

TDI-CCD 相机成像电路设计

曲洪丰, 王晓东, 吕宝林, 孙 慧

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 本文首先介绍了 TDI-CCD 的原理与结构, 然后围绕 IL-E2 TDI-CCD 详细介绍了我们设计的 TDI-CCD 成像电路。时序控制器基于 FPGA 实现, 产生 CCD 成像系统的控制时序和设置各种成像参数; 功率驱动电路将时序发生单元产生的单一逻辑电平转换为 TDI-CCD 所需的各种电平, 并提供给 TDI-CCD 容性负载瞬态电流的驱动能力; 级数选择部分采用模拟开关实现; 针对 CCD 输出的视频信号特点, 设计了低噪声放大预处理电路; 信号处理采用了集成相关双采样、可编程增益控制、数字化偏置控制、嵌位、A/D 转换等功能于一体的 CCD 视频处理专用集成芯片 TDA8783。本设计实现了 CCD 成像系统的控制和处理, 得到了高质量的图像。

关键词: TDI-CCD; 预放; 功率驱动; 视频处理

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A

DOI: 10.3788/OMEI 20102709.0059

Design of TDI-CCD Camera Imaging Circuit

QU Hong-feng, WANG Xiao-dong, LV Bao-lin, SUN Hui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The principle and structure of TDI-CCD are discussed in this paper, and then, the structure of IL-E2 TDI-CCD imaging system's circuit is introduced. The system is composed of TDI-CCD, emitter follower, pre-amplifier, driving circuit, video signal processing circuit, timing producing and logic control, etc. Timing producing and logic control module is based on FPGA. It not only produces TDI-CCD timer signal and video signal processing timer signal, but also controls the whole system's logic. Power driving module converts TTL logic signal into CCD's timer driving signal. Pre-amplifier module consists of emitter follower, AC coupling, filter and amplifier. Video signal processing module uses ASIC designed primarily for CCD signal processing. It contains a correlated double sampler (CDS), a programmable gain amplifier (PGA), an analog-to-digital converter (ADC), and an automatic optical black correction, etc.

Keywords: TDI-CCD; pre-amplifier; power driving; video processing

1 引言

TDI-CCD 是一种特殊的线阵 CCD 器件, 它利用时间延迟积分技术, 可在低照度的条件下获得高灵敏度、高空间分辨率的图像^[1]。对于普通线阵 CCD, 在输入照度、光敏元面积限定的情况下, 欲提高信号电荷唯一的办法是增加积分时间, 而积分时间的增加降低了扫描方向的空间分辨率, 因此, 在实际应用中不得不折中考虑。而 TDI-CCD 是对同一目标进行多次曝光、通过延时积分的方法来增强光能的收集, 相对于普通线阵 CCD 具有许多技术和性能上的优点: 高数据输出率、高输出信噪比、宽动态范围。它可以在不牺牲空间分辨率和数据读出率的同时增加输出信号的灵敏度^[2]。

由于 TDI-CCD 具有以上突出优点, 使其在高速、微光和遥感等领域获得了广泛应用。本文介绍了 TDI-CCD 的结构, 设计了基于 IL-E2 TDI-CCD 的系统, 围绕 TDI-CCD 详细介绍了各部分的设计原理。

2 TDI-CCD 的工作原理及结构

TDI (Time delay and integration) 是一种扫描方式, 它是一项能够增加线扫描传感器灵敏度的技术。TDI-CCD 的结构像一个长方形的面阵 CCD, 但从功能上说它是一个线阵 CCD。其工作过程是对同一目标多次曝光, 通过延时积分的方法来增加等效积分时间, 增强光能的收集。它的列数是一行的像元数, 行数为延迟积分的级数 M 。工作原理如下: 某一行上的第一个像元在第一个曝光积分周期内收集到的信号电荷并不直接输出, 而是与同列第二个像元在第二个积分周期内收集到的信号电荷相加, 相加后的电荷移向第三行……, CCD 最后一行第 M 行的像元收集到的信号电荷与前面 $(M-1)$ 次收集到的信号电荷累加后转移到输出移位寄存器中, 按普通线阵 CCD 的输出方式进行读出。因此, 若 TDI-CCD 的级数为 M , 则 CCD 视频输出信号将增加 M 倍^[3]。

由此可见, TDI-CCD 可以在不影响相机的像素

输出频率和地面分辨率的条件下, 提高相机系统的探测灵敏度, 这个突出的优点使其在高速、微光和遥感等领域获得了广泛应用。

本文所应用的 CCD 为 DALSA 公司 IL-E2 型 TDI-CCD, 它是单向、单端输出, 级数可调的 TDI-CCD。如图 1 所示, 整个 TDI-CCD 可以分为 3 个功能区, 即光敏元探测区、电荷传输区、检测输出区^[4]。

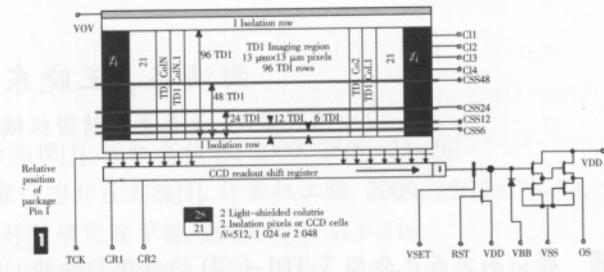


图 1 IL-E2 型 TDI-CCD 结构框图

3 TDI-CCD 相机成像电路组成与设计

3.1 组成

TDI-CCD 相机成像电路组成如图 2 所示, 主要包括: TDI-CCD、功率驱动、时序产生和逻辑控制、级数选择、预放、视频处理、通讯和电源单元。

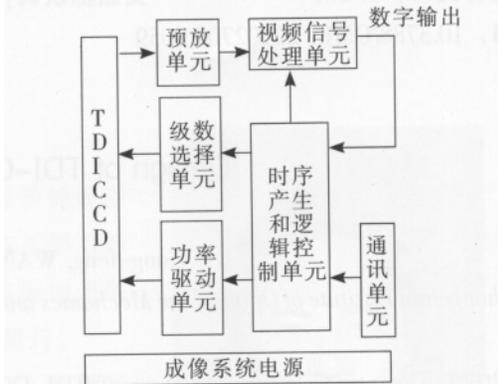


图 2 TDI-CCD 相机成像电路的组成

3.2 时序产生和逻辑控制

为了使 TDI-CCD 完成正常的扫描成像工作, 即电荷的积分、转移和读出等, 施加在 TDI-CCD 各个引脚上的时钟脉冲应有着严格的时间和相位关系。TDI-CCD 的时序控制比普通线阵 CCD 的时序要复杂些, 不仅包括水平移位驱动时钟、复位时钟、行转

移时钟，而且还提供 TDI 方向的移位驱动时钟和级数控制信号，这些信号都由时序发生器产生，经过时序驱动后供 TDI-CCD 工作；相关双采样电路需要采样控制信号和保持控制信号，暗电平调整电路需要暗参考控制信号，这 3 个信号也是由时序发生器提供的；自动增益控制、自动偏置的控制也是通过时序控制器实时控制的；此外，本单元还要将视频处理器输出的数字信号整合输出给接收系统。由此可见，时序发生器不仅提供 TDI-CCD 赖以工作的各种时序，而且它还提供视频信号处理单元和成像系统所需的控制信号，它将整个系统有机地结合在一起，使成像系统协调地工作。

为此，系统时序控制、产生部分基于 FPGA 实现，FPGA 是整个相机工作的控制中心，要完成以上功能，必须选择高性能器件。本系统采用 Xilinx 公司生产的 QPro Virtex 系列的 XQV100-BG256，它的逻辑单元达到了 2 700 个，系统门 108 904 个，块 RAM 有 40 960 bit，内部有 4 个延迟锁相环 (DLL)，实现倍频功能，内部执行速度可达到 200 MHz，可以完成高速控制。

3.3 功率驱动单元设计

由于 CCD 输入电容较大，电平也不是一般的逻辑电平，因此，由时序发生器送来的时序信号不能直接用来驱动 CCD，必须通过功率驱动进行脉冲功率放大，将 TDI-CCD 器件所需要的各种时序信号由时序发生单元产生的单一逻辑电平转换为 TDI-CCD 所需的各种电平，并提供给 TDI-CCD 容性负载瞬态

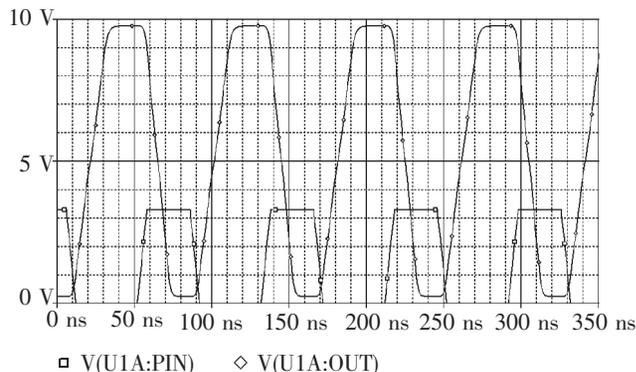


图 3 CR1 的驱动波形

电流的驱动能力，同时在大的容性负载下保证时序信号的完整性。

功率驱动部分采用 MOSFET 驱动器进行脉冲功率放大的方法，由时序信号通过驱动电路得到所需 CCD 驱动信号的 CR1 仿真波形，如图 3 所示，幅值低的为输入信号，幅值高的为输出信号。

3.4 级数选择单元设计

IL-E2 型 TDI-CCD 共有 5 种级数可选，分别为 6、12、24、48、96 级。根据 TDI-CCD 的时序关系，TDI-CCD 的积分级数控制就是控制 TDI-CCD 级数选择时钟 CSS6、CSS12、CSS24、CSS48 来实现。选中那一级对应 CSS 驱动信号为 -7 V，其他 CSS 驱动信号与 CI4 相同；选 96 级时所有 CSS 驱动信号与 CI4 相同。

此部分设计采用了模拟开关实现该功能。以对 CSS6 的控制来说明积分级数的控制原理，其他级数控制原理与此相同。积分级数控制原理见图 4。

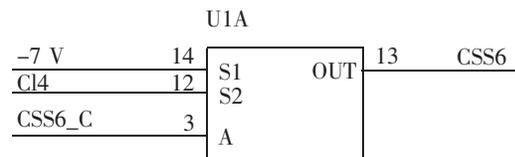


图 4 积分级数控制原理图

电路工作原理如下：积分级数控制信号输入为高电平时，CI4 信号被选通；当积分级数控制信号输入为低电平时，-7 V 被选通，即此级数被选择。

3.5 预放单元

根据 IL-E2 TDI-CCD 探测器的数据手册可知，其输出信号的直流电平为 8.5 V，饱和输出为 300 mV。因此，为了便于后级的相关双采样及数模转换等处理，必须对该信号进行隔直、放大等前级处理。电路图如图 5 所示。

此 CCD 的输出电阻为 300 Ω，如果将 CCD 输出信号直接隔直、放大，那么前置放大器的电流噪声必须很小，否则 300 Ω 电阻和大的电流噪声相乘再放大，会在前置放大的输出端产生较大的等效电压噪声，从而增加整个视频处理电路的噪声。为减小

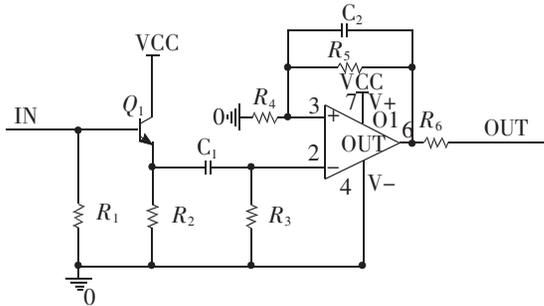


图5 预放电路图

前置放大器的输入电阻，前级处理电路中设计了由 Q_1 、 R_1 和 R_2 构成的射极跟随器进行阻抗变换，其输出阻抗可由式 (1) 得到。式中 R_s 为源电阻，在本电路中为 CCD 的输出电阻 $300\ \Omega$ ； R_b 为基极电阻，即图 5 中的 R_1 ； β 和 r_{be} 分别为三极管的电流放大倍数和体电阻。

$$R_s \approx \frac{R_s R_b + r_{be}}{\beta} \quad (1)$$

电路设计时 Q_1 选择 ADI 低噪声、低偏移、高电流放大倍数的三极管，在 $I_c=1\ \text{mA}$ 时，其电流放大倍数 $\beta \geq 500$ ，在 I_c 低至 $1\ \mu\text{A}$ 时，电流放大倍数 β 仍高达 300 以上，体电阻为 $0.13\ \Omega$ 。由式 (1) 可得该射随电路的输出阻抗 $R_o < 1\ \Omega$ 。

此外，设计的前置跟随器还具有隔离 CCD 与后续电路的能力。在相机调试阶段，用示波器等可以测量前置跟随放大器的输出信号，避免直接测量 CCD 的输出管脚。因此，可以避免测量时错误操作引起的短路烧坏 CCD 芯片内部的输出放大器，从而保护了 CCD^[5]。

选用集成运算放大器所构成的前置预放大器，设计中选用高增益宽带低噪声的器件，电路形式采用典型交流耦合式同相放大器，并且其输出具有一定的负载能力。前置预放大器不仅满足视频处理器的阻抗匹配要求，还要保证 CCD 信号低噪声放大和传递。

图 5 中 U1 构成前置预放大器的主体，其中 R_4 和 R_5 构成反馈电路， R_6 为 $51\ \Omega$ 同轴电缆的匹配电阻。则放大器的放大倍数为：

$$A_{vd} = 1 + R_5/R_4 \quad (2)$$

3.6 视频信号处理单元

CCD 输出的信号除了包含有用的视频信号，还含有许多噪声成分。为了后续电路的使用，必须采取有效的视频信号处理电路对其进行处理。其目的就是尽可能地消除各种噪声和干扰，但又不损失图像细节。根据 CCD 输出噪声的特点，CCD 视频处理电路的目的是消除 KTC 噪声，抑制低频噪声和宽带白噪声^[6-8]；并保证在 CCD 的动态范围内图像信号随目标亮度成线性变化；同时便于计算机处理和大容量存储。还必须对 CCD 输出信号进行数字化处理。

CCD 视频信号处理电路主要包括钳位、相关双采样 (CDS)、可编程增益控制 (PGA)、偏置调整、暗电平校正、A/D 转换和数据隔离输出电路等^[9]。如图 6 所示。

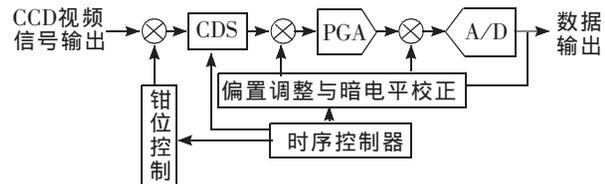


图6 CCD 视频信号处理电路组成

传统的成像系统这部分电路采用分立元件来实现，这无疑给前期电路设计和后期电路调试都增加了难度和复杂度。近年来，随着集成电路的发展，许多公司开发了集成相关双采样、可编程增益控制、暗电平补偿、ADC 数模转换等功能为一体的 CCD 视频处理专用芯片，如 TDA8783、XRD4460 等芯片。为提高相机的性能及顺应相机小型化的趋势，现在相机设计主要采用 CCD 视频处理专用芯片来实现视频处理功能。

本系统采用集成视频处理专用芯片 TDA8783，它是 PHILIPS 公司的一种专用于 CCD 相机的 10 位模数接口芯片，主要由相关双采样电路 (CDS)、增益控制电路 (AGC)、钳位电路、低功耗 10 bit A/D 等组成^[10]。

3.7 动态成像

TDI-CCD 相机动态成像地面检测的原理是通过

转台带动目标图形做一定规律的运动,从而模拟了



图7 动态成像图

相对被测镜头的动态目标^[11]。对设计的TDI-CCD相机进行了动态成像测试,以报纸为目标图形,调整转台的旋转速度与像移速度匹配进行成像。动态成像图如图7所示。

4 总 结

本文在分析TDI-CCD结构基础上,详细介绍了TDI-CCD相机各个关键电路的设计原理,并对设计的相机进行了动态成像测试。本设计实现了TDI-CCD相机的成像控制和视频处理,得到了高质量的图像。

参考文献

- [1] 王德江,匡海鹏,蔡希昌,等. TDI-CCD全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2465-2471.
- [2] 佟首峰,刘金国,阮锦,等. 推帚式TDI-CCD相机应用分析[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(1): 31-33, 54.
- [3] 王岩,郭永飞,司国良,等. 基于FPGA的TDI-CCD时序电路的设计[J]. 微计算机信息, 2007, 23(2-3): 198-200.
- [4] DALSA INC. *DALSA IL-E2 TDI Image Sensors datasheet*[M]. DALSA INC., 2003.
- [5] 薛旭成,李云飞,郭永飞. CCD成像系统中模拟前端设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1191-1195.
- [6] 佟首峰,阮锦,郝志航. CCD图像传感器降噪技术的研究[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 140-145.
- [7] 王挺峰. 光子计数用光电倍增管的外围工作电路[J]. 光机电信息, 2009, 26(2): 39-44.
- [8] 王挺峰. 提高PMT光子计数系统探测灵敏度的方法[J]. 光机电信息, 2009, 26(3): 37-42.
- [9] 曲洪丰. CCD视频信号处理电路抗干扰技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 279-281.
- [10] PHILIPS INC. *TDA8783 40 Msps, 10-bit Analog-to-digital Interface for CCD Cameras Datasheet*[M]. PHILIPS INC., 1999.
- [11] 郑耿峰,张柯,韩双丽,等. 空间TDICCD相机动态成像地面检测系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 623-629.

作者简介: 曲洪丰(1980-),男,汉族,黑龙江海伦人,硕士,助理研究员,2006年于浙江大学获得硕士学位,主要从事空间图像传感器成像技术的研究。E-mail: oestar@tom.com