

文章编号 1004-924X(2006)06-0944-05

# 基于 DSP 和 FPGA 的多路型光纤光谱仪系统

姜培培<sup>1,2</sup>, 裘燕青<sup>3</sup>, 傅志辉<sup>3</sup>, 杨丁中<sup>3</sup>, 沈永行<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2. 浙江大学 光电信息工程学系, 浙江 杭州 310027; 3. 浙江大学 物理系, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**描述了一种能同时快速地测量多达八组的光谱信号并具有实时光谱处理能力的新型多路型光纤光谱仪系统。该多路型光纤光谱仪以多个 CCD 作为光电探测器,以 FPGA 作为控制核心产生各种控制时序,利用 DSP 进行光谱数据处理并实现与 PC 机的 USB 通信。概述了整个系统的构成,给出了光谱采集的光学平台设计,研究了在 DSP 和 FPGA 控制下光谱数据的采集和处理过程。为了避免测量时各个通道光谱数据的相互串扰并控制光谱峰值的随机漂移,除采用传统的滤波电路和电源稳压技术之外,提出了利用 FPGA 内部编程的方法来解决 IC 芯片内部电容效应的新技术。光谱测试结果表明,该系统具有良好的长期稳定性、较大的信号动态范围和较高的信噪比,适合于各种场合的光谱及相关参数测量。

**关键词:**光纤光谱仪;多通道;实时光谱测量

**中图分类号:**TH744.1 **文献标识码:**A

## DSP and FPGA -based multi-channel fiber-optic spectrometer

JIANG Pei-pei<sup>1,2</sup>, QIU Yan-qing<sup>3</sup>, FU Zhi-hui<sup>3</sup>, YANG Ding-zhong<sup>3</sup>, SHEN Yong-hang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** By using eight linear array CCDs as the photo detector, a new type of multi-channel fiber-optic spectrometer was presented to measuring eight channel spectra simultaneously and swiftly. In the system, a FPGA was acted as the controlling unit to generate time sequence and the spectral data were processed by the DSP, it communicated with the PC by its inner USB module. This paper introduces the structure of the whole system and the method of the optical system design, also describes the process of spectral data collecting under the control of the DSP and FPGA. A specific FPGA programming technique is brought forward to settle the capacitance effect inside the IC chip to prevent signal interference between two adjacent channels. The results show that the system has a good long-term stability, a large signal dynamic range and a higher SNR. The spectrometer can be used to measure spectrum or related parameters in various situations.

**收稿日期:**2006-04-22; **修订日期:**2006-10-18.

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 10377016)和杭州市产学研科技计划资助项目

**Key words:** fiber-optic spectrometer; multi-channel; real-time spectral measurement

## 1 引言

一个世纪以来,光谱分析技术已变得多样化,除了发射、吸收、反射、荧光、散射光谱方法外,还发展出了微分光谱、调制光谱、傅里叶变换、干涉分光仪等。随着光谱仪器硬件的发展,可测量的波长范围也相应扩展,长波到毫米波,短波与软 X 射线(10 nm)相连<sup>[1]</sup>。上世纪 90 年代以来,一种微型结构的光纤光谱仪<sup>[2]</sup>引起了诸多人士的关注,并在各种光谱测量及相关领域得到了广泛应用。与传统的大型光谱仪相比,微型光纤光谱仪有很多优点,如重量轻、体积小、探测速度快、可集成化等。目前,微型光谱仪的实现可以有多种技术,常用的方法包括:采用新型滤光技术,如可调谐光纤法-珀腔(F-P);利用光纤的化学传感特性制作光纤探针;使用微细加工结合集成光学介质光波导技术;等等,其中光纤光谱仪是微型光谱仪器的重要发展方向。

低损耗石英光纤的研制和光纤技术的引入,改变了传统光谱仪的采光技术,使光谱探测脱离了样品池。利用光纤探头,可以方便地将远距离现场样品的光谱信号导入光谱仪器,通过将光纤探头与光学平台、数据采集、计算机等部件相结合,能够形成结构较为紧凑的新型光谱仪器。90 年代以来,微电子领域中的多像元光学探测器发展迅猛,如 CCD 阵列、光电二极管阵列等,使生产低成本扫描仪和 CCD 相机成为可能。使用 CCD 作为光谱接收器件,可以进行瞬态和弱光光谱的采集,而且不必转动光色散元件,使仪器更加经久耐用。

光纤光谱仪系统具有模块化和灵活性的特点。其中单通道微型光纤光谱仪测量速度非常快,可用于在线分析。根据使用对象的不同,通过采用不同的光纤探头改变光谱测量方式,可实现一机多用。而且由于它选用了低成本的通用探测器,使得光谱仪的成本也大大降低,进一步扩展了它的应用领域<sup>[3]</sup>。现今的光谱仪主要测量紫外、可见、近红外、红外波段的光谱强度,应用领域主要有颜色测量、化学成份的浓度测量、电磁辐射光谱分析、吸收和发射光谱测量、物质成分测量等。

目前国外单通道光纤光谱仪的发展非常快,美国 Ocean Optics 公司和荷兰 Avantes 公司已经推出多种型号的产品。

在光谱探测的应用研究中,特别是在生物医疗方面,经常需要对多组光谱同时进行测量,以比较相互之间的瞬态光谱变化特性。如果使用多台光谱仪同时工作,不仅给操作带来困难,而且会提高测量系统成本。本文研究的多通道光纤光谱仪,采用了多路光谱分光系统结合单一电子信号处理模块技术,既具有单通道光谱仪结构紧凑的优点,又能实现各路光谱信号之间的实时、同步采样处理,具有明显的技术优势,可望在实际生产领域获得各种应用。

## 2 系统设计与分析

多路光纤光谱仪系统主要由以下各部分组成:导光光纤、光学平台、CCD 探测器、数据采集和控制电路、计算机等,系统框图如图 1。其基本工作原理为:利用光纤将信号光导入,通过光学平台分光后聚焦于 CCD 探测器的感光面上;CCD 将光谱信号转换为电信号输出,通过滤波放大、A/D 转换及采集存储,输入计算机中显示光谱图形;所获得的光谱数据可用于各种后续的分析、处理和

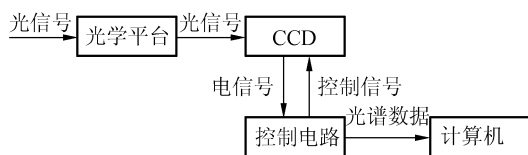


图 1 多路光纤光谱仪系统结构框图

Fig. 1 Structure of multi-channel fiber spectrometer

### 2.1 光学平台

系统每一个通道都采用对称式 Czerny-Turner 光学平台设计(如图 2 所示),八路光纤同时采光入射到八个狭缝处,这种结构比较容易通过内部集成光阑来抑制杂散光,并使结构比较紧凑<sup>[4]</sup>。图中, $S_1$  为入射狭缝, $G$  为闪耀光栅, $M_1$ 、 $M_2$  为凹面反射镜。光源发出的光经过光纤直接照射光谱仪的入射狭缝  $S_1$ , 经过  $M_1$  准直后由闪耀光栅  $G$  分光,并最终由  $M_2$  成像于 CCD 的感光

面上。两个凹面反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  的使用既可以避免额外的吸收和散射,又可以缩短装置的长度。采用 CCD 作为探测器,可以通过一次曝光获得光谱图,具有测量的实时性。

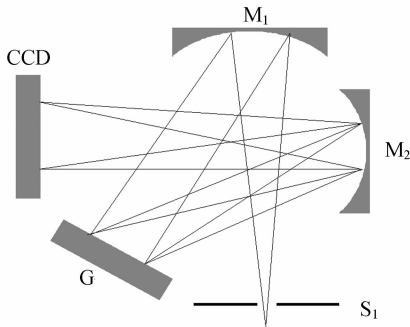


图 2 小型折叠 Czerny-Turner 结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mini-folded Czerny-Turner structure

入射狭缝  $S_1$  的宽度按系统需要进行选择,狭缝越细,得到的光谱分辨率就越高,但光灵敏度相对降低。闪耀光栅 G 实现色散分光,可以根据需要选择合适的闪耀波长和光栅密度。通过调节光栅 G 选择一级衍射光谱成像于 CCD 的感光区域,同时利用适当的结构可以将其他不需要的各级光谱挡掉,通过  $M_2$  的调节可以使光谱很好地成像于 CCD 的光敏面上。

## 2.2 线阵 CCD

本系统采用日本 SONY 公司生产的 ILX511 线阵 CCD 传感器,其像元个数为 2 048,像元尺寸为  $14 \mu\text{m} \times 56 \mu\text{m}$ ,作为光积分形式的传感器,主要通过 ROG 和 CLK 两个脉冲时序信号来控制 CCD 的曝光时间和模拟信号的输出。CCD 内部有 2 048 个光学传感器,对应 2 048 组暂存器。在 2 048 组之前有 32 组无效单元(包括 18 个哑元),之后有 6 组无效单元,一共 2 086 组暂存器,成为一串移位暂存器。在 ORG 低电平的时候,将 CCD 传感器所积分获得的光学信号转换成电荷信号存入对应的移位暂存器。当 ORG 为高时,内部计数器归零,此时 CLK 时序触发移位暂存器。经 2 086 个周期后,可以将所有信号串行移位至  $V_{\text{OUT}}$ 。

## 2.3 数据采集和控制电路

多路型光纤光谱仪系统的数据采集和控制电路结构框图如图 3(以八通道为例),由 CCD 器件

采集的八路光谱信号分别通过滤波放大电路,经由八选一模拟开关合并成一路信号,经由 FPGA 的 FIFO 输入 DSP 中,最后通过 DSP 的 USB 接口传给计算机。光谱数据的稳定取决于 CCD 供电电压的稳定和滤波放大电路参数的合理选择。设计过程中,采用了精密稳压芯片 REF194ES 和高性能集成运放 AD8027。

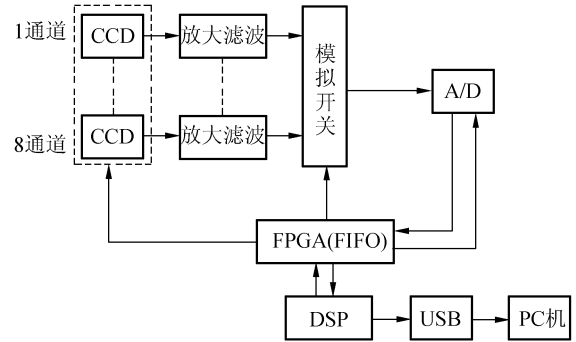


图 3 多路型光纤光谱仪系统电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of system circuit

整个系统的时序都由 FPGA 产生,在设计中选中了 XILINX 公司的 Spartan-II 系列的 XC2S15 芯片<sup>[5]</sup>。驱动时序分为四个功能模块:GCLK 模块、CCD 模块、MYFIFO 模块、ROGCTL 模块,每个模块都由 Verilog 硬件描述语言编写。GCLK 模块产生系统所需的所有基频时钟;CCD 模块产生 CCD 的移位时钟(CLK)、FIFO 写时钟(FIFO\_WR)、A/D 转换时钟(AD\_CLK)以及模拟开关的控制时钟(CH\_OE);MYFIFO 模块将 A/D 送入的数据传送给 DSP;ROGCTL 模块根据 DSP 发送的积分时间产生 CCD 的 ROG 脉冲<sup>[6]</sup>。

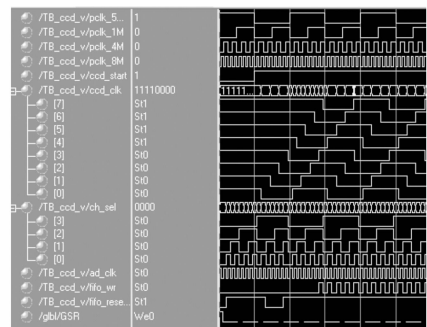
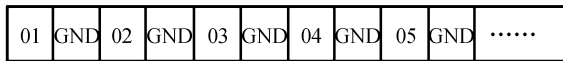


图 4 FPGA 控制单元的仿真时序

Fig. 4 Simulated time sequence of FPGA

根据所选 CCD 的要求,ORG 的低电平脉冲宽度为  $8 \mu\text{s}$  脉宽。为了方便信号的采集处理,各个通道间信号的同步非常重要,本文设计是使每个通道 CCD 的曝光时间在同一时刻结束。

由于各通道信号在模拟开关和 A/D 转换器上形成了通道的共用,为了减少通道之间的相互串扰,特别设计了在每两路信号之间插入地,以隔绝模拟开关带来的电容效应。同时编程使得 CLK 信号相互错开  $1/16 \text{ MHz}$ ,这样每个通道的每个像元信号依次经过滤波放大,送进模拟开关。模拟开关的三个控制时序脉冲,可以使得第一通道第一像元信号到达时,选择一通道打开。依次打开十六个通道开关,进入 A/D 的信号如图 5 一样排列。



01 指 1 通道第一个像元,依此类推

图 5 信号顺序图

Fig. 5 Sequence of signal into A/D

系统电路中,设计使 A/D 的片选脚始终接地,且从开始就送 A/D 的时钟信号,使 A/D 一直工作。通过控制往 FIFO 写数据的 FIFO\_WR 信号与时钟信号的同步,可以将 A/D 转换过来的光谱数据写进 FIFO,而将作为屏蔽信号的地信号抛弃。

本系统选用了美国 TI 公司的 TMS320VC5509 芯片作为 DSP 处理器件,其主要功能如图 3 所示,包括存储 FPGA 的应用程序,在上电之后通过 GPIO 口将程序灌进 FPGA 运行;光谱信号的滤波与运算处理;通过 USB 协议与计算机相互通信,从计算机接受指令,将光谱数据送入计算机<sup>[7]</sup>。

TMS320VC5509 有三个多通道缓存串口 (MCBSP),0 号口外挂 FLASH 作为程序存储器,1 号口接 FPGA 传输积分时间。外部存储器接口 (EMIF),CE<sub>1</sub> 空间接 FPGA 的 FIFO 空间,配置为异步存储器;CE<sub>2</sub> 空间接 SDRAM,作为数据存储器,配置为同步存储器。USB 模块与计算机相连,配置为 USB2.0 协议。DSP 程序主要用 C 语言进行编程。

### 3 系统测试实验结果

采用所研制的多路光纤光谱仪系统测试了不同光源的光谱,获得了非常满意的测试结果。

图 6 为多路光纤光谱仪第一通道测试的汞灯的光谱,图 7 为第二通道测定的宽带白炽灯的光谱,可以发现光谱信号稳定,信噪比高,且相邻两个通道之间没有相互串扰。

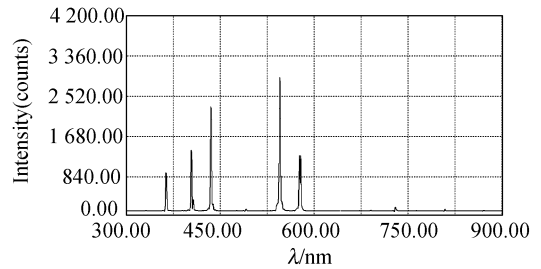


图 6 汞灯光谱图

Fig. 6 Spectrum of mercury lamp

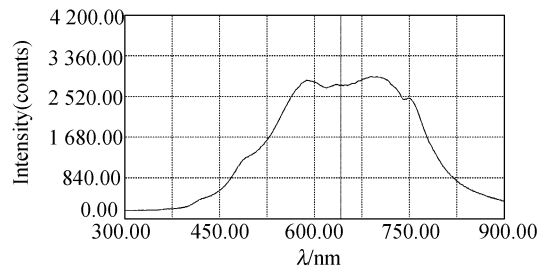


图 7 宽带白光源光谱图

Fig. 7 Spectrum of white light source

### 4 结 论

通过设计一个具有并行 CCD 信号处理能力的 DSP 系统,实现了多路式光纤光谱仪的实时可靠运作。系统通过 FPGA 产生控制时序信号,利用 DSP 处理数据并与 PC 机相互联系,具有速度快、功能强、适合多点同时测量的优点。该系统目前已通过实验室考核并开始商品化,预期该系统能广泛应用于生物、环保、制药、冶金和光学等相关领域。

## 参考文献:

- [1] 张存州,张光寅,李加,等.现场光谱技术和仪器[J].世界仪表与自动化,1998,2(6):16-18.  
ZHANG C ZH, ZHANG G Y, LI J, *et al.* Field spectrum technology and spectrography[J]. *Int. Instrumentation & Automat.*, 1998,2(6):16-18. (in Chinese)
- [2] 鞠挥,吴一辉.微型光谱仪的发展现状[J].光学精密工程,2001,9(4):372-376.  
JU H, WU Y H. The state of the art of mirco spectrometers[J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2001,9(4):372-376. (in Chinese)
- [3] 张志伟.微小型光纤光谱仪[J].现代应用光学,2004,8:14-22.  
ZHANG ZH W. Micro fiber spectrometer[J]. *Mod. Appl. Opt.*, 2004,8:14-22. (in Chinese)
- [4] 周连群,吴一辉,张平,等.一种采用微硅片狭缝的新型微小型光纤光谱仪[J].光学精密工程,2005,13(6):637-642.  
ZHOU L Q, WU Y H, ZHANG P, *et al.* A new mini-fiber-spectrometer adopting micro-silicon-slit[J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2005, 13(6):637-642. (in Chinese)
- [5] 冯勇,牟丹丹,杨旭刚,等.采用FPGA的高速CCD相机的时钟发生器[J].传感器技术,2002,21(10):13-21.  
FENG Y, MOU D D, YANG X G, *et al.* Timing generator of a high speed CCD camera using FPGA[J]. *J. Transducer Technol.*, 2002, 21(10):13-21. (in Chinese)
- [6] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程[M].北京:北京航空航天大学出版社.  
XIA Y W. *Verilog digital system design tutorial*[M]. Beijing: Press of Beijing University of Aeronautics & Astronautics. (in Chinese)
- [7] Texas Instruments Incorporated,彭启琮,武乐琴,张舰,等编译. TMS320VC55X系列DSP的CPU与外设[M].北京:清华大学出版社.  
Texas Instruments Incorporated. *CPU and External Equipments of TMS320VC55X*[M]. Beijing: Press of Tsinghua University. (in Chinese)

作者简介:姜培培(1983—),男,浙江大学光电系博士研究生,主要从事光纤光谱仪方面的研究。E-mail: feiafei@126.com

沈永行(1965—),浙江大学光电系博士生导师。E-mail: physyh@zju.edu.cn