东 深圳

Email: 464922827@qq.com, *zhaozhigang127@163.com

*通讯作者。

文章引用: 庞高峰, 王志云, 赵志刚, 陈超民, 金绍勋, 黄建衡, 雷耀虎, 屈军乐. 基于 Zynq 的远程实时高光谱视频采集[J]. 仪器与设备, 2018, 6(1): 28-37. DOI: 10.12677/iae.2018.61005

收稿日期：2018年3月3日；录用日期：2018年3月19日；发布日期：2018年3月28日

摘要

随着高光谱图像应用越来越广泛，其使用价值进一步被发掘，高光谱视频的需求也逐渐强烈。高光谱采集大多基于光栅分光原理，受微机电技术发展的推动，基于CMOS的高光谱传感器得以实现。本文采用Xilinx的Zynq处理器驱动CMOS高光谱传感器，通过Zynq内的FPGA构建DMA (Direct Memory Access)，实现了高光谱数据从光谱仪到终端的高速传输。当前大多数高光谱采集系统通过光谱仪采集数据，然后由上位机进行数据处理，对上位机的性能要求较高。本文所完成的高光谱采集系统由光谱仪采集并处理数据，终端通过浏览器即可远程实时查看高光谱图像，降低了对上位机的性能要求，具备重要的潜在应用价值。

关键词

高光谱图像，远程，实时，Zynq，DMA

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高光谱图像能够同时获取被测物的光谱与图像信息，不仅可以对待测物体进行定性与定量分析，还可以定位分析[1] [2]，很大的拓宽了光谱的应用范围。自1987年AVIRIS制成第一台成像光谱仪后，成像光谱仪的研制技术日渐成熟，应用也越来越多。高光谱图像在遥感方面可以分析大地的山川河里、矿物等信息[3] [4]。结合无人机技术，机载成像光谱仪用于植被、农作物生长情况的检测和病虫害的预防[5]。在农副产品检测方面，可用于对瓜果蔬菜进行水分、糖分的无损检测、农药残留的检测等[6] [7]。在医学研究方面，针对某些初期肉眼无法识别的皮肤病害，可以用光谱图像面对皮肤进行观察分析[8]，提前预防。目前成像高光谱仪巨大的潜在使用价值逐渐被发掘。

高光谱仪的微型化能给很多方面的使用带来便利，不再是只能在实验室完成采样分析工作，可以到超市、农田、郊外等地方完成实验。通常高光谱图像的采集使用光栅分光，光路的搭建占用的很大的空间，加上数据采集、处理的电路部分，使高光谱采集系统体积很难实现微型化。随着微机电的技术迅速发展，CMOS高光谱传感器的研制逐渐成熟[9] [10]。CMOS高光谱传感器自身可实现分光，不要另外搭建分光系统，且体积和普通CMOS传感器体积相同。欧洲微电子研究中心(IMEC)研制的CMOS高光谱传感器采集速度快、光谱波段窄、分辨率高等众多优越性能正好满足我们的需求[11]。

随着高光谱图像应用越来越广泛，其使用价值进一步被发掘，高光谱视频的需求也逐渐强烈。当需要测量超市里的水果、农田中的农作物时，如果能够现场测试会很方便，不必把测试样品带回实验室，节省大量时间。如果能够远程实时查看，不在测试现场的人也能够观察到测量结果，使用将更加方便。当前大多数高光谱采集系统通过光谱仪主机采集数据，然后由上位机来对数据进行处理，不能实现远程实时高光谱数据的采集且对上位机的处理性能需求较高[12] [13] [14]。

为了解决上述问题，本文基于CMOS高光谱传感器，设计实现了一套微型光谱仪。光谱仪借助Zynq的强大处理性能，采集并处理高光谱数据，通过千兆以太网或WIFI将数据传输到网络中。光谱仪内部有

网络服务器，用户在智能终端的浏览器中输入特定的网址后，可远程访问光谱仪，实时预览被测样本高光谱视频。

2. 系统方案及硬件结构设计

本文的高光谱图像采集系统由高光谱传感器、主控芯片、存储模块、通信模块等部分组成，系统框架如图 1 所示。

已设计完成的高光谱微型光谱仪实物图如图 2 所示。外形尺寸为 $11 \times 6 \times 7 \text{ cm}$ ，小巧便携，能够拓宽光谱仪的应用场景和适用范围。

高光谱传感器由欧洲微电子研究中心(IMEC)研制，如图 3 所示。该传感器在普通 CMOS 芯片感光面上镀不同的光谱通带滤光膜达到分光效果，芯片总像素大小为 2048×1088 ，每 5×5 个像素为一个单元，单元中的 25 个像素采集不同的光谱波段信息，每个波段的光谱图像大小为 408×217 。高光谱传感器测量波段范围 $700\sim 950 \text{ nm}$ (NIR)，光谱分辨率为 10 nm ，空间分辨率为 $5.5 \text{ }\mu\text{m}$ ，时间分辨率为 2.9 ms 。

主控芯片使用 Xilinx 的 Zynq-7020，该芯片属于 Xilinx 公司的可扩展平台 Zynq 系列。Zynq 分为 PL (Programmable Logic)和 PS (Processing System)两部分，PL 为大面阵 FPGA，PS 为 2 个 ARM Cortex-A9 核[15]。Zynq 集成了 ARM 处理器的软件可编程性与 FPGA 的硬件可编程性。PL 与 PS 在同一个芯片内，所以比单独 FPGA 和 ARM 通过 PCB 板上的布线通讯速度要更快、更稳定，免去了大量的芯片外围基础电路节省大量空间。

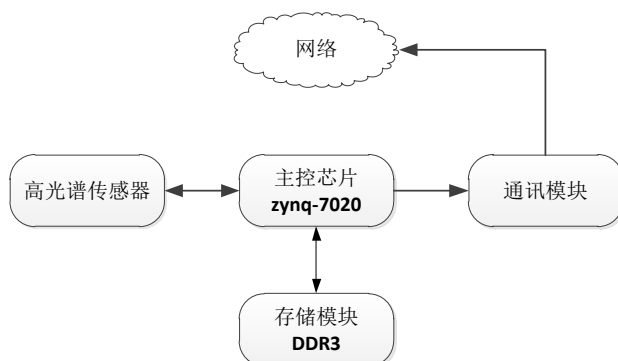


Figure 1. Hyperspectral acquisition system block diagram
图 1. 高光谱采集系统框图

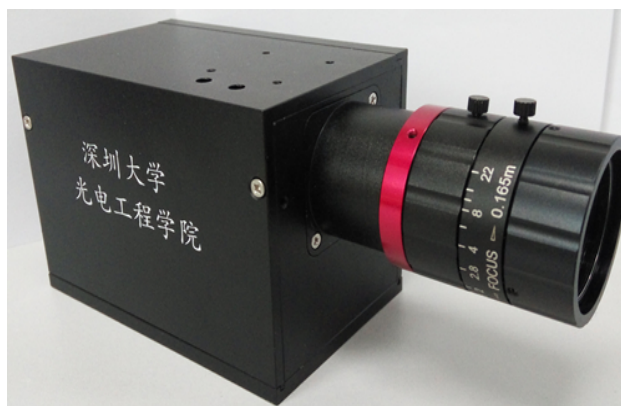


Figure 2. Hyperspectral micro-spectrometer
图 2. 高光谱微型光谱仪

本系统的内存空间共 1 GB，芯片采用 2 片型号为 IS43TR16256AL-125KBLI 的 DDR3 SDRAM，提供了足够的内存空间供高光谱图像数据缓存。通讯接口包括 WIFI 和网口，网口使用千兆以太网，型号为 JFM3811F-FL01-4F，连接在 Zynq 的 ENET0 口，WIFI 为 USB 转 WIFI，连接在 Zynq 的 USB0 口。

高光谱传感器与 Zynq 间采用 LVDS (Low Voltage Differential Signaling) 的方式进信号传输。LVDS 可以很好的屏蔽干扰，提高信号传输时的稳定性和可靠性。电路板设计为 12 层高器件密度 PCB，为了节省空间 PCB 中间有一部分为软板，这样 PCB 弯折后可以节省很大空间，如图 4 所示。

Zynq 中的 FPGA 硬件部分用 VIVADO2015.4 设计，ARM 软件部分用 Xilinx SDK2015.4 设计。FPGA 实现高光谱传感器驱动的实现、DMA 高速数据存储。ARM 实现 SPI 配置时的具体参数传递、帧请求的控制、DMA 的工作模式设置等一些控制。ARM 的控制信号通过片内 AXI 总线传递到 FPGA 中。

3. 高光谱传感器的驱动

高光谱传感器数据采集驱动结构如图 5 所示。



Figure 3. Hyperspectral sensor
图 3. 高光谱传感器



Figure 4. Circuit board
图 4. 电路板

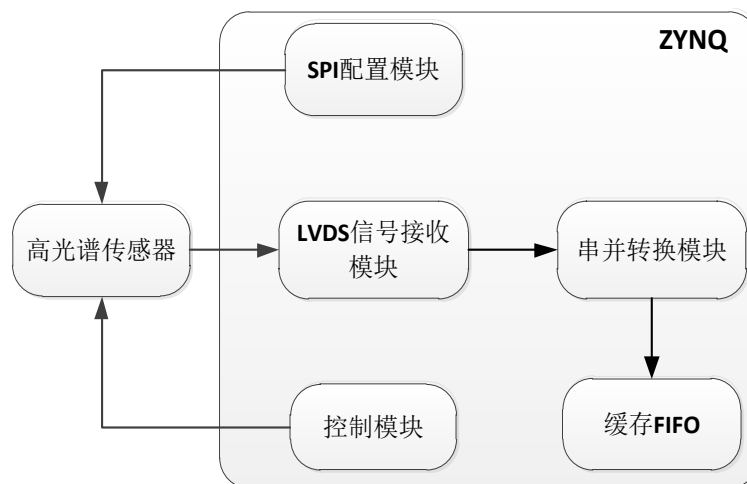


Figure 5. Hyperspectral sensor drive block diagram
图 5. 高光谱传感器驱动框图

包括 SPI 配置模块、LVDS 信号接收模块、控制模块、串并转换模块、缓存 FIFO 等组成。

SPI 配置模块配置高光谱传感器芯片的工作模式、曝光时间、像素采集深度等一些参数。控制模块控制高光谱传感器的电源、帧请求信号、时钟信号、复位信号等。因为高光谱传感器输出数据信号是以差分信号的形式送达 Zynq，所以需要 LVDS 信号接收模块将差分信号转换为普通信号。高光谱传感器输出的数据是串行数据，为了存储与方便处理需要对数据串并转换。缓存 FIFO 模块对数据进行缓存，等待 DMA 将数据转移到 DDR 中。

高光谱传感器数据采集驱动的流程如图 6 所示。首先控制模块打开高光谱传感器电源，提供时钟，复位结束后，SPI 配置模块开始配置高光谱传感器各种参数，控制模块发出帧请求信号后，高光谱传感器开始输出高光谱图像数据，LVDS 信号接收模块将接收到的数据处理成普通信号，然后串并转换模块数据转为 32 bit 并行数据缓存到 FIFO 中。其中 LVDS 信号接收模块、串并转换模块为二级流水线并行工作，减少处理时间，节省 FPGA 中数据的缓存。

本文通过 SPI 将高光谱传感器像素采集深度设置为 10 bit，串并转换模块首先需要将串行数据转换为 10 bit 的并行数据。高光谱传感器总共有 17 路输出，其中 16 路为数据通道，1 路为控制通道，这 17 路数据是同时输出，如果能正确采集控制通道的数据，则其余 16 路数据通道也能正确采集。

当高光谱传感器处于空闲状态时，控制通道输出固定数据 0X55，串并转换模块在高光谱传感器处于空闲状态时就开始接收串行数据，用 10 位宽的寄存器接收串行数据，每接收 10 bit 数判断当前接收的数据是否为 0X55，如不是，则跳过一个数据再接收 10 个串行数据，再次判断当前接收数据是否为 0X55，这样一直重复直至接收到 0X55，寄存器不再跳过数据开始连续接收，其余 16 路开始串并转换的位置与控制通道相同，这样每次串并转换后的 10 bit 数据正好是一个完整的像素值。串并转换原理如图 7 所示，红圈为 10 bit 寄存器，每次左移一次，直到寄存器值为 0X55。

由于 DMA 传输数据位宽 32 bit，需要将 10 bit 位宽的像素值拼接为 32 bit 位宽的数据缓存到 FIFO 中。10 与 32 的最小公倍数为 160，首先将 16 个 10 bit 数拼接为 160 bit，然后将 160 bit 数切分为 5 个 32 bit 数，原理示意图如图 8 所示。

4. DMA 高速数据存储

FPGA 中构建 DMA，ARM 通过 AXI 总线控制 DMA 的初始化、传输长度、传输宽度等参数的设置。

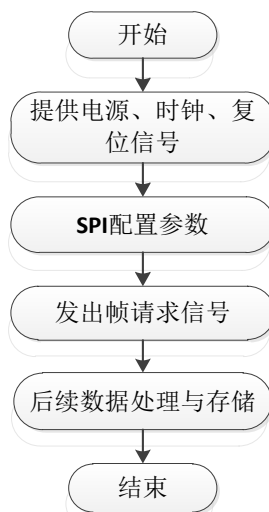


Figure 6. Hyperspectral data acquisition process
图 6. 高光谱数据采集流程

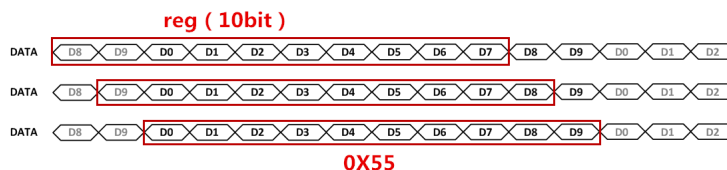


Figure 7. Serial-to-parallel conversion
图 7. 串并转换示意图

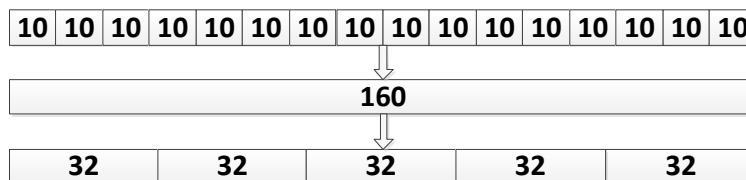


Figure 8. Bit wide conversion
图 8. 位宽转换示意图

Zynq 中有 AXI_HP (AXI High Performance)口，专门的高速数据通道，数据可直接在 FPGA 和 DDR 间传输，AXI_HP 口可支持 1866Mb/s DDR3。

工作流程如图 9 所示。首先 ARM 通过 AXI 向 FPGA 发出复位，复位结束后，ARM 通过调用自己编写的 SPI 函数，将要设置的工作参数配置到高光谱传感器中。初始化 DMA，设置 DMA 的传输长度为一帧高光谱图像数据总长度，设置传输位宽和数据在 DDR 中的保存地址，然后打开 DMA 等待数据。ARM 控制 FPGA 发出帧请求信号，高光谱数据经过接收初步处理后到达缓存 FIFO 中，DMA 将 FIFO 中的数据通过 AXI_HP 口保存到 DDR 中，完成一次传输。因为 FPGA 工作速度远远高于 ARM 的速度，所以要先配置 DMA 等待数据的到来，再发帧请求。如果帧请求先发，有可能高光谱数据到达缓存 FIFO 中时，DMA 还未准备好，导致 FIFO 被数据填满而后续的数据就会丢失。

5. 服务器搭建

为了实现远程实时预览高光谱视频，ARM 系统中必须搭建一个嵌入式网络服务器，这样用户不论在

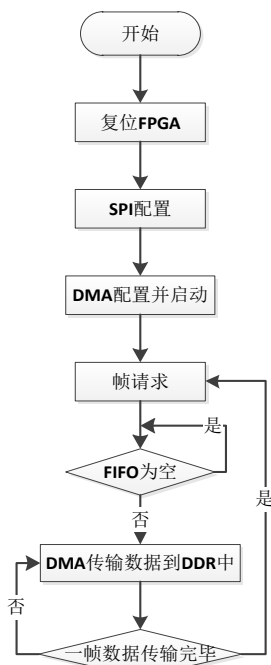


Figure 9. DMA data storage flow chart
图 9. DMA 数据存储流程图

哪里只需要通过浏览器访问该服务器即可实时动态预览高光谱视频。

Boa 服务器具有小巧高效、性能高、源代码开放等优点，嵌入式 WEB 服务器工作流程如图 10 所示，可分为三步。

- 初始化系统资源，此阶段主要包括创建 TCP/IP 套接字、绑定监听端口号、等待用户请求。
- 解析用户请求，判断是否静态请求，倘若是静态请求则返回静态 HTTP 静态文件。否则执行对应的 CGI 程序，启动相对应的应用程序、驱动程序和硬件设备，最后将处理结果以 HTTP 协议报文格式发送给用户。
- 关闭进程、断开连接以及释放所用的资源。

HTML 交互界面设计如图 11 所示，左侧按钮控制光谱仪工作状态、工作参数、预览光谱视频通道的选择等。当需要全通道光谱图像时点击右侧第二个按钮即可采集全部通道的光谱图像。因为高光谱视频数据量大，当把所有通道的高光谱图像同时远程传输时，因为网络的原因可能导致卡顿等现象，为了优化系统的流畅性，当用户实时预览高光谱图像时，只显示某一通道波段的光谱图像，用户可选择 25 个通道中的任意一个进行观察，可随时切换通道，服务器中设置每隔 20 ms 发送一张光谱图像，即帧率为 50 FPS，看起来非常流畅。当需要全部通道光谱图像时，点击右侧按钮可捕获一张全通道光谱图像并显示在浏览器中。

6. 测试与分析

光谱仪放置于某个实验室，通过其它实验室电脑上的浏览器进行测试。调整好光圈和焦距，打开浏览器输入网址，单个通道光谱图像显示在界面中，随时可通过网页参数设置来选择某个通道的光谱图像，因为服务器中帧率设置为 50 FPS，所以观察到光谱视频无任何卡顿现象非常流畅。图 12 为单通道光谱图像，图中物体为储物盒和魔方。

当点击右侧第二个按钮时，可以看到界面中显示了 25 个波段的光谱图像，如图 13 所示，其中每幅

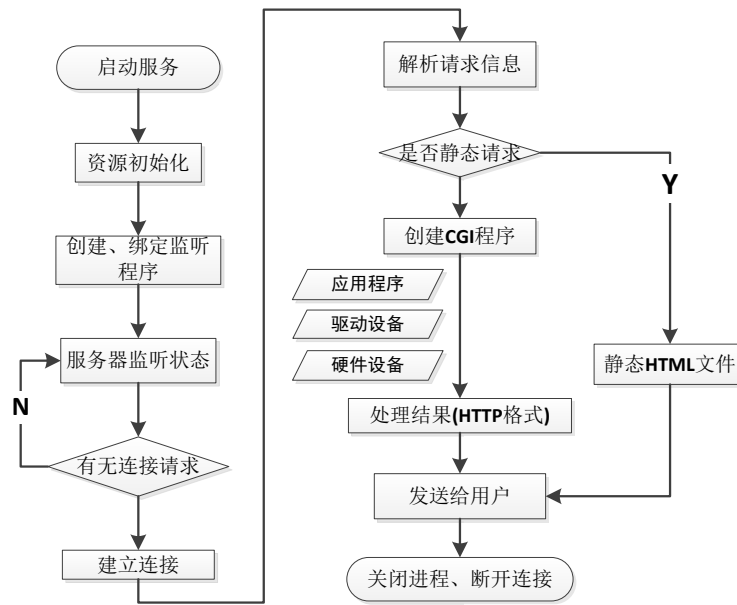


Figure 10. Server workflow diagram
图 10. 服务器工作流程示意图



Figure 11. HTML user-interface
图 11. HTML 交互界面

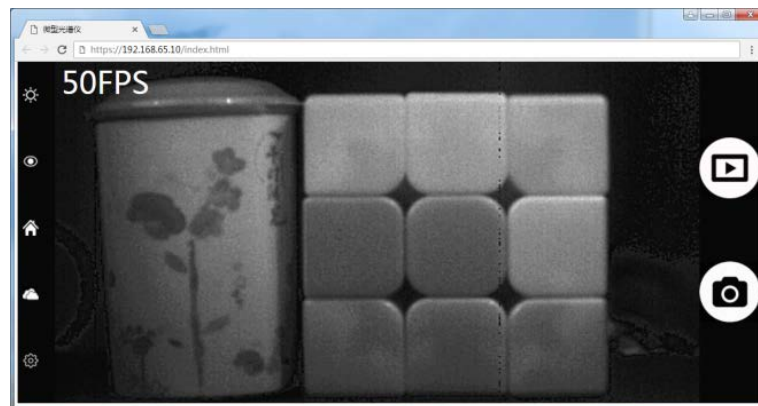


Figure 12. Single band spectral image
图 12. 单波段光谱图像

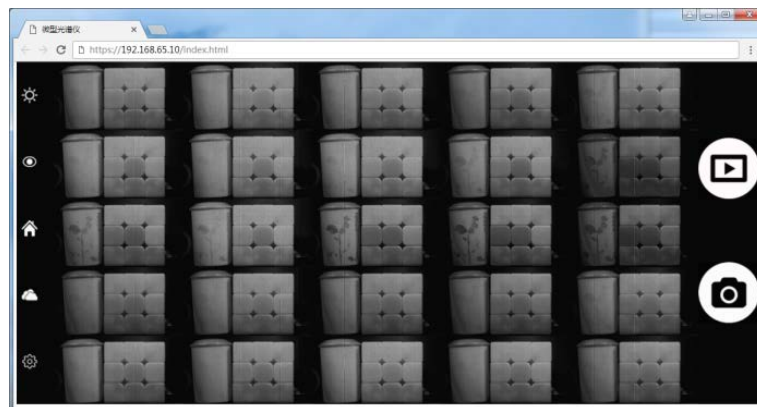


Figure 13. 25-channel spectral image
图 13. 25 通道光谱图像

图像都是某个特定波段的下的光谱图像，可以观察到 25 幅图像都略有差别各不相同。

本文的高光谱视频帧率为 50 FPS，高光谱芯片空间分辨率为 5.5 μm ，光谱分辨率为 10 nm，综合可知高光谱视频的时间分辨率为 20 ms，空间分辨率为 27.5 μm ，光谱分辨率为 10 nm。

7. 结论

本文通过 Zynq 驱动高光谱传感器采集光谱图像数据，Zynq 对采集到的数据进行初步转换处理，保存到 DDR3 SDRAM 中，当用户访问光谱仪内网络服务器时，服务器将数据由 DDR3 SDRAM 通过网络传输到浏览器中显示出来，形成高光谱视频。本系统解决了通常高光谱采集系统不便携的问题，外形尺寸仅为 11 \times 6 \times 7 cm。借助 Zynq 的强大处理性能，实现了高光谱图像数据的本地采集、处理和传输。本文解决了远程光谱视频实时动态预览的问题，连接上 WIFI 便可实时回传高光谱动态图像。摆脱了工作环境的束缚，使本系统适用范围更加广泛，促进了高光谱微型光谱仪走出实验室，实现民用化，具有重要的潜在使用价值。

基金项目

深圳市基础研究项目(JCYJ20150324141711612, JCYJ20150930104948169, JCYJ20170302142617703); 国家自然科学基金项目(61227802, 61605119); 深圳技术大学科研启动项目(201702)。

参考文献

- [1] Zhang, C., Liu, F., Kong, W., *et al.* (2015) Application of Visible and Near-Infrared Hyperspectral Imaging to Determine Soluble Protein Content in Oilseed Rape Leaves. *Sensors*, **15**, 16576-16588. <https://doi.org/10.3390/s150716576>
- [2] Luo, R., Liao, W., Philips, W., *et al.* (2015) An Improved Semi-Supervised Local Discriminant Analysis for Feature Extraction of Hyperspectral Image. *Urban Remote Sensing Event*, Lausanne, 30 March-1 April 2015, 1-4.
- [3] 杨宜菩, 杨帆, 潘国峰, 等. 基于同态系统滤波的高分辨率遥感图像河流信息提取[J]. 计算机应用, 2016, 36(1): 248-253.
- [4] 张翠芬, 余健, 郝利娜, 等. 多尺度纹理及多光谱影像协同的遥感岩性识别方法[J]. 地质科技情报, 2017(4): 236-243.
- [5] 刘永霞, 吴斌, 王安邦, 王丽霞, 何应对, 鞠俊杰, 王必尊, 李川. 基于光谱分析的莲雾叶片全氮含量模型的研究[J]. 自然科学, 2017, 5(3): 286-292.
- [6] Hamzeh, S., Naseri, A.A., *et al.* (2013) Estimating Salinity Stress in Sugarcane Fields with Spaceborne; Hyperspectral Vegetation Indices. *International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation*, **21**, 282-290.

<https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.002>

- [7] Rady, A., Guyer, D. and Lu, R. (2015) Evaluation of Sugar Content of Potatoes Using Hyperspectral Imaging. *Food & Bioprocess Technology*, **8**, 995-1010. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1461-0>
- [8] 董太良, 熊显名, 聂影影, 等. 近红外波段病变皮肤的微型检测系统[J]. 桂林电子科技大学学报, 2017(5): 387-390.
- [9] Geelen, B., Tack, N. and Lambrechts, A. (2014) A Compact Snapshot Multispectral Imager with a Monolithically Integrated Per-Pixel Filter Mosaic. *Proceedings of Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VII*, **8974**, 661-674.
- [10] Rock, W., Bonn, M. and Parekh, S.H. (2013) Near Shot-Noise Limited Hyperspectral Stimulated Raman Scattering Spectroscopy Using Low Energy Lasers and a Fast CMOS Array. *Optics Express*, **21**, 15113-15120. <https://doi.org/10.1364/OE.21.015113>
- [11] Gonzalez, P., Tack, K. and Masschelein, B. (2016) A Novel CMOS-Compatible, Monolithically Integrated Line-Scan Hyperspectral Imager Covering the VIS-NIR Range. *SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging*, **9855**, 1-9.
- [12] 马晨光, 曹汛, 季向阳, 等. 高分辨率光谱视频采集研究[J]. 电子学报, 2015, 43(4): 783-790.
- [13] 王博, 高玉斌, 鲁旭涛. 基于光谱探测与图像识别的反伪装目标系统研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015(5): 1440-1444.
- [14] 刘兵, 刘英, 李灿, 等. 轻小型可见/近红外实时成像光谱仪的光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 36(6): 321-328.
- [15] 何宾. Xilinx All Programmable Zynq-7000 SoC 设计指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-6980, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: iae@hanspub.org