

文章编号:1004-4213(2010)03-0441-5

基于线阵 CCD 的高速光谱信息采集系统的研究*

王博^{1,2}, 白永林¹, 欧阳娴¹, 刘百玉¹, 白晓红¹, 赵军平¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:针对爆炸时刻光谱信息量大、存在时间短的特点,设计了一款基于线阵 CCD 高速光谱信息采集系统.系统以 FPGA 作为主控芯片不仅为 CCD 提供工作时序,同时还控制着信号调理、模数转换和光谱信息的存储与传输.最后,通过 USB 串行总线将采集到的光谱信息传输至上位机进行后续处理.结果表明,利用该系统可在一次爆炸过程的 100ns 时间内完成四个时刻爆轰温度的测量,具有较高的测量精度和速度,可实现爆轰过程中高速动态光谱信息的采集与存储,并可应用于其它瞬态信息的获取领域.

关键词:光谱采集和存储;CCD;可编程逻辑阵列;DDR SDRAM

中图分类号:TP336

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103903.0441

0 引言

在高温气体和等离子体的温度及相关特性的测量领域,动态光谱法检测相对于其它测量方法具有不干扰流场,不需外加激发源,测量结果比较精确的优点,因此得到了广泛的应用.而炸药爆轰过程中的光谱辐射因存在时间短、瞬时性高是多个爆轰参量中最难测量的一个参数,因此爆轰过程中高速瞬态光谱信息的采集和存储对国防工业中新型炸药的研究显得尤为重要^[1-2].

随着 CCD 性能的不断提高,CCD 技术已被广泛应用于众多检测领域,尤其在光谱检测方面,CCD 更是以其独特的性能优势实现了多波长的并行扫描,取代了以往复杂的机械扫描装置,减少了误差来源,提高了检测精度^[3].CCD 的动态光谱检测系统要求高精度和高时间分辨率,因此 CCD 输出的数据量大,并且数据输出率高,使得一般传输模块的速度不能与之相匹配,为了解决数据传输速度与高数据量之间的矛盾,本文提出了基于现场可编程门阵列器件(Field Programmable Logic Array, FPGA)和高速大容量缓存 DDR SDRAM 的线阵 CCD 高速光谱信息采集系统.本设计以 FPGA 为主控芯片,结合 DDR SDRAM 实现了对高速瞬态光谱信息的实时采集和存储,为后续爆轰数据的处理提供了重要信息,是爆温测量系统中不可缺少的一部分.

1 高速光谱信息采集系统概述

基于 FPGA 的设计方法具有实时性好,设计灵活,集成度高,低功耗等优点^[4],因此该系统所有的控制逻辑均由 FPGA 完成.这样就克服普通传输模块速度无法匹配的缺点,提高了整个系统的速度和精度.FPGA 完成的主要功能包括:CCD 驱动时序的产生、A/D 时序控制、DDR SDRAM 存储和 USB 总线传输的逻辑控制.当启动采样时,FPGA 的控制逻辑使 A/D 芯片启动;在采样期间,FPGA 输出 SDRAM 片选信号并将采样的数据直接存入 SDRAM 中;采样结束后,由 FPGA 控制,将 SDRAM 中的数据便通过 USB 串行总线传输至上位机,最后通过软件对采集的数据进行处理,得到一个完整爆轰过程的光谱信息.

图 1 给出了该高速光谱信息采集与存储的系统框图,该系统具体工作过程如下:爆炸发生后,由 FPGA 中的 CCD 驱动电路向 CCD 提供驱动信号,使 CCD 开始工作.CCD 输出信号经放大滤波等预处理后进入 A/D 转换器,A/D 在 FPGA 的控制下进行信号的模数转换,然后通过 FPGA 的控制将该数字信号写入 DDR SDRAM 中,DDR SDRAM 存储器有 512Mb 的容量,可以保证记录下 2 秒钟时间内的爆轰光谱信息.存储结束后,采集到的光谱信息由 FPGA 控制,经 USB 串行总线传输至上位机进行后续处理,这样一次完整的采集过程结束.

* 国家高技术研究与发展计划资助

Tel:029-88887613 Email:wangbo125017@163.com

收稿日期:2009-04-23 修回日期:2009-05-12

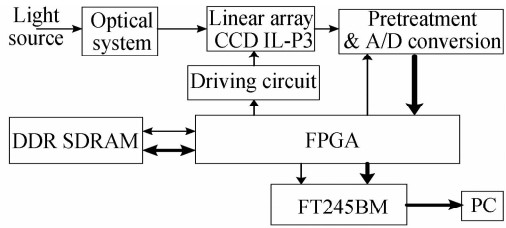


图 1 高速光谱信息采集存储系统框图
Fig. 1 Hardware scheme of data acquisition and storage system

2 高速光谱信息采集硬件电路设计

2.1 高速线阵 CCD 驱动时序控制

根据爆轰过程的高速瞬时性,设计选择加拿大 DALSA 公司的 IL_P3 型线阵 CCD, 帧频为 73 KHz, 最大数据输出率达 40MHz, 图像成像质量高, 灵敏度达到 43V/(uj/cm²), 有过饱和和曝光时间控制. 时序控制设计是 CCD 高速光谱信息采集的关

键, 为了使 CCD 正常工作, 需提供以下控制信号: CR1, CR2, TCK, RST. 其中 CR1, CR2 为 CCD 两相驱动脉冲, TCK 为 CCD 的转移时钟, RST 为 CCD 的复位时钟. CCD 的一个工作周期分两个阶段^[5]: 光积分阶段和电荷转移阶段. 在 TCK 低电平阶段, 进行光积分, 同时上一周期的光积分电荷信号在两相驱动时钟 CR 的控制下, 逐个像元依次输出到信号输出 OS 端. 在 TCK 高电平阶段, 各光敏单元的光积分电荷转移到各自对应的模拟移位寄存器中. RST 是复位脉冲, 每复位一次, 输出一个光信号; RST 的作用是清除转移寄存器中的残余电荷, 所以其频率应和数据输出速率一致.

在分析 CCD 驱动时序的基础上, 结合硬件编程语 VHDL 语言, 完成了驱动时序控制的设计. 利用 Quartus II 中集成的仿真器得到的 CCD 驱动时序仿真图如 2.

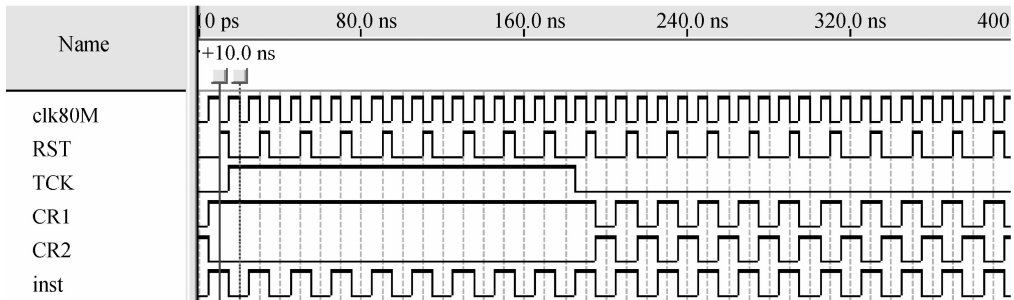


图 2 CCD 时序仿真图
Fig. 2 The timing simulation diagram of CCD

2.2 模数转换器的逻辑控制

CCD 图像传感器完成了光电信号的转换, 为了存储和处理所采集的信号, 需要将 CCD 输出的模拟信号进行相应的预处理并转换成数字信号. 在兼顾 A/D 转换精度的同时, 高速的采样率在高速光谱信息的获取中显得更为重要. 同时, 为了获得高质量的光谱信息, 必须对 CCD 输出信号中包含的噪声分量进行特殊处理, 运用相关双采样技术可以很好的消

除复位噪声. 若由分立电路实现相关双采样, 电路复杂、调试困难. 因此, 本设计中选用美国 AD 公司的 AD9840 CCD 前端信号处理芯片, 该芯片包括了输入钳位, 相关双采样, 数字控制可变增益放大, 暗电平钳位和十位 A/D 转换器, 最大转换时钟频率可达 40MHz, 完全可满足系统的要求. AD9840 的工作脉冲主要有 SHP, SHD, DATACLK, 这三个脉冲信号都由 FPGA 产生实现, 其相关双采样时序如图 3.

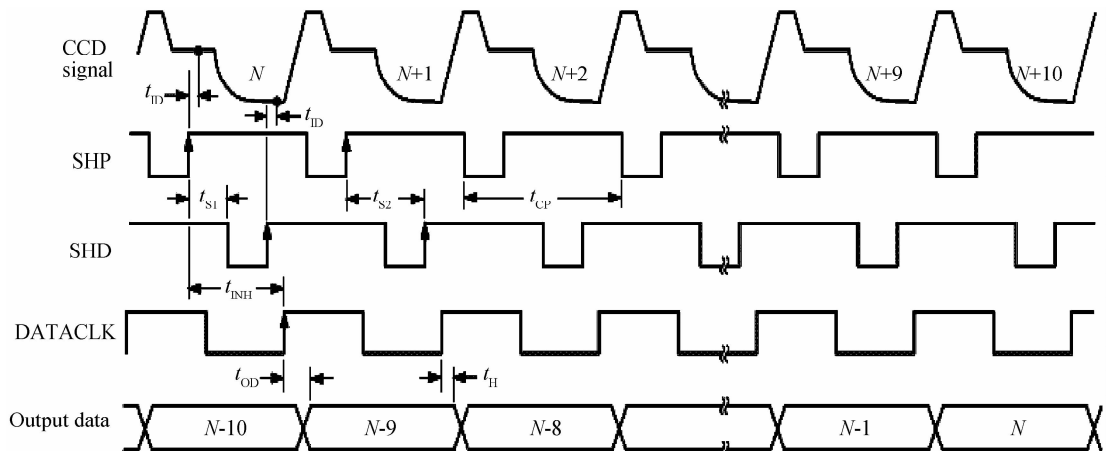


图 3 AD9840 工作时序图
Fig. 3 Timing diagram for AD9840

SHP 是噪声信号的采样/保持脉冲,其上升沿采样 CCD 信号的前肩,即对复位电平进行采样,SHD 是光谱信息的采样/保持脉冲,其上升沿采样 CCD 信号的后肩,即对信号电平进行采样.为达到相关双采样的最佳效果,两个采样脉冲的设计在时序上严格要求和 CCD 的实际输出信号时序相对应. DATAOUT 是输出的信号电平.在 DATACLK 信号的上升沿 A/D 转换器开始采样.因为 A/D 转换启动是在双采样完成之后进行,所以在同一个像元周期内,DATACLK 的上升沿,时序上比对应像素的 SHD 上升沿延迟一段时间,并且须在下一个 SHP 上升沿到来之前.

A/D 转换器在 FPGA 的控制下实时的将接受的模拟信号转换成数字信号,以便将光谱信息存储在存储介质中.

2.3 高速光谱信息存储的逻辑控制

为了实现对高速瞬态光谱信息的分析处理,要求能够将采样到的大量数据进行快速实时存储^[6],使用 DDR SDRAM 可以达到 400MB/s 的存储速率,完全可满足系统的要求.将 A/D 采样后得到的数据送入 FPGA,对高速的数据流进行缓冲与转换,最后送入 DDR 存储体,以待进行光谱信息的分析处理.本设计选用 Micron 公司的 MT46V32M16 存储器. MT46V32M16 是 32M × 16 位的 DDR SDRAM,其结构分为 4 个块(Bank),每块为 8K 行,每行 1K 列.

对 MT46V32M16 的操作主要包括初始化、读写和刷新操作.文献[7]给出了对 DDR 存储器进行操作的典型的状态转换图,但此转移图并不符合本设计的实际需要,因为我们并不要求设计的 DDR SDRAM 控制器像通用的控制器那样实现各种 DDR SDRAM 状态转移与命令操作.实际上,本设计要求控制器能操作 DDR SDRAM 实时存储数据,实现顺序式的连续读或连续写,以及预充电、激活、自动刷新等命令.因此,对文献[7]提供的典型的状态转换图进行简化,得到符合实际需求的状态转换

图,如图 4.

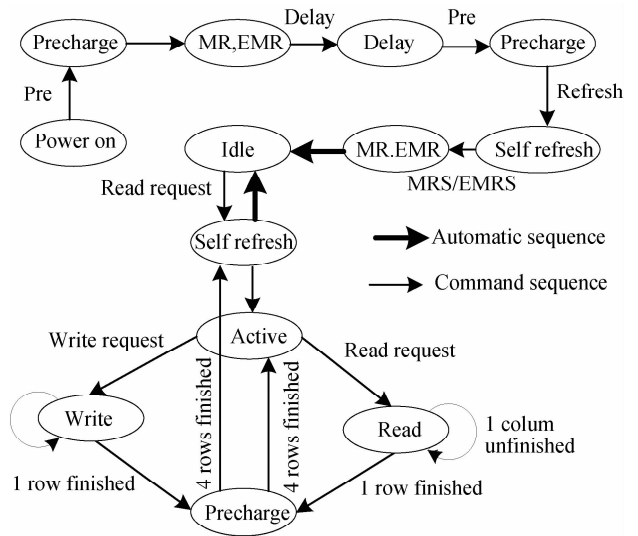


图 4 简化的 DDR SDRAM 工作状态转换图

Fig. 4 Flowcharting of the DDR SDRAM

该状态转换图给出了从上电复位到进行读/写操作的各个状态.系统上电后,在对存储器进行读写操作之前,需要先进行初始化操作,设置突发长度、突发类型、CAS 潜伏期等参数.初始化完成后,通过激活命令激活对应地址的 bank,同时输入行地址.最后,通过读命令或写命令输入列地址,将相应数据读出或写入到对应的地址.操作完成后,用相关命令中止读或写操作.DDR 的存储单元可理解为一个电容,总是倾向于放电.因此,必须有定时的刷新周期以避免数据丢失,每 64 ms 必须对所有存储单元刷新一遍.

依据图 4 所示的状态转换关系,在 FPGA 里设计对 DDR SDRAM 的读写控制,我们以读操作为例,在 FPGA 上实现读写控制模块并进行读操作仿真,得到时序图如图 5 所示,写操作与之类似.其中 Clk_100m 是时钟信号,reset_n 是复位信号,local_init_done 是初始化完成标志,local_ref_a 是外部刷新请求,local_read_req 是外部读请求,ddr_ras_n, ddr_cas_n 与 ddr_we_n 的组合为 DDR 提供的刷

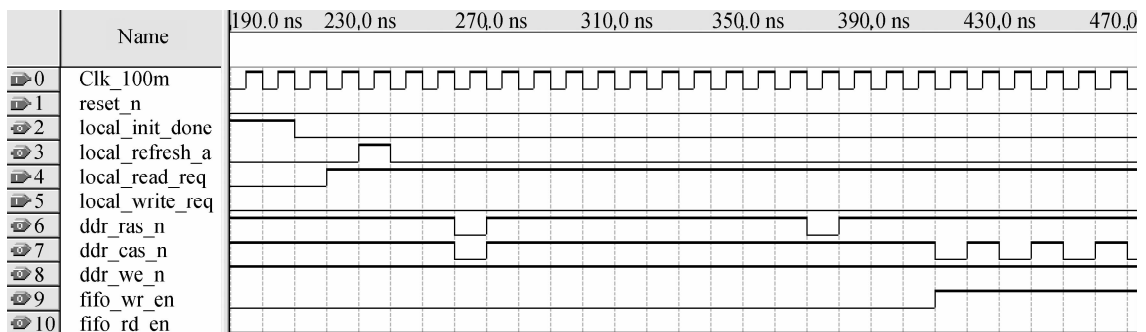


图 5 读操作仿真时序图

Fig. 5 The read timing simulation diagram

新、激活、读写等操作命令, fifo_wr_en 是 FIFO 的写使能, 表明读操作的数据可以写入到 FIFO 中. 从仿真结果可看出, 该时序功能完全满足 DDR 的读写要求, 可适用于高速光谱信息的存储要求.

2.4 DDR 与 USB 的接口电路设计

设计通过在 FPGA 外部直接连接一片 USB 协议芯片 FT245BM, 将并行 I/O 口的光谱信息转换为 USB 串行数据格式传给上位机. FT245BM 内含两个 FIFO 数据缓冲区, 一个是接收缓冲区, 另一个是发送缓冲区, 它们用作 USB 数据与并行 I/O 口数据的交换缓冲区. FIFO 实现与 FPGA 的接口, 主要通过 8 根数据线 D0~D7、写控制线 WR 以及 FIFO 发送缓冲区空标志 TXE 来完成数据的传输. TXE 为低表示当前 FIFO 发送缓冲区为空, 为高表示当前 FIFO 发送缓冲区满或者正在存储前一个字节, 禁止向缓冲区中写数据. 当 DDR 数据准备好后, 通过 FPGA 启动发送操作. 首先将 DDR 内待发送的数据按字节读到 FPGA 的缓冲区, 并产生写 FT245BM 发送缓冲区的时序, 将数据写到 FT245BM 发送缓冲区, 再通过 USB 串行总线将数据传输至上位机, 重复以上步骤直到一帧数据发送完毕.

该方法不用微控制器, 减少了元器件的个数, 并且占用 FPGA 资源很少, 系统设计的灵活性很大.

3 实验结果与分析

在整个实验过程中, 先用已知特征谱线的光源 (如汞灯) 测出几组波长与 CCD 光敏元的序数, 通过计算机拟合出函数关系 $\lambda = a + bx + cx^2$ 完成系统的标定^[8]. 炸药引爆后, 爆轰波的光辐射进入光学系统, 同时在药室中的光敏触发系统在爆轰波的照射下产生触发同步脉冲, 经一定的时间延迟后 (该实验中延迟时间设置为 30 ns), CCD 采集和读出系统也同时被该脉冲启动, 谱线的相对光强通过 CCD 输出信号直接读出 (不考虑光谱响应量子效率的不同).

实验中利用该系统分别对不同稀释度的硝基甲烷炸药进行了瞬时光谱测量, 得到其爆轰过程中可见光范围内连续的光谱辐射, 并用计算机实时处理测量结果. 图 6 就是在一次爆炸实验中实时获取的炸药爆轰过程中 100 ns 内四个不同时刻的瞬时爆温数据.

将该测量结果与标准物质硝基甲烷的爆温值对比, 便可提供准确、可靠的炸药爆温测量数据, 这对准确地用爆温检定炸药的状态方程, 完善炸药理论, 促进对炸药性能的全面研究, 研究新型炸药及武器设计具有重要意义.

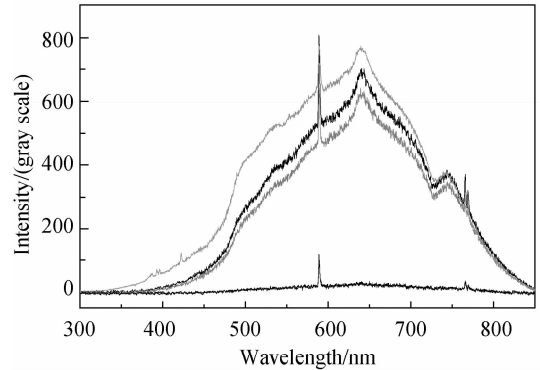


图 6 系统所摄的爆轰场的动态光谱曲线

Fig. 6 Dynamic spectrum of detonation radiation

实验结果表明, 本文系统的设计方案对爆轰过程中高速动态光谱信息的采集和存储是完全可行的, 由于整个系统的控制由单片 FPGA 实现, 这样就克服了普通传输模块速度低的缺点, 提高了整个系统的速度, 整个系统的光谱分辨率也至少能达到 2.5 nm, 系统有效的摄谱区间是从 400 nm 到 750 nm, 这样一条光谱曲线可获得 140 个有效光谱采样点, 这完全达到了线性回归法用于爆温计算的要求, 保证了系统的测量精度.

4 结论

本文利用高速线阵 CCD, 结合 FPGA 和 DDR SDRAM 技术实现了爆轰过程中高速瞬态光谱信息的采集和存储, 对较宽频域范围内高频、瞬态信号细节的精确、实时检测和分析具有一定的实际意义. 实际靶场应用表明, 该装置设计合理、技术先进, 对炸药爆温的测量速度快、测量精度高、测量数据准确可靠, 为研究炸药爆轰性能等提供了全新的方法与手段.

此外, 为了进一步提高该系统的光谱采集速度和精度, 采用更高精度的 AD 和提高触发电脉冲的同步精度将是今后努力的方向.

参考文献

- [1] LI Gang, LI Qiu-xia, LIN Ling, *et al.* Discussion about the prediction accuracy for dynamic spectrum by paratial FFT[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(12): 2177-2180.
李刚, 李秋霞, 林凌, 等. 动态光谱频域提取的 FFT 变换精度分析[J]. *光谱学与光谱分析* 2006, **26**(12): 2177-2180.
- [2] BAI Yong-lin, Ren Ke-hui, OU-Yang Xian, *et al.* Measurement of the denotation temperature by transient multi-wavelength pyrometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 868-871.
白永林, 任克惠, 欧阳娴, 等. 炸药爆轰温度的瞬时光谱测量[J]. *光子学报*, 2003, **32**(7): 868-871.
- [3] LI Gang, WANG Yan, LI Hai-lan, *et al.* Study of on-line CCD spectrum data acquisition system based on CPLD [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(10): 6091.
李刚, 王焱, 李海兰, 等. 基于 CPLD 的线阵 CCD 光谱检测数据采集系统的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(10): 6091-6093.

- [4] LIANG Yi-tao, WEN De-sheng, WANG Hong, *et al.* The design and implementation of logic control in a transient feeble optical signal detection system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(SUP):309-312.
梁义涛,汶德胜,王宏,等.瞬态微光探测系统逻辑控制设计与实现[J].光子学报,2007,**36**(SUP):309-312.
- [5] DALSA Inc. IL-P3 Image Sensors. IL-P3 data sheet, 2000:1-14.
- [6] CHEN Yun, ZHAO Xing-guo. Real-time data acquisition system of single-ring absolute optical shaft encoder based on PCI bus[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3):441-445.
陈贇,赵兴国.基于 PCI 总线的单圈绝对式光电轴角编码器实时数据采集系统[J].光子学报,2007,**36**(3):442-445.
- [7] Micron Company, MT46V Data Sheet, 2004, 4-6.
- [8] LI Jia, PANG Qi-chang, REN Ke-hui, *et al.* Transient multi-wavelength detonation temperature measuring system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(10): 937-939.
李佳,庞其昌,任克惠,等.瞬态多光谱爆温测量系统[J].光子学报,2000,**29**(10):937-940.

Spectrum Data Acquisition System Based on Linear CCD

WANG Bo^{1,2}, BAI Yong-lin¹, OU-YANG xian¹, LIU Bai-yu¹, BAI Xiao-hong¹, ZHAO Jun-ping¹

(1 *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Ultra-high-speed dynamic spectrum of the various transient detection has become the main means of access to information. However, due to the the characteristics of high transmission and temporal resolution in spectrum data acquisition system, the CCD must have real time output, the data is large, and a high speed acquisition system is required. A CCD data acquisition system based on FPGA is designed. The whole system is controlled by FPGA, which is used to supply CCD timing and controls signal disposal, storage and transmission of data. Finally the data is transferred by USB bus into computer to do further processing to get a complete explosion spectral information. With this system four time temperatures during 100 ns detonation can be measured, and the results show that the system has a higher measurement accuracy and speed, which can be achieved high-speed spectral information collection and storage during the explosion. It also can be applied to other transient information acquisition.

Key words: Spectrum acquisition and storage; CCD; FPGA; DDR SDRAM

WANG Bo was born in 1983. He received the M. S. degree in 2009, and his research interests focus on exploration electro-optic gating systems.

