

基于FPGA外触发同步控制的线阵CCD驱动研究*

朱继伟¹, 杨 晋², 郭雪强¹, 冯树龙², 马婷婷¹, 郭汉洲³, 沈春阳³

(1. 吉林省光栅应用中试中心, 长春 130012; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
3. 长春国科医工科技发展有限公司, 长春 130033)

摘 要: 完成以高速FPGA技术为核心, 实现根据外部需求使用外触发同步控制的线阵CCD采集光谱信号的驱动。通过测试, 设计的CCD驱动采样固定延时时间为2.809 9 μs , 延时精度不大于86.1 ns, 线阵CCD采集到的光谱信号满足光谱分析要求。设计实现外触发方式控制TCD1304采集光信号, 可以为后期工业测试提供应用参考。

关键词: 光电传感器; 外触发同步控制; 硬件逻辑驱动

中图分类号: TN386.5; TP23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2020)04-0265-05

Linear Array CCD Drive Based on FPGA External Trigger Synchronization Control

ZHU Jiwei¹, YANG Ji², GUO Xueqiang¹, FENG Shulong², MA Tingting¹,
GUO Hanzhou³, SHEN Chunyang³

(1. Jilin Grating Application Pilot Center, Changchun 130102, CHN; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN;
3. Changchun Guoke Medical Technology Development Co., Ltd., Changchun 130033, CHN)

Abstract: Based on high-speed FPGA technology, the driving research of collecting spectral signal was realized by using line array CCD controlled by external trigger synchronization according to external demand. According to the test data in this paper, it could be seen that the fixed delay time of the designed circuit board was 2.809 9 μs , and the delay accuracy was no more than 86.1 ns, and the spectral signal collected by the linear array CCD could meet the requirements of spectral analysis. This paper designs and realizes the optical signals collected by the external trigger mode to control the TCD1304, providing application reference for later industrial testing.

Key words: CCD; external trigger synchronization control; FPGA driver

收稿日期: 2020-06-04

* **基金项目:** 国家重大科学仪器设备开发专项项目(2018YFF01011102), 国家自然科学基金资助项目(61805240), 吉林省科技发展计划项目(20180201049SF), 吉林省科技发展计划项目(20180201123GX), 吉林省科技发展计划项目(20180201122GX), 长春市科技计划项目(18DY003)

作者简介: 朱继伟(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事光谱仪电子学设计研究;

杨 晋(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事光谱仪设计研究;(E-mail: yang_jin1988@163.com)

郭雪强(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光谱仪电子学设计研究。

引 言

线阵 CCD (Charge-Coupled Device) 是一种可以把光信号直接转换成电信号的光学传感器,具有视场大、分辨率高、价格低廉的优点,以其为核心的光谱仪已被广泛应用于环境监测、工业控制、材料分析等领域^[1]。沈阳自动化研究所孙兰香研究员使用 CCD 相机实现对低合金钢中的 Fe, Mn, Ni 等元素含量的在线分析^[2]。浙江大学工业控制国家重点实验室相关学者论述了基于紫外-可见光谱的常规水质分析方法研究现状,并探讨了光谱分析在水质多参数在线监测、水质分类、水质报警等方面的应用现状及其发展趋势^[3]。

以上研究成果为工业在线监测、物质分析应用场合提供了很好的依据。目前应用在光谱仪上的 CCD 都是使用的连续光进行软件触发采集,而在工业应用中很多会使用瞬态光谱或瞬态激发光谱进行在线检测^[4-5],因此研制出具有响应速度快、光谱瞬态直读等特点的在线检测光谱仪成为迫切需求。研究主要以高速 FPGA 技术为核心,实现根据外部需求使用外触发精准控制的线阵 CCD 采集光谱信号的驱动。

1 系统方案设计

系统设计以 FPGA (LFE2MS35E) 为核心,首先 FPGA 对外触发信号进行滤波处理,然后根据外触发信号驱动 CCD 进行光电信号转换,再控制 AD9826 对滤波放大后的电信号进行 A/D 转换,最后将采集的数据打包通过 USB 芯片 (CY7C80613 A) 传输给 PC 即上位软件进行数据分析。图 1 为硬件系统框图,图 2 为电路板实物图。

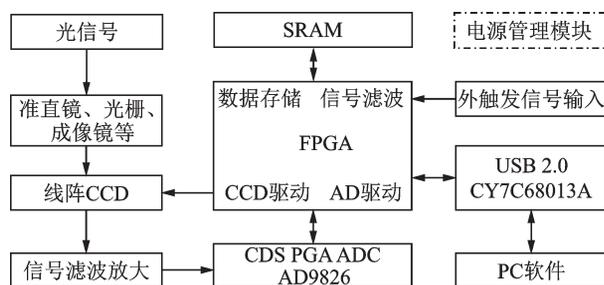


图 1 硬件系统框图

Fig.1 Block diagram of hardware system

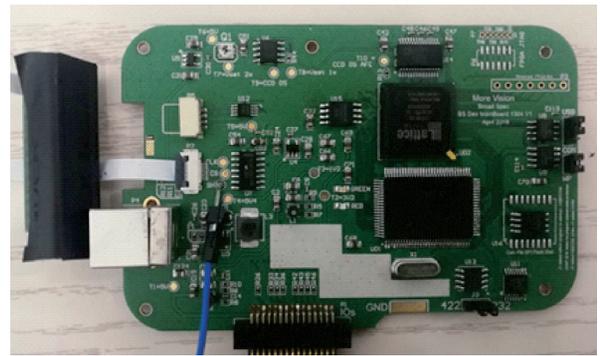


图 2 电路板实物图

Fig.2 Physical diagram of circuit board

2 信号采集原理及 FPGA 驱动程序设计

2.1 CCD 信号采集原理

根据外触发同步控制的线阵 CCD 的应用需求, CCD 芯片采用 Toshiba 公司的 TCD1304DG, 该芯片是目前微型光纤光谱仪使用最广泛的低成本探测器^[6-7],其主要特性如表 1 所示。

表 1 TCD1304DG 主要特性

Tab.1 Main features of TCD1304DG

功能	特征
有效像素	3648
暗信号电压/mV	5 (MAX)
动态范围	300
内置功能	电子快门、采样保持电路
灵敏度 $/(V \cdot lx^{-1} \cdot s^{-1})$	160
功耗/mW	75 (MAX)

TCD1304DG 的驱动信号主要包括:积分清除栅信号 ICG (Integration Clear Gate)、帧转移信号 SH (Shift Gate) 和时钟信号 ϕM (Master Clock), 输出信号 OS (Output signal), 电子快门控制时序如图 3 所示。

TCD1304 一共有 4 096 个像素,其中 3 648 个是有效像素,每 4 个时钟周期 ($4 \times \phi M$) 输出一个像素值。ICG 信号用来控制电子快门的开关,当处于高电平时清除寄存器的值并输出光强信息,处于低电平时,CCD 可以将接收到的光强信号转移到寄存器中等待输出。相邻两个 SH 脉冲下降沿之间的时间间隔为 CCD 的有效光积分时间。

由于本研究需要高精度控制的线阵 CCD 驱动,驱动信号之间会存在触发关系,时间要求需严格依据图 4 和表 2 所示,否则会影响测量精度和速度,甚

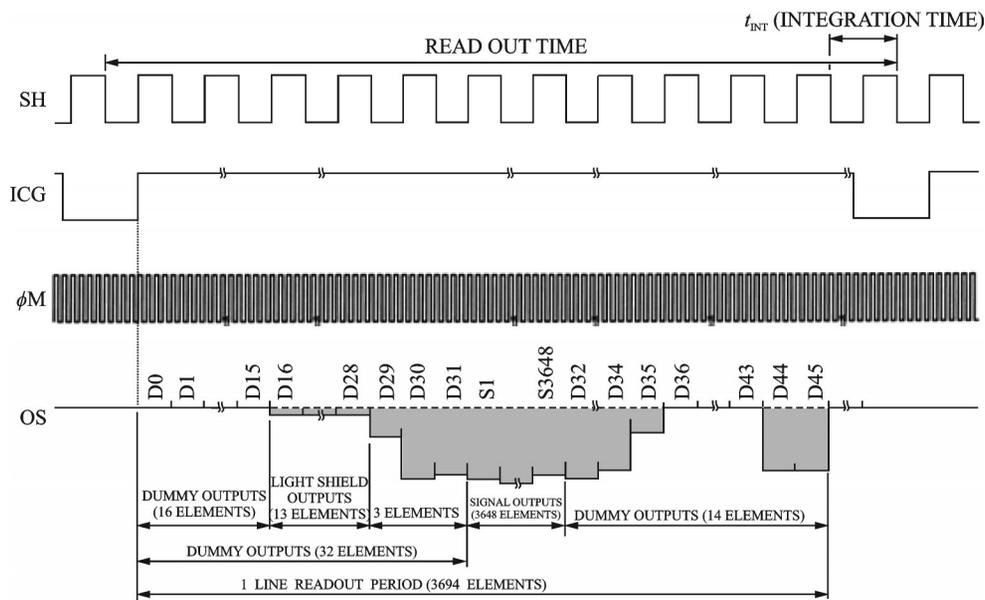


图3 TCD1304电子快门控制时序图

Fig.3 TCD1304 electronic shutter control timing diagram

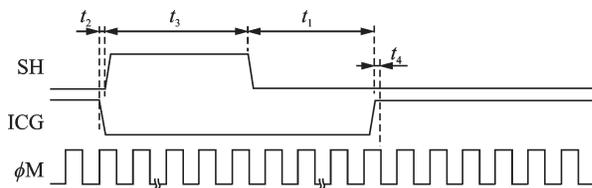


图4 TCD1304驱动信号时序要求

Fig.4 TCD1304 timing requirements

表2 TCD1304时序特性参数

Tab.2 TCD1304 timing characteristic parameters

特性	SYMBOL	MIN	TYP.	MAX	UNIT
ICG信号延迟	t_1	1 000	5 000	—	ns
ICG和SH信号时序	t_2	100	500	1 000	ns
SH	t_3	1 000	—	—	ns
信号宽度ICG和时钟信号时序	t_4	0	20	*	ns

*:需要保持phiM是“H”电平

至不能正常工作^[8]。

2.2 FPGA驱动程序设计

为了保证CCD能够采集到外部触发的同步信号,需要将FPGA时序驱动分为外触发信号时序驱动和TCD1304时序驱动两部分。为扩大应用场景,外触发信号包含电平触发和边沿触发。

其中DREQ_IN:USB数据请求信号;TRIG_IN:外触发信号;TRIG_MOD:触发模式,0电平触发,1边沿触发;IT_REG:积分时间寄存器。

图5为外触发信号状态转移,共WaitDREQ、WaitTRG、PassHalfTRG、LevelTRG、GenIntTRG

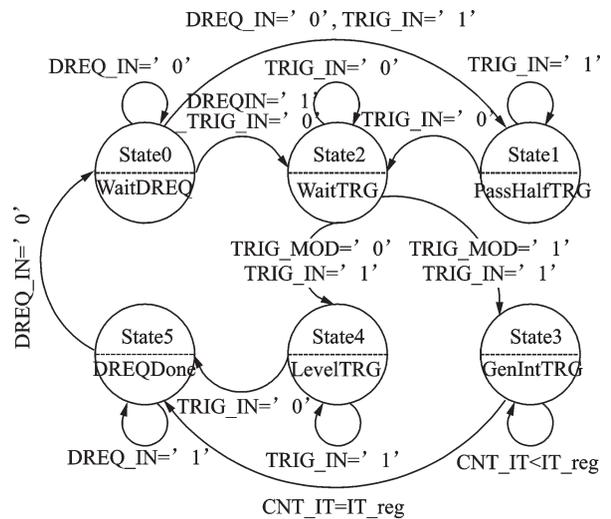


图5 外触发信号状态转移图

Fig.5 State transition diagram of external trigger signal

和DREQDone六个状态。其中,WaitDREQ状态是等待USB数据请求,WaitTRG状态是等待外触发信号,当触发模式为电平触发时,PassHalfTRG状态是为避免当外触发信号为高电平期间,USB数据请求信号到来导致积分时间不准的问题;LevelTRG状态可根据触发时间长短确定积分时间,GenIntTRG状态是边沿触发,需要比较IT_REG寄存器的值来确定积分时间,DREQDone状态是标志着USB数据已经获取完成。

FPGA的输入时钟为30MHz,通过PLL(Phase Locked Loop)IP核分频得到TCD1304的驱动时钟为2MHz和像素时钟0.5MHz(即CNT_PIXEL计数器周期为2μs)。TCD1304驱动

依据图 3 中的时序可将 TCD1304 的状态分为 State_IDLE、State_CLR、State_EXPO、State_SH1、State_SH2 和 State_LRD 六个状态,对应转换关系如图 6 所示。

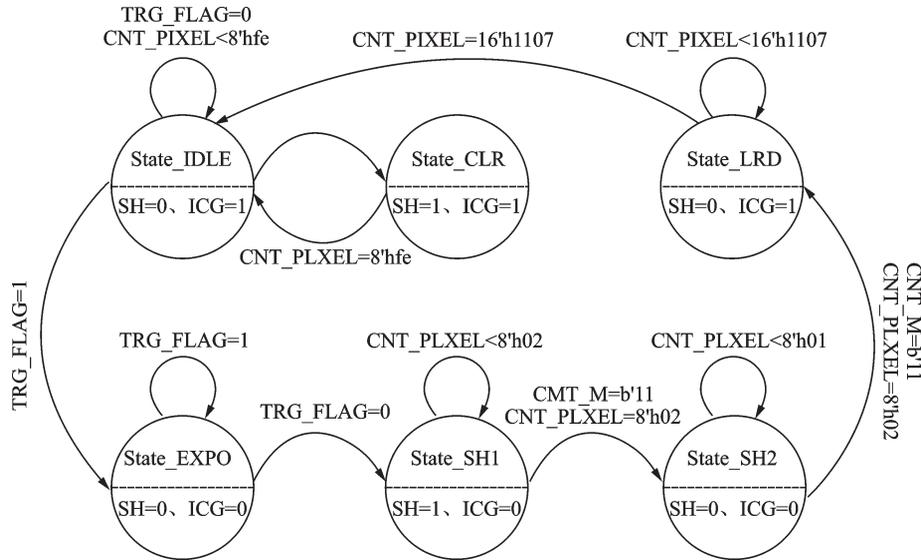


图 6 TCD1304 驱动信号状态转移图

Fig.6 Diagram of TCD1304 drive signal state transition

图 6 中 State_IDLE 为空闲状态;当没有外触发信号 (TRG_FLAG=0) 时且累计像素 (CNT_PIXEL) 大于 8'hfe 时进入清空状态 (State_CLR), 数据无效, 其中 8'hfe 是调试值, 该调试值既要保证小峰能输出, 又要保证 CCD 采集的光谱稳定。清空状态执行后返回空闲状态; 当接收到外触发信号 (TRG_FLAG=1) 时, CCD 进入曝光状态 (State_EXPO), 外触发信号标志会在积分时间结束后置 0, 当置 0 时进入 SH1 状态 (State_SH1); 根据图 4 时序及表 2 时间要求, 当 CNT_PIXEL=8'h02 时, 进入 SH2 状态 (State_SH2), SH1 和 SH2 的划分依据图 3 TCD1304 信号时序 SH 和 ICG 信号的电平状态划分。最后进入信号转移状态 (State_LRD) 将 CCD 的 4 096 个像素信号输出, CNT_PIXEL=16'h1107 是根据 USB FIFO 确定, 至此完成了一次有效信号的采集。

分辨率为 400 ns, 如图 7 所示, 示波器 CH1 通道为黄线, 是 CCD 的 ICG 信号, CH2 通道为蓝线, 是 SH 信号, CH3 通道为紫线, 是外触发信号。

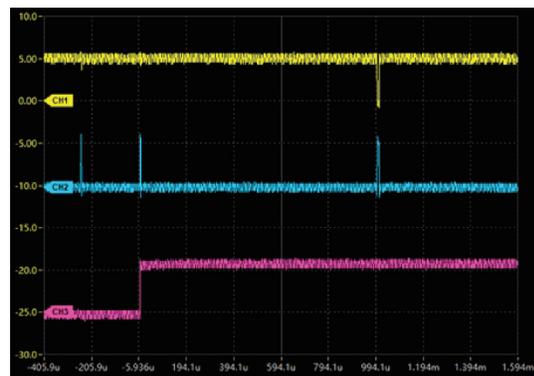


图 7 积分时间 1 ms 信号时序图

Fig.7 Time sequence diagram of 1 ms signal

3 实验及结果分析

3.1 信号测试

本次测试使用 Tektronix AFG3252C 信号发生器产生频率为 1 Hz, 占空比为 50% 的 TTL 电平外触发信号, 使用 RIGOL MSO8064 示波器测量外触发信号上升沿到 CCD 的帧转移信号 SH 信号下降沿的时间差。CCD 驱动板积分时间为 1 ms, 示波器

调整的示波器水平移位, 使波形中需测量的两点 (外触发上升沿和采集周期结束的前一个 SH 下降沿) 位于屏幕中央水平刻度线两侧。记录时间 t_1 和 t_2 , 如图 7 所示。通过 $t_2 - t_1$ 得到外触发信号到 CCD (TCD1304) 曝光开始的工作时间。

按上述方法随机测试 15 组数据, 如表 3 所示。可以看出外触发上升沿和采集周期结束前一个 SH 下降沿的差值均值为 2.809 9 μ s, 即研究设计电路板的固定延时时间为 2.809 9 μ s, 延时精度 (差值波动) 不大于 86.1 ns。



图8 外触发信号到CCD曝光开始时间差

Fig.8 Time difference from external trigger signal to the beginning of CCD exposure

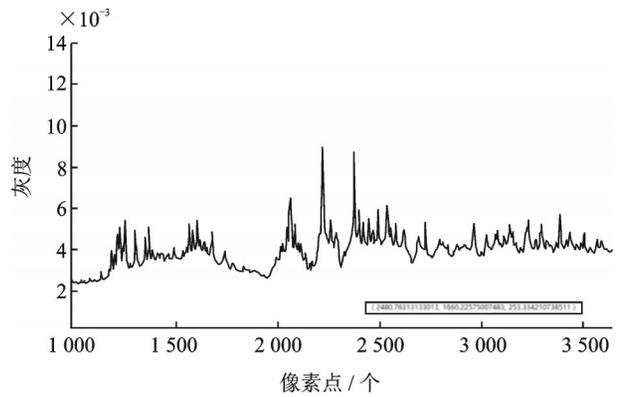


图9 光谱仪采集的光谱信号

Fig.9 Spectral signal collected by spectrometer

表3 积分时间为1 ms的测试数据

Tab.3 Test data with integration time of 1 ms

测试组	外触发上升沿 $t_1/\mu s$	SH下降沿 $t_2/\mu s$	差值 $t/\mu s$
第1组	-0.008	2.768	2.776
第2组	-0.008	2.812	2.820
第3组	-0.008	2.780	2.788
第4组	-0.008	2.740	2.748
第5组	-0.008	2.880	2.888
第6组	-0.008	2.872	2.880
第7组	-0.008	2.796	2.804
第8组	-0.008	2.728	2.736
第9组	-0.008	2.736	2.744
第10组	-0.008	2.860	2.868
第11组	-0.008	2.780	2.788
第12组	-0.008	2.748	2.756
第13组	-0.008	2.888	2.896
第14组	-0.008	2.860	2.868
第15组	-0.008	2.780	2.788
差值均值/ms			2.809 9
差值波动/ns			≤86.1

3.2 样品测试

根据文中所设计的外触发方式控制 TCD1304 采集光信号驱动程序,使用激光诱导离解光谱技术 LIBS 验证设计的时效功能。本次测试使用 Quantel DOC00013 激光器发射激光脉冲与钢研纳克合金铸铁样品 NCS010003 相互作用产生瞬态激发光谱信号。电路板安装在长光格瑞 GRLS 系列光谱仪上,光谱仪配套软件采集的信号如图 9 所示。

图 9 中横坐标为像素点,纵坐标为 16 位 CCD 灰度量化值,可以看出线阵 CCD 可以采集到满足光谱分析要求的光谱信号。由此可得出文中设计实现

了外触发方式控制 TCD1304 可以采集瞬态激发光谱信号。

4 结 论

本次测试验证了设计的驱动时序,从外触发上升沿和采集周期结束前一个 SH 下降沿的差值均值为 2.809 9 μs,即设计电路板的固定延时时间为 2.809 9 μs,延时精度(差值波动)不大于 86.1 ns,可以采集样品的瞬态激发光谱信号,因此该设计实现了外触发同步控制 TCD1304 采集光信号,并为后期工业测试提供了应用参考。

参 考 文 献

[1] 华园园,姚大志,韦 伟,等.高速 A/D 在多口 CCD 相机中的应用[J].光电子技术,2011,31(03):202-206.

[2] WANG Wei, SUN Lanxiang. A method of laser focusing control in microlaser-induced breakdown spectroscopy[J]. Plasma Science and Technology,2019,21(03):35-43.

[3] 侯迪波,张 坚,陈 冷,等.基于紫外-可见光光谱的水质分析方法研究进展与应用[J].光谱学与光谱分析,2013,33(07):1839-1844.

[4] 冯为蕾,王福娟,曾万祺,等.应用于 LIBS 的 CCD 光谱测量系统[J].激光与光电子学进展,2013,50(01):199-205.

[5] 雷文奇.有机样品中激光诱导等离子体时空分辨特性以及无机元素的定量分析[D].上海:华东师范大学,2013.

[6] 高 璐.基于 ARM 的光谱数据高速采集系统的研究与实现[D].烟台:烟台大学,2019.

[7] 姚舜禹.基于非激光光源的无扫描 3D 成像光雷达系统的研究[D].成都:电子科技大学,2014.

[8] 孙东磊.基于 FPGA 的线阵 CCD 瞬态光谱信息采集系统研究[D].重庆:重庆大学,2013.