

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.05.009

# 应用于海洋观测的 TDI-CCD 驱动电路的设计

张元贞<sup>1,2</sup>, 孙晓兵<sup>1</sup>, 骆冬根<sup>1</sup>

( 1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室 安徽 合肥 230031;  
2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026 )

**摘 要:** 面阵 CCD 及线阵 CCD 不能胜任海洋目标观测的要求, 选用具有高信噪比高灵敏度的时间延迟积分 CCD(Time delay integration CCD, TDI-CCD) 作为探测器并实现其驱动电路。在图像采集过程中, TDI-CCD 探测器使用两个读取端口输出。该探测器驱动电路产生 TDI-CCD 和 A/D 的驱动时序。CCD 的模拟输出信号被 A/D 采样, 转换成可被计算机识别的数字信号。采用 FPGA 作为主控芯片, 产生驱动时序, 接收被 A/D 转换过的数字信号, 并发送图像至计算机。利用相关双采样 (Correlated double sampling, CDS) 技术滤除 TDI-CCD 模拟输出信号的相关噪声, 提高信号的信噪比。现场可编程门阵列 (Field programmable gate array, FPGA) 代码在 ISE14.7 下进行仿真, 实验表明, 研制的 TDI-CCD 驱动电路能够产生 CCD 要求的驱动时序。

**关键词:** TDI-CCD; 驱动时序; 现场可编程门阵列 (FPGA); 相关双采样 (CDS)

**中图分类号:** TN710.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1673-6141(2019)05-0385-08

## Design of Driving Circuit of TDI-CCD for Ocean Observation

Zhang YuanZhen<sup>1,2</sup>, Sun XiaoBing<sup>1</sup>, Luo DongGen<sup>1</sup>

( 1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Because array CCD and linear CCD don't meet the requirement of observing the ocean goal, the time delay integration CCD (TDI-CCD) which has high sensitivity and high signal to noise ratio is selected and driving circuit is designed. Two ports of outputs the signal during image capture. The driver circuit generates the time sequence of the CCD and the A/D. The output analog signal of the CCD is sampled by A/D and converted to the digital signal which can be recognized by computer. FPGA is used to driving CCD and A/D, receiving the digital signal after A/D converts, and sending the imaging data to computer. The correlated double sampling (CDS) can decrease some related noise which analog output signal of the TDI-CCD has, and increase the signal to noise ratio. The code of field programmable gate array (FPGA) is simulated

**基金项目:** Supported by Key Technology Program for Satellite Application (卫星应用共性关键技术项目, 30-Y20A010-9007-17/18), National Key Research and Development Program of China (NKRDPC) (国家重点研发计划, 2016YFE0201400), High Resolution for Earth Observation(高分重大专项项目, GFZX04011805), Key Project of Hefei Institute of Physical Science Chinese Academy of Sciences(中国科学院合肥物质科学研究院重点项目, Y73H9P1801)

**作者简介:** 张元贞 (1993 -), 安徽淮南人, 研究生, 从事 CCD 成像技术的研究。 **E-mail:** zzyyushi@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 孙晓兵 (1966 -), 安徽巢湖人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学偏振遥感技术及光谱偏振遥感信息处理分析与建模方面的研究。 **E-mail:** xbsun@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2018-03-21; **修改日期:** 2018-04-17

on the ISE14.7. The experiment results prove that the driving circuit can generate right sequence that CCD needs.

Key words: TDI-CCD; driving sequence; field programmable gate array; correlated double sampling

## 1 引言

TDI-CCD 是指能够通过时间延迟积分方式工作的面阵 CCD 器件。当 CCD 探测器工作在 TDI 模式时, CCD 的每一行作为独立的光敏单元, 对同一目标进行多次曝光, 从而延长积分时间, 增加光能收集, 提高信号强度<sup>[1-2]</sup>。TDI 的工作模式, 使得信号强度增强, 而噪声强度相对于信号能得到一定的抑制, 这一特性使其在高速、微光领域具有广泛的应用, 因此 TDI-CCD 也成为解决遥感轻型化的主要技术途径和关键技术措施<sup>[3-6]</sup>。海洋拥有着丰富的资源, 如果在飞机或者卫星上对海洋拍摄, 由于观测目标的信号弱, 探测器飞行速度快, 对目标曝光时间短, 面阵 CCD 和线阵 CCD 并不能很好的胜任观测要求。在高速运动的情况下, TDI-CCD 在延迟积分模式下采集到图像的曝光时间相当于实际设定曝光时间的  $N$  倍 ( $N$  为 TDI-CCD 工作时的积分级数), 从而能很好的获得目标的信息。

本文基于 FPGA 设计了 TDI-CCD 的驱动电路, 驱动 TDI-CCD 正常工作, 能够配置相关双采样电路的增益和偏移量, 读取 TDI-CCD 采集的数据, 并传输至 PC。具有结构简单、操作方便, 数据传输量大的特点。该驱动电路能够为驱动 TDI-CCD 提供一种实现方式。

## 2 TDI-CCD 工作原理

因为 TDI-CCD 是一个线阵扫描器件, 则传感器的列为像元数, 其行数则为 TDI-CCD 的积分级数。

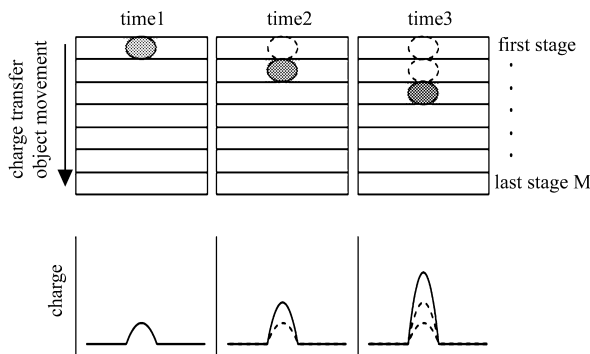


图 1 TDI-CCD 工作原理

Fig.1 Principle of TDI-CCD

如图 1 所示, 每一列的第一个像元在第一个曝光周期内采集到的信号并非直接输出, 而是垂直转移到第二个像元, 第二个像元在第二个积分周期内收集到的信号与转移来的信号叠加, 转移至第三个像元, 如此累积, 转移至最后一行 ( $M$ ) 的像元收集到的信号与之前  $M-1$  行收集到的电荷累加后转移至输出寄存器中输出。则 CCD 输出信号的幅度是  $M$  个像元积分的累加, 相当于一个像元在  $M$  个积分周期所收集到的信号电荷, 信噪比可提高  $\sqrt{M}$  倍<sup>[7]</sup>。

## 3 TDI-CCD 驱动电路设计

### 3.1 系统组成

TDI-CCD 驱动电路主要包含主控电路、电压偏置电路、时钟电平转换电路、相关双采样电路, 如图

2 所示。设计选用 Xilinx 公司的 XC6SLX16 芯片作为主控电路的主控芯片, 它具有丰富的内核(如 PLL 内核等)与引脚, 能够满足设计方案的要求。TDI-CCD 选用的是滨松公司 s10200-01, 该器件在 14V/8V/5V 三种供电电压下协同工作, 光谱响应范围为 200~1100 nm, 具有灵敏度高、工作速度快等特点。

电压偏置电路为 TDI-CCD 与时钟电平转换电路提供不同的偏置电压, EL7457 的时钟电平转换电路把主控芯片产生的驱动时序转换成能够驱动 TDI-CCD 所需的电压, 使用 AD9826 的相关双采样电路对 CCD 输出的模拟信号进行采样并输出可供计算机识别的数字信号。

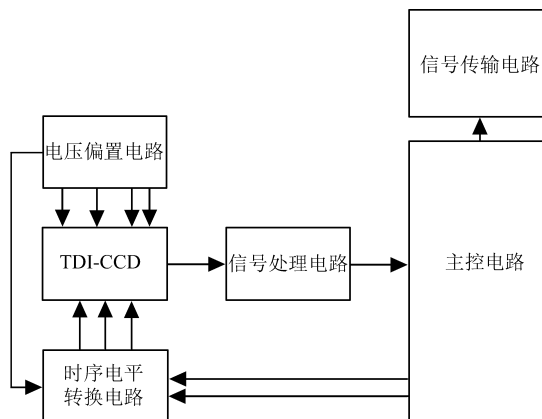


图 2 TDI-CCD 驱动电路系统组成框图

Fig.2 Structure of the TDI-CCD driving circuit

### 3.2 TDI-CCD 结构

s10200-01 芯片结构图如图 3 所示。该芯片主要由 3 个部分组成, 光敏区(即光积分区域)和上下两部分读取寄存器组成。其中 P1V、P2V、P3V 是垂直转移时钟信号, A 输出端口的 P1H、P2H(B 输出端口的 P1H 和 P2H 省略)是水平转移时钟信号。TGa 和 TGb 是光敏区与输出寄存器之间的转移栅, SG 是求和门, RG 是复位输出。该探测器可以根据扫描方向的不同而选取不同的输出方向, 每个输出方向

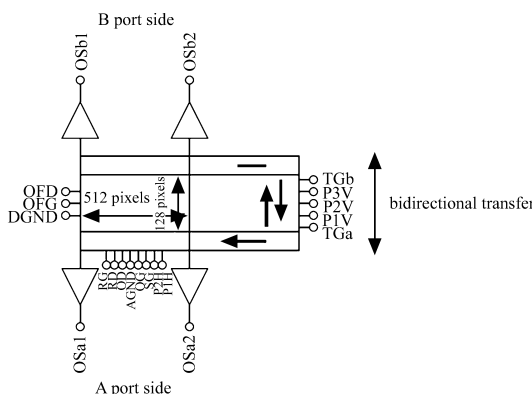


图 3 s10200-01 结构

Fig.3 Structure of s10200-01

有两个输出端口, 两个输出端口同时输出数据, 有效提高了输出速率。

### 3.3 电压偏置电路设计

由 s10200-01 芯片的手册可知, s10200-01 需要 5、8、14 V 等电压供电, 部分驱动时序的高电平在 5 V, 低电平为 -5 V。电压质量的好坏会直接影响到 CCD 内部电荷的转移效率和 CCD 输出信号的信噪

比, 如果电压传入噪声, 严重的有可能在输出图像上产生条纹, 影响成像质量。所以, 有必要对这些电压进行滤波处理, 将电压噪声降到最低 [8]。

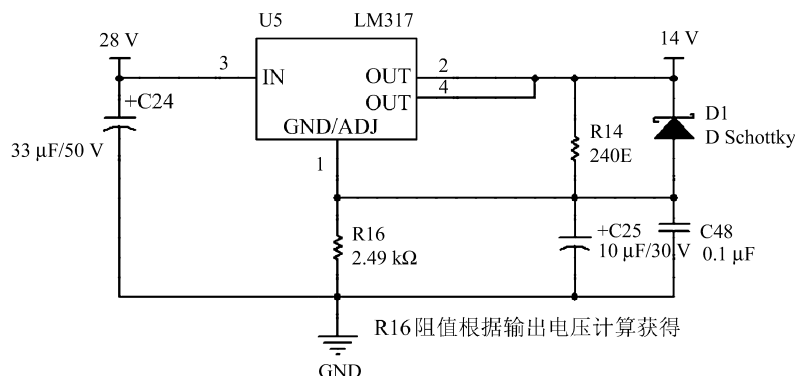


图 4 LM317 典型电路

Fig.4 Typical circuit of LM317

LDO 电路可以输出稳定的电压, 如图 4 所示。LM317 是输出电压可调控的低压差线性稳压芯片, LM317 的输出电压与  $R_{16}$  的关系:  $V_{out} = 1.25 \times (R_{16}/R_{14} + 1)$ 。在  $R_{14}$  阻值一定的情况下, 通过调节电阻  $R_{16}$  的值产生不同的输出电压。

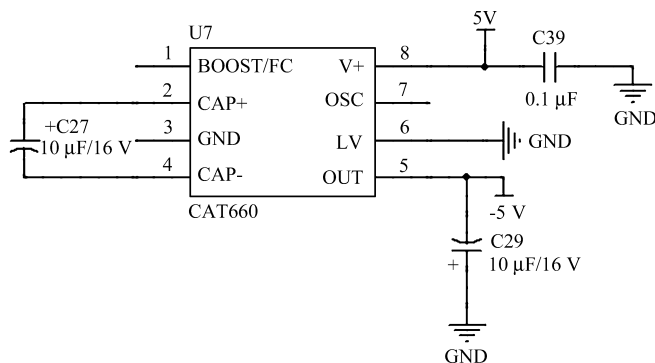


图 5 CAT660 典型电路

Fig.5 Typical circuit of CAT660

对于  $-5\text{ V}$  电压的产生, 可以利用电荷泵芯片 CAT660, 以  $5\text{ V}$  作为输入, 输出即为  $-5\text{ V}$ 。具体的 CAT660 电路如图 5 所示。

为了保证产生的上述电压的稳定性, 在输出端并联了  $10\ \mu\text{F}$  的大电容进行低频滤波。

### 3.4 时钟电平转换电路设计

s10200-01 的水平转移时钟、垂直转移时钟、summing gate、transfer gate 的高电平均为  $5\text{ V}$ , 低电平均为  $-5\text{ V}$ , reset gate 高电平为  $8\text{ V}$ , 低电平为  $0\text{ V}$ , 然而 FPGA 通用 IO 口的高电平为  $3.3\text{ V}$ , 低电平为  $0\text{ V}$ , 不能直接驱动该探测器芯片, 所以需要添加时钟电平转换电路, 对 FPGA 产生的时序进行电平转换。并且, 要求 FPGA 产生信号通过电平转换电路后具有低延迟, 从而保证信号时序的正确。因此, 在设计驱动电路时, 必须考虑 s10200-01 驱动端的电容。

采用 Elantec 半导体公司的 EL7457 芯片。该芯片可用于高速的 CMOS 驱动, 具有 4 个通道, 最大工作频率为  $40\text{ MHz}$ , 并提供  $2\text{ A}$  峰值的驱动能力以及超低的等效阻抗。可以通过控制输入管脚 OE 来控制它的三态输出。且在  $1000\text{ pF}$  的负载电容下, 信号上升时间  $t_R$  或者下降时间  $t_F$  仅为  $12\text{ ns}$ , 满足 s10200-01

的时序要求。EL7457 具体的原理图如图 6 所示 [9]。

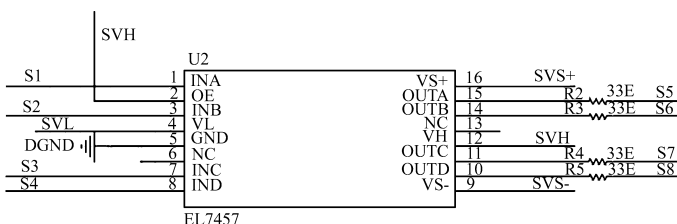


图 6 时钟电平转换电路

Fig.6 Circuit of the level transferring

图 6 中, S1~S4 为输入信号, 经过 EL7457 芯片输出 S5~S8, S5~S8 信号的高低电平的电压值分别由 EL7457 的引脚 VH 和 VL 输入电压决定。

### 3.5 相关双采样电路设计

TDI-CCD 的主要噪声来源于工作噪声, 工作噪声的主要成分是复位噪声和  $1/f$  噪声。对于复位噪声和  $1/f$  噪声的处理, 一般是采用相关双采样 (CDS) 的方法 [10]。

CDS 是在每个像素周期内对参考电平和信号电平各采样一次, 并将两次采样值相减, 就可以抑制复位噪声等相关噪声, 且两次采样之差就是信号的真实成分 [8]。并且 CDS 电路简单适合高速应用。这里选用 ADI 公司的 AD9826 芯片来对 TDI-CCD 的输出信号进行相关双采样。该芯片具有 16 位的 A/D 转换, 具有 3 个采样通道, 每个通道都具有输入钳位、相关双采样以及偏置增益调节的功能。AD9826 的饱和量为 4 V, 可以通过调节增益, 使得 CCD 的输出信号在合理的工作区内。具体的设计电路如图 7 所示。

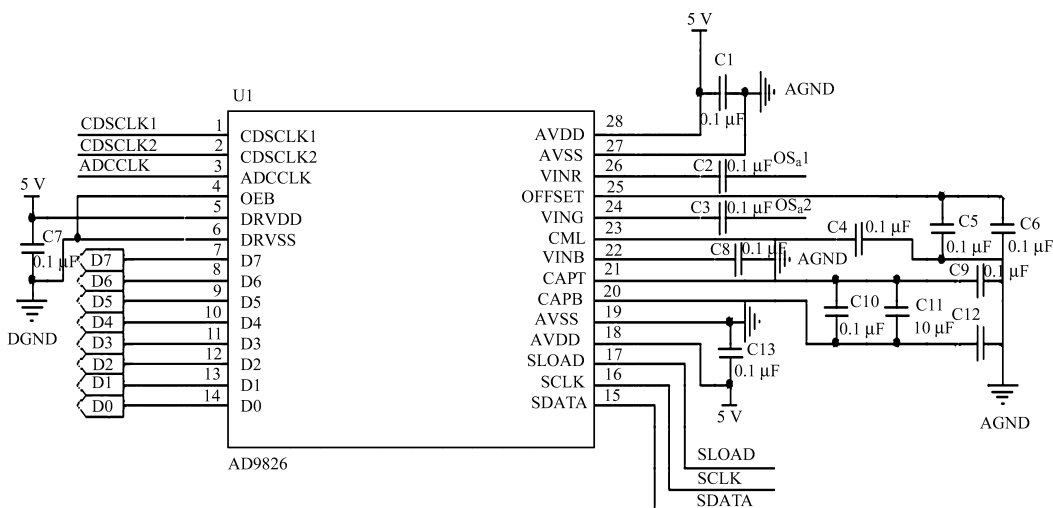


图 7 AD9826 典型电路

Fig.7 Typical circuit of AD9826

探测器 s10200-01 的两端各有两个输出端口, 每端选取 1 片 AD9826 的其中两个通道即可完成数据的相关双采样。在 CDSCLK1 的下降沿对输入信号进行一次采样, 在 CDSCLK2 的下降沿第二次对输入信号进行采样。在一个像素周期内须有两个 ADCCLK 周期, 保证两路数据的输出不受串扰。且 CDSCLK2 的上升沿要在第一个采样时钟的低电平内。

## 4 驱动时序分析与实现

### 4.1 驱动时序分析

s10200-01 的驱动过程主要包括垂直转移和水平转移以及光敏区信号转移三个过程，垂直转移过程由 P1V、P2V、P3V 信号驱动，水平转移过程由 P1H、P2H 信号驱动。光敏区信号转移过程是由 TG 信号完成的。以输出端口 A 为例，S10200-01 的时序如图 8 所示。

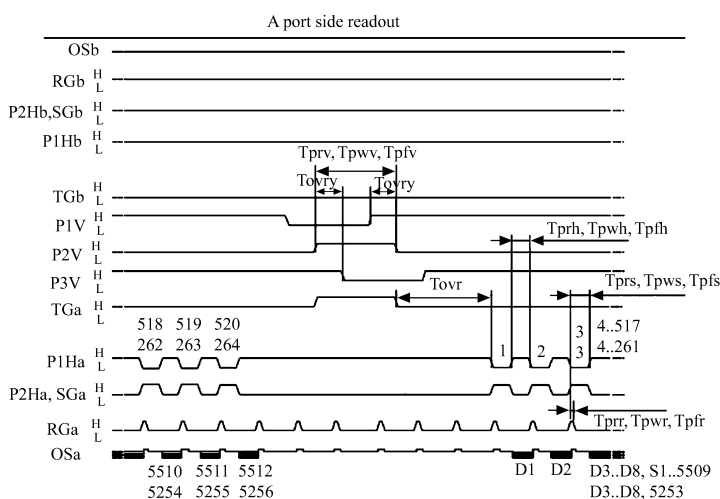


图 8 s10200-01 驱动时序图

Fig.8 Driving chart of s10200-01

垂直转移过程是把每一行寄存器中的信号转移至下一行寄存器中，最后一行寄存器的信号转移至移位寄存器中，再通过水平转移过程把移位寄存器的信号值读出。TG 信号的上升沿标志着光敏区信号转移至寄存器中，下降沿表示转移结束，积分开始。TG 信号高电平时间最少需要维持 120 ns。第一次 TG 信号下降沿与第二次 TG 信号的上升沿之间的时间长度即为探测器的积分时间。

由于这些时序的相位关系有着严格的要求，故使用 FPGA 产生基本逻辑。FPGA 对输入时钟进行倍频，产生 125 MHz 的全局时钟，全局时钟上升沿作为垂直转移过程、水平转移过程和光敏转移过程的计数器变化标志，从而产生探测器工作时需要的时序。根据图 8 的时序，可以把驱动时序分为 9 个状态：idle、P1V\_set、P2V\_set、P3V\_set、P1V\_reset、P2V\_reset、P3V\_reset、read 和 wait，利用状态机实现这些状态。在 idle 状态时，P1V、P3V、P1Ha 保持在高电平状态，其余保持在低电平状态；在 P1V\_set 状态时，P1V 置低；在 P2V\_set 状态时，P2V 和 TGa 置高；P3V\_set 状态下 P3V 置低；到了 P1V\_reset 状态时，P1V 恢复高电平；P2V\_reset 时，P2V 和 TGa 恢复为低电平状态；到了 P3V\_reset 状态，P3V 恢复高电平，当 P3V\_reset 结束时，垂直转移过程也相应结束；在 read 状态中，产生占空比为 1:1 的、相位相反的时钟信号，分别为 P1Ha 和 P2Ha 信号，也即上述的水平转移过程；水平转移结束后，进入 wait 状态，该状态保持各路电平不变，通过调节 wait 状态的时间长度可以改变 TDI-CCD 积分时间的大小。RGa 是一个占空比为 1:19 的复位信号。利用有限状态机实现，既能清晰的表明时序电路的状态转移过程，也能使电路稳定的工作。

### 4.2 驱动时序仿真及实验结果

使用 Xilinx 公司的 Spartan6 芯片，在 ISE14.7 平台下开发。根据上述时序，仿真结果如图 9 所示。

P1V、P2V、P3V 初始状态分别为高电平、低电平和低电平，当 P1V 进入低电平后 30 个时钟周期后，P2V 进入高电平；P2V 进入高电平后 30 个时钟周期后，P3V 由高电平变为低电平；当 P3V 维持

低电平状态 30 个时钟周期后, P1V 恢复为高电平; P2V 也在 P1V 恢复为高电平 30 个时钟周期后进入低电平状态; P3V 等待 30 个时钟周期后也恢复为高电平状态。当 P3V 变为高电平 150 个时钟周期后, P1Ha 和 P2Ha 分别产生占空比 50%、高电平维持时间 20 个时钟周期、共 520 个周期的互为反相的时钟信号。当 wait 时间长度为 0 时, 则为最小曝光时间  $85.6 \mu\text{s}(10700 \times 8 = 85600 \text{ ns})$ 。

图 10 为 TDI-CCD 驱动程序烧入 FPGA 后用示波器抓取的相关波形。图 (a) 为垂直转移过程的时序, 其中标识为 1 的是 P1V, 标识为 3 的是 P2V, 标识为 2 的是 P3V 信号。图 (b) 为水平转移过程的时序, 其中标识为 1 的是 P1Ha 信号, 标识为 3 的是 P2Ha 信号。图 10 的 (a) 和 (b) 与仿真时序一致, 满足 TDI-CCD 驱动时序的要求。

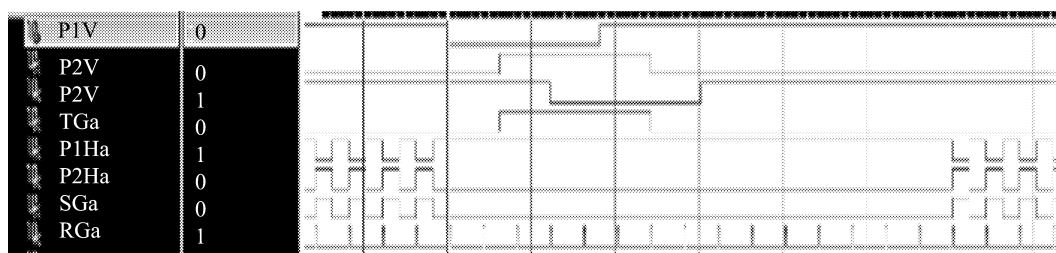


图 9 TDI-CCD 驱动时序仿真图

Fig.9 Simulation for TDI-CCD driving sequence

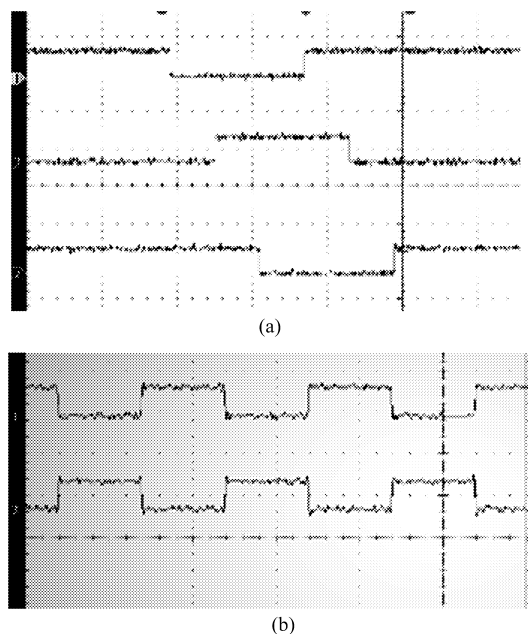


图 10 驱动时序实验图

Fig.10 Driving sequence chart in the experiment

## 5 结 论

重点介绍了 s10200-01 的驱动电路的设计与 s10200-01 驱动的过程。FPGA 代码在 Xilinx ISE 14.7 平台下开发, 采用有限状态机方式实现 TDI-CCD 的驱动时序, 通过软件的仿真与示波器波形的抓取, 驱动电路能够满足 s10200-01 驱动时序的要求, 验证了设计的合理性。

## 参考文献：

- [1] Xu qian, Miao Lifeng, Wang Yueming, *et al.* In-depth analysis of TDI-CCD image sensor [J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(12): 683-687(in Chinese).  
徐 茜, 苗丽峰, 王跃明, 等. 8192 像元 TDI-CCD 相机信噪比的深入分析 [J]. *红外技术*, 2008, **30**(12): 683-687.
- [2] Wang Qingyou. *The Application Technology of Image Sensor* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003(in Chinese).  
王庆有. 图像传感器应用技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] Li Hanshan, Wang Zemin, Lei Zhiyong, *et al.* Design of CPLD based high speed linear TDI CCD driving circuit[J]. *Computer Measurement & Control*, 2007, **15**(1): 122-124(in Chinese).  
李翰山, 王泽民, 雷志勇, 等. 基于 CPLD 的高速线阵 TDI CCD 驱动电路设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2007, **15**(1): 122-124.
- [4] Zhao Guijun, Chen Changzheng, Wan Zhi, *et al.* Study on dynamic imaging on push broom TDI CCD optical remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 291-296(in Chinese).  
赵贵军, 陈长征, 万 志, 等. 推扫型 TDI-CCD 光学遥感器动态成像研究 [J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(2): 291-296.
- [5] Yang Bingxin. Application of TDICCD in space image sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1997, **18**(3): 15-18(in Chinese).  
杨秉新. TDICCD 在航天遥感中的应用 [J]. *航天返回与遥感*. 1997, **18**(3): 15-18.
- [6] Liu Yaxia. *Research on the Calibration Technique of the TDICCD Remote Sensing Camera* [D]. Changchun: Doctorial Dissertation of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005(in Chinese).  
刘亚侠. TDICCD 遥感相机标定技术的研究 [D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所博士论文, 2005.
- [7] Lu Zhao, Liu Guoyuan, Zhang Boheng. The TDI-CCD line scanning rate control technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(5): 455-457(in Chinese).  
鲁 昭, 刘国媛, 张伯珩. TDI-CCD 行扫描速率控制技术研究 [J]. *光子学报*, 1999, **28**(5): 455-457.
- [8] Jin Longxu, Li Guoning, Liu Yanyan. Design of driving circuit for frame transfer area CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(6): 1140-1145(in Chinese).  
金龙旭, 李国宁, 刘妍妍. 帧转移型面阵 CCD 驱动电路的设计 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(6): 1140-1145.
- [9] Sun Jing, Zhang Baoping, Cao Ruixue. Design of EMCCD-based driver circuit [J]. *Modern Electronics Technique*, 2011, **34**(4): 150-154(in Chinese).  
孙 静, 张保平, 曹睿学. 基于 EMCCD 的驱动电路设计 [J]. *现代电子技术*, 2011, **34**(4): 150-154.
- [10] Xu Xiuzhen, Li Zitian, Xue Lijun. Analysis and processing of CCD noise [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(4): 343-347(in Chinese).  
许秀贞, 李自田, 薛利军. CCD 噪声分析及处理技术 [J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(4): 343-347.