

小型光纤光谱仪的研制

于爱华,高鸿亮

(浙江科技学院 自动化与电气工程学院,杭州 310023)

摘要: 通过 ZEMAX 光路优化设计,采用 CPLD 和 USB 接口技术以实现 CCD 高速驱动和数据传输。该系统使用光纤束进行导光、平面衍射光栅对采集到的光分光后,由线阵 CCD 进行光电转换;并利用相关双采样技术,获得相应光强分布数据,再利用最小二乘法对光谱仪进行标定。研究结果表明该光谱仪波长准确度优于 1 nm,波长重复误差小于 0.2 nm。

关键词: 小型光纤光谱仪;光学设计;电学设计;相关双采样;标定;数据分析

中图分类号: TH 744.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2012)06-0439-05

Design of miniature fiber optic spectrometer

YU Ai-hua, GAO Hong-liang

(School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of
Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The methods of implement miniature fiber optic at spectrometer is based on CPLD and USB 2.0 interface to get on high speed CCD driving and transmitting by optical optimization of ZEMAX. After the optical fiber beam bounding the light and the plane diffraction grating for dispersing the light in different wave length, the line array CCD is used for photoelectric conversion. The method of least squares is used for the spectrometer calibration. The research results show that the accuracy of spectrometer wavelength is better than 1nm, and the repeatability error is less than 0.2 nm.

Key words: small-sized fiber optic spectrometer; optical design; eletrical design; CSD; calibration; data analylis

传统光谱仪由于其体积大、价格昂贵,以及对工作环境要求苛刻和难以实现实时监控等缺点,以致限制了其使用范围。小型光纤光谱仪虽然分辨率有所下降,但是由于其体积小、成本低、使用灵活等特点,

收稿日期: 2012-11-19

基金项目: 浙江省科技计划项目(2011C37032)

作者简介: 于爱华(1975—),男,江苏省海安人,工程师,博士研究生,主要从事光电信号处理研究。

却广泛应用于食品检测、半导体、LED 测试、医疗、生物、航天、环境监测等众多科研和生产领域。目前微小光谱仪的实现可以应用多种技术,如细微加工、应用二元光学、集成光学波导等制造技术。其工作模式主要有利用新型滤光技术、调制技术、二元光学、集成光学波导、光栅技术等。从目前发展现状来看,国外已有部分小型光纤光谱仪的产品,但价格昂贵;国内各类小型光纤光谱仪性能较低,还处于研制阶段。由于制作工艺因素及光纤传导技术的发展,实用化的小型光纤光谱仪大都是无透镜系统并且和光纤探头联合使用,可以很方便地搭建起由光源、采样附件和光纤光谱仪组成的模块化测量系统。因此,对采用光纤传导信号光的小型光纤光谱仪的研制,可以拓展光谱仪的应用范围,使之能更灵活方便地在不同的环境下使用,提高其实时监控能力,有广泛的市场潜力和科学意义^[1]。

1 小型光纤光谱仪的光学设计

1.1 测量原理

光纤光谱仪是测量紫外、可见、近红外和红外波段光强度的一种设备。光谱仪器一般都包括入射狭缝、准直镜、色散元件(光栅或棱镜)、聚焦光学系统和探测器。其中色散元件一般是衍射光栅,它是平行、等宽而又等间距的多缝装置,是利用光的衍射和干涉现象进行分光的一种色散元件。衍射光栅有透射式和反射式两种,光谱仪常用的是反射光栅、凹面光栅和阶梯光栅。采用平面光栅制作小型光谱仪器时主要有:切尼-黏纳(Czerny-Turner)、艾伯特-法斯特(Ebert-Fastie)、李特洛(Littrow)自准直、夏帕-格兰茨(Chupp-Gtantz)系统四种形式^[2]。本系统采用如图 1 所示的非对称交叉式切尔尼-特纳结构。光源出射的光进入光纤,经过准直,光栅反射聚到线阵 CCD 上,线阵 CCD 将光信号变为电信号并传输到计算机中。这样可以对整个光谱进行快速扫描而不必移动光栅,同时由于光纤的耦合非常容易,可以很方便地搭建起由光源、采样附件和光纤光谱仪组成的模块化测量系统。

1.2 光学设计

本系统采用非对称交叉式切尔尼-特纳结构^[3],光通过耦合透镜进入光纤中,出射端连接到 SMA 接头上,在 SMA 接头的出射端留一个宽度可调的狭缝(根据分辨率调节)。光束经过狭缝后照射到准直反射镜,变成平行光照在光栅上。光栅将不同频率的光衍射出来经过搜集镜投射到 CCD 不同位置。

采用两块小凹面反射镜分别作为准直和聚焦。两块反射镜的曲率中心重合中间分开,这样,可以通过合理设计两块反射镜面大小避免二次和多次衍射。 S_1 为入射缝, S_2 为出射缝,即 CCD 位置。 M_1 、 M_2 是凹面球镜,焦距分别为 f_1 、 f_2 , C 为其曲率中心, G 为光栅,光纤光谱仪的结构如图 2 所示。通过 ZEMAX 优化设计得到如下参数:光谱范围 300~780 nm,中心波长 540 nm,光栅刻槽密度 600 g/mm,长度 $w=3$ cm,闪耀波长 450 nm。凹面球镜焦距 $f=f_1=f_2=60$ mm,凹面球镜曲率半径 120 mm。相对孔径 $NA=1/10$ 。准直球镜口径 6 mm,入射缝宽度 50 μm ,光纤芯径 200 μm ,参数 $x=51$ mm、 $H_1=12$ mm、 $H_2=17$ mm,具体值在系统调试中调整。

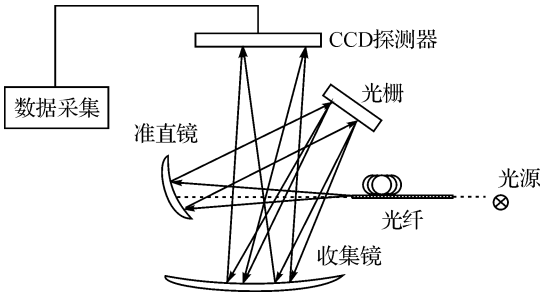


图 1 光纤光谱仪原理图

Fig. 1 Principle diagram of fiber optic spectrometer

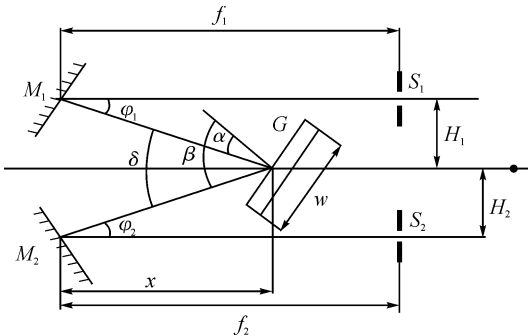


图 2 光纤光谱仪的结构参数

Fig. 2 Structure parameters of fiber optic spectrometer

2 小型光纤光谱仪的电学设计

2.1 电路系统结构

为了使 CCD 探测系统能检测到较高的分辨率,选择 2 048 个像素的 TCD1209D 作为探测器件。CPLD 产生驱动脉冲驱动 CCD 输出像元信号,为消除其中直流分量,提高其输出阻抗,CCD 输出信号经过差分放大,然后采用 CCD 专用 16 位 A/D 转换信号处理器 AD9826 对 CCD 输出信号进行相关及模数转换处理。转换后的数字信号储存在 CY68013 的 FIFO 中,经处理后通过 USB 总线传送到上位机,由应用软件完成光谱数据进一步的分析、处理和显示。电路系统如图 3 所示。

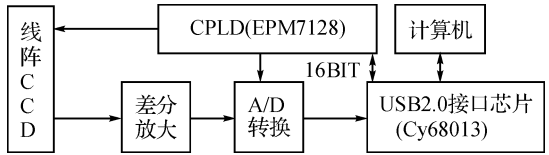


图 3 光纤光谱仪电路系统

Fig. 3 Circuit system of fiber optic spectrometer

2.2 CPLD 驱动设计

CCD 驱动方式很多,可以是专用芯片、单片机^[4]或可编程器件等。系统采用 Altera 公司 MAX7000 系列的芯片 EPM7128,不但可以为 CCD 提供驱动,也可以为光谱信号的采集提供时钟及其他电路的脉冲。CCD 采用日本东芝的 TCD1209D,光谱响应范围为(300~1 000 nm)2 048 个像元,像元大小是 14 $\mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$;相邻像元中心距也是 14 μm ;像元总长是 28.672 mm,其暗电流输出电压 1 mV。TCD1209D 共有 5 个相位不同的驱动脉冲,分别为 SH、F1B、F2B、RS 和 CP,如图 4 所示。其中 SH 为光电荷转移脉冲;F1B、F2B 是两个相互反相的模拟移位寄存器转移脉冲,RS 为输出极复位脉冲;CP 为箝位脉冲。CCD 在 5 个驱动脉冲共同作用下输出视频信号 OS。根据 CCD 驱动时序要求,本系统采用 80MHz 晶振,4 分频后得到 20MHz。这样可以以 1/4 的 CLK(主时钟周期)精确地调节时序的延时。

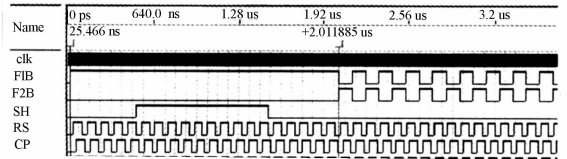


图 4 TCD1209D 驱动时序仿真结果

Fig. 4 Simulation results of TCD1209D drive timing

2.3 信号采集

CCD 信号输出视频信号除有用信号外,还有许多噪声信号,如光子噪声、暗电流噪声、散粒噪声、复位噪声等。其中复位噪声影响较大,通过相关采样技术可以有效消除复位噪声。由于 CCD 输出信号中有一个直流分量,很容易引起放大器饱和和共模效应,必须经过一级差分放大。接着进行相关双采样(CDS),然后进行箝位和增益放大,最后送入 ADC 进行数字量化。采用 CCD 专用 16 位 A/D 转换信号处理器 AD9826,如图 5 所示。CDSCLK1 和 CDSCLK2 分别用来对参考电平和数据电平进行采样,ADCCLK 为 ADC 的采样时钟,SLOAD 是移位寄存器使能端,SDATA 向移位寄存器写数据,SCLK 为写数据的时钟。CDSCLK1、CDSCLK2、ADCCLK 均由 CPLD 实现驱动时序。要使 AD9826 正常工作,还得为其提供初始化设置。初始化设置通过单片机配置 SLOAD、SDATA、SCLK 三线串行接口来实现。

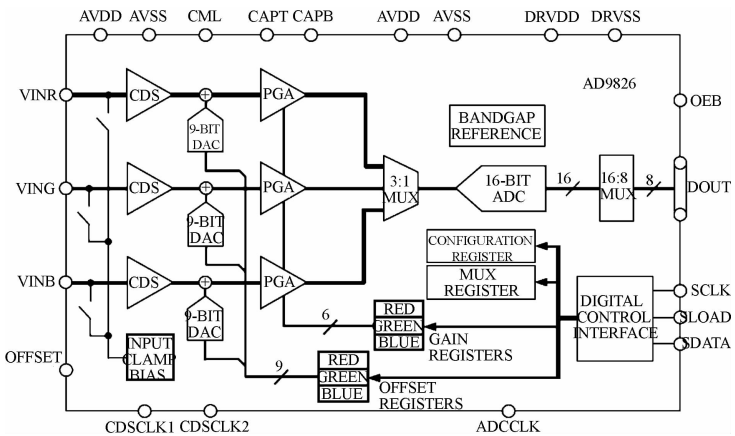


图 5 AD9826 功能框图

Fig. 5 Function block diagram of AD9826

3 光纤光谱仪的固件设计

USB 设备的工作流程^[5]如图 6 所示:设备连接→上电→复位→分配地址→配置操作→执行固件代码,6 个工作状态。这些状态在 USB 主机的控制下实现状态间的转换和总线的访问。USB 设备随时根据总线活

动情况判断是否进入或退出挂起状态。为了简化固件开发,利用 EZ-USB FX2 软件开发包里提供的固件架构来修改 USB 描述符表(dscr. a51)及实现外围功能的程序代码(periph. c),完成了 USB 设备的固件开发。

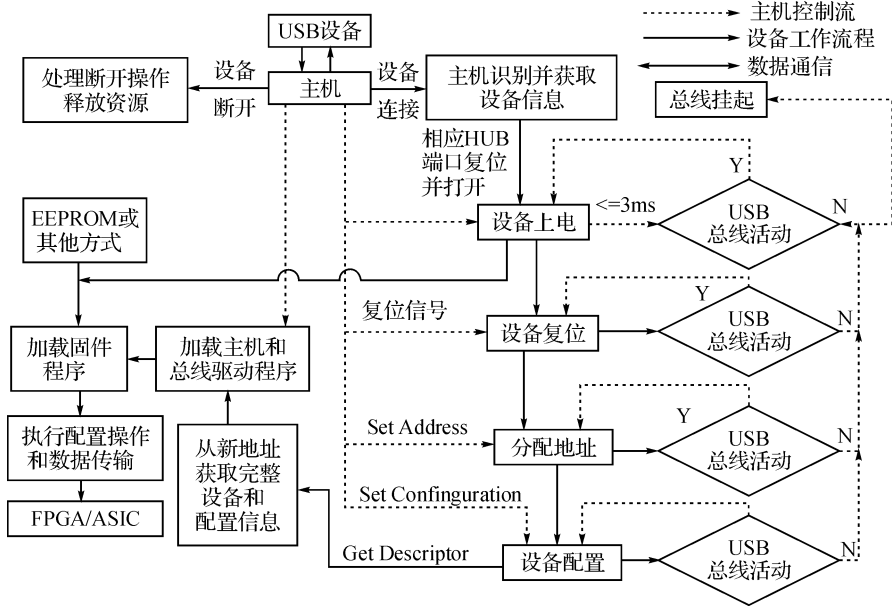


图 6 USB 工作流程图

Fig. 6 USB work flow

3.1 系统初始化

固件程序首先初始化所有的内部状态变量,然后调用 TD_Init 函数进行初始化,初始化主要包括:

- 1) 使 CY7C68013 工作于异步从 FIFO 模式
IFCONFIG=0xCB;
- 2) 将 4 KB 的 FIFO 对应到两个端点(EndPoint),即 EndPoint2 和 EndPoint6 分别配置为 OUT 型和 IN 型

```
EP2OUTCFG=0xA0,  
EP6INCFG=0xE2;  
3) 对 FIFO 进行配置将 FIFO2,FIFO6 设置成自动方式  
EP2FIFOCFG=0x1,  
EP6FIFOCFG=0x0D.
```

3.2 任务调度

初始化完成后打开中断,固件程序开始枚举 USB 设备,直至端点 0 上接收到通信建立包。一旦收到此包,将重复执行下面任务。

- 1) 调用 TD_Poll()函数,以完成其他任务。
- 2) 判断是否有 USB 设备请求,如果有,则调用 Parse Control Transfer()函数进行相应的处理,如图 7 所示,主要是 USB 设备与主机之间通信处理。当主机发送传输一帧数据请求时,USB 响应查看 EP2 端点,此时 CPLD 没有向端点 FIFO 写数据为空,引发中断 IBN(INBULK NAK),在中断响应中将 PA7 置高,通知 CPLD 采样数据,一帧数据传完后,引发外部中断,PA7 置低,初始化缓冲区。如果没有,则继续向下执行。

3) 检测 USB 总线是否空闲。若空闲,则调用 TD_Suspend()函数,由用户处理。在 TD_Suspend 返回真值后,8051 处于空闲状态。

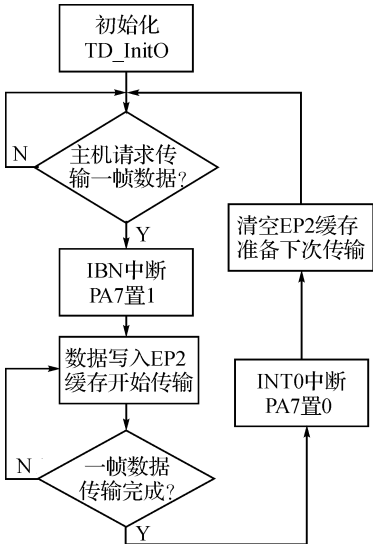


图 7 EZ-USB 固件流程图

Fig. 7 EZ-USB firmware program flow

4) 8051 被激活后,固件程序将首先调用 TD_Resume()函数,以使 8051 从空闲状态中恢复出来,再执行用户任务。

4 实验与分析

4.1 光纤光谱仪的标定

小型光纤光谱仪的标定在暗室中进行,当光谱均匀分布时,光谱波长和 CCD 像素位置有如下关系^[6]:

$$\lambda(P)=C_0+C_1P+C_2P^2+C_3P^3$$

其中, P 为归一化像素, P =像素位置/总像素(TCD1209D 总像素 2 048)。

利用美国海洋光学 USB2000 微型光纤光谱仪对低压汞灯光谱进行测量。该光谱仪的测量波长范围 200~850 nm,测得低压汞灯 5 条一级谱线波长位置,以及本系统中对应像素位置,如表 1 所示。

CCD 采用最小二乘法^[7],利用 matlab 软件计算可得:
 $\lambda(P)=260.816\ 5+732.728\ 0P+392.348\ 5P^2-689.307\ 8P^3$ 经过标定后的低压汞灯光谱如图 8 所示。

4.2 数据分析

经过标定后,对低压汞灯光谱进行 10 次测量,其数据最大偏差为 0.18 nm。将实际波长作平均处理与理论波长和进行对比,对比结果如表 2 所示,理论波长和实际波长最大偏差为 0.82 nm。

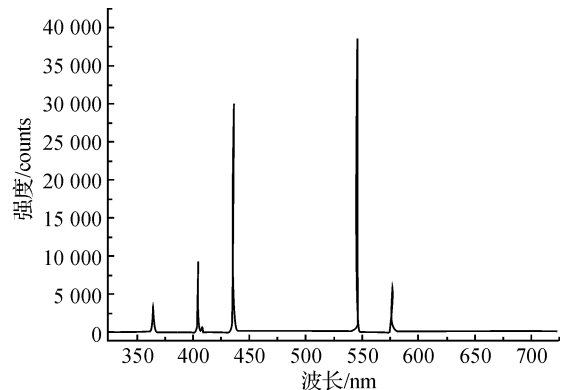


图 8 波长标定后的低压汞灯光谱图

Fig. 8 Spectrogram of low pressure mercury lamp after wavelength calibration

表 1 低压汞灯与对应像素位置

Table 1 Low pressure mercury lamp with corresponding pixel

波峰位置	波长位置/nm	位置(像素)
1	365.15	276
2	404.70	377
3	435.80	456
4	546.10	745
5	579.10	838

表 2 最小二乘法拟合结果和实际测量结果比较

Table 2 Comparison of fitting results by method of least squares and results of measurement

实际波长/nm	理论波长	波长误差	最大偏差
365.15	365.97	-0.82	0.14
404.70	404.68	0.02	0.14
435.80	435.07	0.77	0.15
546.10	545.82	0.28	0.18
579.10	579.36	-0.26	0.18

5 结 语

采用 CPLD 和 USB2.0 技术,实现非对称交叉式切尔尼-特纳结构的光栅型小型光纤光谱仪 CCD 驱动和数据的高速传输,并成功应用于系统测试。利用 ZEMAX 软件,对系统进行光路的优化设计,应用 ADI 公司 CCD 专用处理芯片,实现相关双采样技术,极大提高其信噪比和分辨率。实验结果证明该光谱仪具有较高的测量精度,为其在实际工业中的应用打下基础。

参考文献:

[1] 杨明,孙杰,程海林.线阵 CCD 光谱仪设计与实验[J].天津理工大学学报,2011,27(1):38-42.
[2] 赵才荣,瞿芳,王增林.一种便携式光谱仪的设计[J].仪表技术,2007,32(7):27-29.
[3] 洪新华,姚凯.成像光谱仪的原理与应用[J].河南科技学院学报,2005,33(2):113-111.
[4] 王慧华.一种基于新型单片机的 CCD 驱动电路设计[J].邢台职业技术学院学报,2009,26(1):79-82.
[5] Guo X L, Chu D, Liu P, et al. The design of data acquisition system of the NIRS instrument based on USB [C]// Proceedings of SPIE. Shanghai: SPIE,2009.
[6] 谢印忠,庄松林,张保洲.基于线阵 CCD 的光谱仪定标研究[J].仪器仪表学报,2011,32(3):546-550.
[7] 欧阳慧泉,代彩红,黄勃,等. Czerny-Turnner 型双光栅单色仪的波长驱动与波长校准研究[J].应用光学,2012,33(6):1105-1108.