

文章编号 1004-924X(2011)12-2970-07

百万像素电子倍增 CCD 数字化相机的设计

杨少华*, 郭明安, 李斌康, 夏惊涛, 孙凤荣

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 论述了一种基于 1 024 pixel×1 024 pixel 电子倍增(EM)CCD 图像传感器(CCD201)的数字化相机设计方法。利用复杂可编程逻辑器件(CPLD)产生 CCD 逻辑时序及视频同步处理控制时序;采用集成器件与分立器件相结合的方式实现 EMCCD 垂直驱动时序,获得视频信号;使用带有相关双采样(CDS)功能的 16 位模数转换器对 CCD 视频信号进行数字化。介绍了时序控制、驱动电路、视频处理电路等关键组成部分的技术实现方法。实验结果显示,数字化相机前端能够连续输出 16 位数字图像数据,光动态范围大于 70 dB,电子增益采用程控方式,增益倍数最高能够大于 50 dB。该设计方法已成功应用于远程 EMCCD 图像采集系统中,设计的系统能够在微光成像及辐射场诊断中应用。

关键词: 高分辨率数字相机;电子倍增 CCD(EMCCD);相关双采样(CDS);驱动时序

中图分类号: TN386.5;TB853.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111912.2970

Design of digital EMCCD camera with mega pixels

YANG Shao-hua*, GUO Ming-an, LI Bin-kang, XIA Jing-tao, SUN Feng-rong

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

* Corresponding author, E-mail: ysh_polaris@sohu.com

Abstract: A design method for the digital camera based on a back illuminated 1 024 pixel×1 024 pixel Electron Multiplying(EM)CCD image sensor is proposed. The Complex Programming Logical Device (CPLD) is adopted to generate the CCD driver timing and video processing timing, EL7156C pin driver chip is used for standard EMCCD clocks, and a discrete circuit is used for EM clock. By adopting a CCD analog front-end chip VSP2566 with Correlation Double Sampling(CDS) function to sample, the image data of the CCD output are digitized. The design methods of logic timing control, driver circuit, and video processing circuit are introduced. Experiments show that the digital camera circuit can output 16 bit digital image data simultaneously at a speed of 8 frame/s, its optical dynamic range can exceed 70 dB, and the remote programmable control electron multiplication can operate at the gain more than 50 dB. The design has been used in the remote EMCCD imaging system, and also can be applied to the low light level imaging area and radiation diagnosis field.

Key words: high resolution digital camera; Electron Multiplying(EM) CCD; Correlation Double Sampling(CDS); driver timing

收稿日期:2011-04-12;修订日期:2011-06-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11075131)

1 引言

高性能的图像采集系统一直是图像诊断技术中不可缺少的组成部分。随着固态图像传感器技术的不断进步,分辨率、灵敏度、动态范围、线性度、帧频率等关键性能指标不断提高,图像采集系统的“性能”也越来越高。高灵敏度高分辨率图像采集系统在图像诊断领域有着广泛的应用,目前此类系统的关键器件是高速固体图像传感器,而以 CCD(Charge Coupled Device)图像传感器最常见,许多科学级高速摄像系统也是采用 CCD 图像传感器。为更好地提高 CCD 的灵敏度,人们提出了许多新技术,如:背照式 CCD 技术、电子倍增(Electron Multiplying, EM) CCD 技术等。CCD 背照射技术可以很大程度上提高 CCD 芯片的量子效率,从而提高其灵敏度。EMCCD 结构与常规 CCD 相似,仅在读出寄存器和输出放大器之间多出了倍增寄存器,转移第二阶段势阱被一对电极取代,一电极加直流偏置,高压时钟驱动另一电极,两电极电势差导致电荷电离而产生新电荷,多次电离使电荷数迅速倍增,从而使信号得到放大,信噪比提高。EMCCD 技术能更好地提高 CCD 的灵敏度,使其达到微光成像甚至单光子计数的超高性能,在军事侦察、天文观测、生物医学等领域具有巨大的发展潜力和广阔的应用前景^[1-2]。

EMCCD 具有新的优异性能,同时也对驱动电路提出了新的要求,增加了系统设计难度。一般情况下 CCD 转移电压幅度在 12 V 左右,但 EM 电路要求转移电压幅度在 35 V 以上,否则将得不到电子增益效果,其频率一般在 10 MHz,甚至更高,需要进行特殊的设计,这成为设计 EMCCD 成像系统的关键。本文介绍了基于一种高分辨率高灵敏度背照式 EMCCD 图像传感器 CCD201 的数字化相机设计方法,并给出了实验结果。

2 CCD201 简介

CCD201 是 e2v 公司生产的新型高分辨率电子倍增低照度 CCD(Electron Multiplying Low Light Level CCD, EML3CCD)图像传感器^[3],像素尺寸为 $13\ \mu\text{m} \times 13\ \mu\text{m}$,分辨率为 1 024 pixel \times

1 024 pixel,具有 100%填充效率。芯片采用反向输出的模式来抑制暗电流的影响,采用背照式来提高量子效率,在可见光波段内,其量子效率超过 90%,具有很高的灵敏度。芯片采用了新型输出放大器,能够在高达 15 MHz 像素输出时产生小于一个电子的读出噪声,从而使得芯片非常适合低照度科学成像领域。CCD201 具有两个输出端口,一个是低噪声高响应放大器输出端口,可以使芯片工作在普通模式而不使用电子增益功能;另一个是低响应大信号放大器输出端口,在使用电子增益功能时使用。

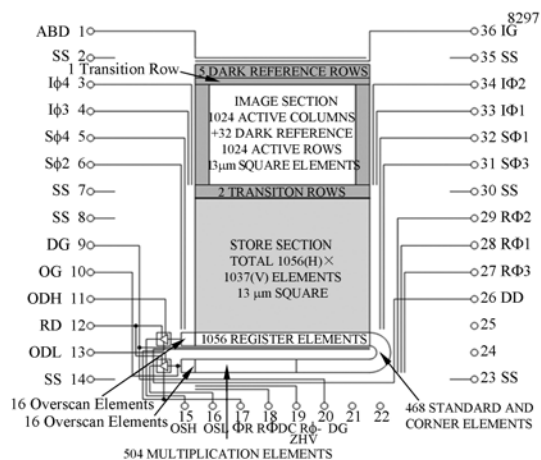


图 1 CCD201 结构示意图

Fig. 1 Structure of CCD201

芯片分为成像单元、存储单元与输出单元 3 个部分,结构示意图如图 1 所示。图中信号 $R\Phi 1, R\Phi 2, R\Phi 3, S\Phi 1, S\Phi 2, S\Phi 3, S\Phi 4, I\Phi 1, I\Phi 2, I\Phi 3, I\Phi 4, \Phi R, R\Phi 2HV, DG$ 为时序信号, $R\Phi DC, OG, SS, ODH, ODL, DD, RD, IG, ABD$ 为 CCD 直流偏置电源信号, OSH, OSL 为芯片的高、低响应放大器视频输出管脚。

3 EMCCD 数字化相机设计

3.1 数字化相机总体方案

根据 CCD201 需求特点,使其正常工作并输出视频信号需要达到电压要求的驱动时序与直流偏置电源;为获得数字图像数据,还需要视频数字化。根据对 EMCCD 的分析结果,文章采用复杂可编程逻辑器件(CPLD)产生系统所需的逻辑控制时序,使用 MOS 集成功率驱动器件与分立电路实现 CCD 的垂直驱动,使用 LM317 产生 EM-

CCD 需要的各种偏置电源,并用带有 CDS 功能的 16 位 AFE 芯片 VSP2566 实现 CCD 视频的数字化。建立的 EMCCD 数字化相机电路总体框图如图 2 所示^[4-5]。

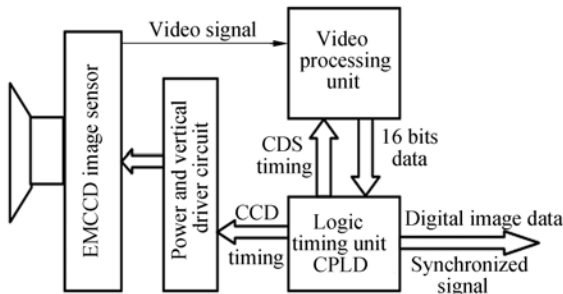


图 2 EMCCD 数字化相机总体框图
Fig. 2 Design of digital camera around EMCCD

3.2 驱动电路与偏置电源

由芯片的结构图(图 1)可知,CCD201 需要 14 路驱动信号,除 DG 外,正常工作时还必须提供其他 13 路时序。DG 时钟用于丢弃非感兴趣图像行时使用,可以在降低图像分辨率的情况下提高 CCD 的工作频率。像敏区 $I\Phi$ 与存储区 $S\Phi$ 的时序驱动负载电容较大,需要较大的功率,其余信号的负载电容相对较小。上述驱动信号的电压分为 $-5\sim+7\text{ V}$ 、 $0\sim12\text{ V}$ 、 $4\sim50\text{ V}$ 3 种,且这些信号上限电压必须可调。本文采用 XC95144XL 产生 EMCCD 的逻辑时序,输出电平为 3.3 V,不符合该种 CCD 时序驱动信号的电平要求,因而还需要进行功率驱动设计。采用集成器件 EL7156 对 $-5\sim+7\text{ V}$ 与 $0\sim12\text{ V}$ 的 14 路信号进行驱动,采用分立器件对增益控制时钟(高电平 $20\text{ V}\sim50\text{ V}$) $R\Phi 2HV$ 的信号进行驱动。CCD201 驱动电路的原理框图如图 3 所示^[6-7]。

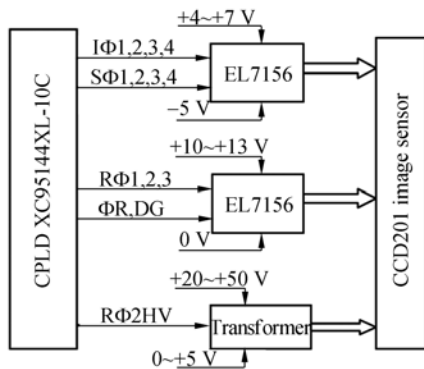


图 3 CCD201 驱动电路结构原理框图
Fig. 3 Driver circuit of CCD201

EL7156C 是单路 TTL 功率驱动芯片,最高工作频率可达 40 MHz,能够完成最高摆幅 18 V 的驱动,最大输出峰值电流达到 3.5 A,满足 $-5\sim7\text{ V}$ 与 $0\sim12\text{ V}$ 的 14 路控制信号的脉冲电压幅度要求。分立电路采用与 CCD60 高帧频成像系统一样的独特设计,最高工作频率可以达到 40 MHz,最高电压可以达到 50 V,完全满足 CCD201 电子增益时序驱动的要求^[8]。

除系统时序外,CCD201 还需要一些电源,一共 9 路,分别为: $R\Phi DC$, OG, SS, ODH, ODL, DD, RD, IG, ABD。这些电源从 $3\sim28\text{ V}$ 不等,本文均采用 LM317BT 产生所需电源,由实际应用结果可知,设计能够达到 CCD201 要求。

为增强 CCD201 图像采集系统的使用灵活性,采用数字控制的设计方案实现电子增益效果的控制,并显示电子增益电压,使系统在使用时数据更加丰富可靠。前已述及,电子增益效果是通过 $R\Phi 2HV$ 的高电平进行控制的,其电压与实际增益的曲线如图 4 所示^[9]。由图可知,在 $39\sim46\text{ V}$ 增益随电压变化较明显,增益的大小与温度明显相关。根据 CCD201 增益电压的要求,将其设计为 $38\sim47\text{ V}$ 可控,并用数字电位器与 LM317 结合的方式进行调节。电位器采用 X9319,其阻抗为 $10\text{ k}\Omega$,100 档可调。

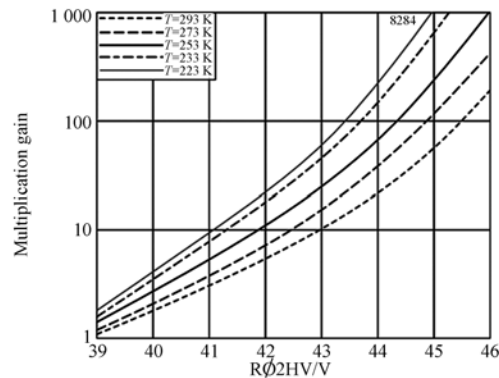


图 4 不同温度下 CCD201 电子增益随 $R2HV$ 变化曲线
Fig. 4 Typical variation of multiplication gain with $R2HV$ at different temperatures

3.3 系统时序

CCD201 芯片的工作时序可分为行时序与帧时序。系统行时序由 34 个行同步周期、 $32+16$ 个空像素周期与 1 024 个像素周期共 1 106 个周期构成。在 34 个行同步周期中, $S\Phi$ 把存储区中的一行像素转移到读出寄存器,经过 32 个空像素

周期的延迟后,在 $R\Phi 1$, $R\Phi 2$, $R\Phi 3$ 的作用下把 1 024 个像素通过输出放大器输出,完成行时序动作。系统帧时序由帧起始阶段、帧转移阶段、寄存器清空阶段与读出阶段构成。帧起始阶段由 $I\Phi 1 \sim 4$ 与 $S\Phi 1 \sim 4$ 上面的一个大于 $10 \mu s$ 脉冲标识,之后进入帧转移阶段;此阶段把像敏区的电荷转移到存储区,由 1 032 个 $I\Phi$ 与 $S\Phi$ 周期构成;随后开始寄存器清空阶段,这需要至少 1 072 个 $R\Phi$ 周期的时间完成;最后是读出阶段,由 1 037 个行读出周期构成,前 7+1 个行周期为延迟周期。因为读出段共有 1 个倍增寄存器(见图 1)与一个弧形转向寄存器,共有 1 072 个像素,会产生一个行周期的延时,前 7 行为空像素行,非有效图像数据,可作为哑元处理,故共有 8 行的延迟周期。随后的 1 024 个行周期为数据周期,每行由 1 024 个像素数据与 48 个非图像数据组成。系统帧时序连续组合成系统工作时序,可使 CCD201 工作于连续数据输出状态。系统帧频可以根据一帧的占用时间计算得出。一帧占用时间为 $10 \mu s + 1 032$ 个 $I\Phi$ 周期 + 1 072 个 $R\Phi$ 周期 + 1 037 个行周期

(由 1 072 个 $R\Phi$ 周期组成);在 $I\Phi$ 为 1 MHz $R\Phi$ 为 10 MHz 时,系统一帧占用时间约 120 ms,连续工作时约为 frame/s。

在编程实现中,参照了系统时序的基本特点,把时序分成帧、行、像素的方式组成完整的系统时序。由最基本的像素时序组成行时序,再由行时序组成帧读出时序,加入行起始时序与行转移时序,用不同的门信号对控制信号进行选择,组成一个完整的帧时序,用连续的帧时序组成系统工作时序。同时系统时序留有复位与触发信号,可根据需要进行适当的时序选择。利用 Xilinx ISE11.1 编程之后,进行了仿真,仿真结果(图 5)与 CCD201 时序基本吻合,能够满足 CCD201 的时序要求^[10-11]。

上述时序是采用电子增益输出时(OSL)的正常时序,如果采用非电子增益输出时,即使用高响应放大器输出端子(OSH)输出时,其驱动时序中的 $R\Phi 1$, $R\Phi 2$ 需要调换。读出时由于减少了转向寄存器与倍增寄存器,有效数据的延时周期由 8 个行减少为 7 个行,其它的时序不变。

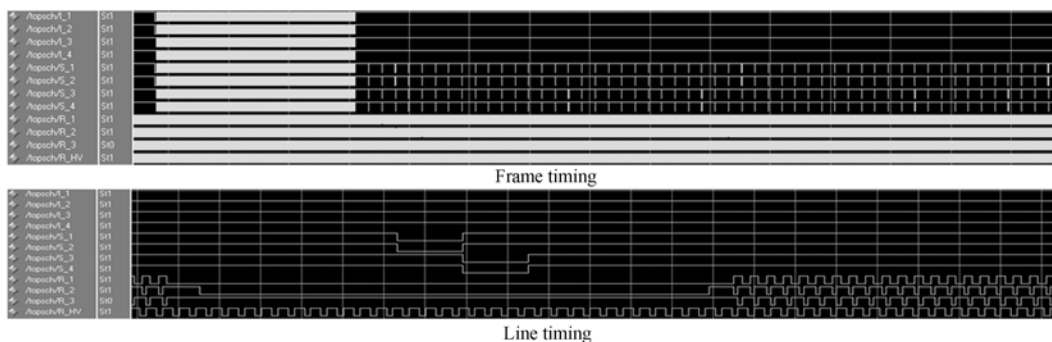


图 5 CCD201 行时序与帧时序仿真结果

Fig. 5 Simulation results of frame timing and line timing

3.4 数字化电路

利用设计的驱动电路与电源,获得了 CCD201 的视频信号,它是在 28 V 电平上的一个约 1 V 的视频信号,要获得数字图像数据还需要做进一步处理,一般采用相关双采样(CDS)技术进行处理。采用 CDS 技术处理 CCD 视频信号硬件结构简单(往往仅需要一片芯片就能胜任),实施方便,本文选用带有 CDS 功能的 CCD 视频处理芯片 VSP2566 完成 CCD201 器件输出的视频信号的数字化。选用 CPLD 器件 XC95144XL 产生 VSP2566 所需的驱动时序,其硬件原理图如图

6 所示。VSP2566 是一个带有 CDS、A-PGA(模拟可编程放大器)、D-PGA(数字可编程放大器)、16 位数字化 ADC 的 CCD 视频专用处理芯片^[12]。芯片还具有空像素校零、黑电平校正、电压钳位、输出放大器等功能。空像素校零、黑电平校正由数字信号控制,可通过 CPLD 提供。电压钳位由芯片内部控制,钳位电压为 1 V。CDS 的控制信号 REFCK、DATCK 以及模数转换控制信号 ADCCK 都通过 CPLD 产生,这些信号共同组成 VSP2566 的控制时序。VSP2566 工作电压为 3 V,其输出端口负载能力不强,在使用时一般增加

一级缓冲电路,这里采用 61LVTH16244 芯片完成输出端口的数据缓冲。VSP2566 的 A-PGA、D-PGA 可以通过芯片的串行总线进行控制,这一功能采用远距离程控方式实现,与 EM 增益电压的控制方式相同,通过计算机串口与光纤交互的方式完成,可以在程序中设定 VSP2566 放大器的增益倍数。

在对 CCD 视频信号进行数字化处理之前采用 2N3904 对视频信号进行缓冲。 R_1 是 CCD201 芯片要求的输出负载电阻, R_2 与 Q_1 构成跟随电路,其输出端经 C_1 接入 VSP2566 的输入端。VSP2566 在 CPLD 控制下完成视频信号的处理与数字化,输出 16 位数字信号。CPLD 在提供 VSP2566 时序的同时,也提供 VSP2566 输出的 16 位数字信号的同步信号,包括行同步(HD)、帧同步(VD)、像素时钟同步等,并传输到光纤远程传输单元,为图像数据的远程传输做准备。

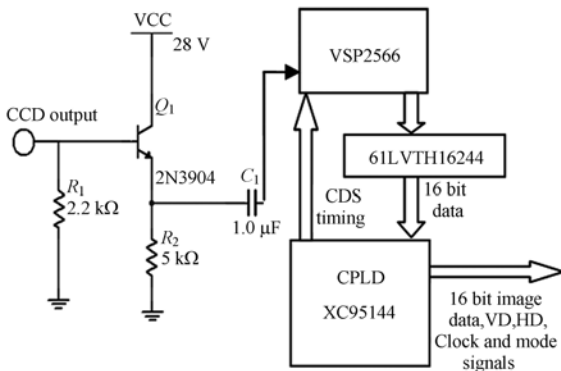


图 6 视频处理硬件原理图

Fig. 6 Schematic of video processing circuit

4 应用结果

根据本文设计方案建立了 EMCCD 相机前端硬件电路,并应用于 EMCCD 远程成像系统中(图 7)。EMCCD 远程成像系统包括前端数字化相机部分与后端 USB 数据采集部分,两个部分用光纤进行通信^[4,13-14],使系统能够适用于远程图像诊断领域,如低照度医学成像、生物成像、射线成像、辐射场物理诊断等。

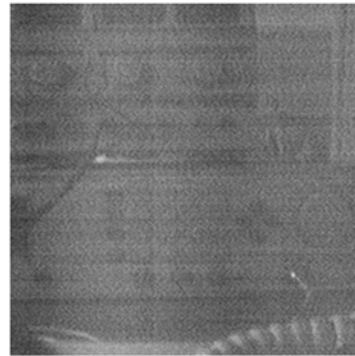
为验证数字化相机设计方案的应用效果,对 EMCCD 远程成像系统进行了测试。在微弱光照条件下,通过远程 USB 数据采集单元采集了不同



图 7 EMCCD 远程成像系统

Fig. 7 EMCCD imaging system

增益电压的图像,如图 8。在增益电压为 38.5 V 时,图像信噪比较低,图像对比度较差,景物很难分辨,如图 8(a);而当增益电压为 45.2 V 时,图像信噪比得到有效提升,图像质量得到了大幅改善,图像较为清晰,如图 8(b)。由图像结果可知,系统模拟前端能够有效完成 EMCCD 的驱动与视频数字化任务,实现了电子增益效果。



(a)增益电压为 38.5 V 时采集的图像

(a)Image with R2HV's high voltage operating at 38.5 V



(b)增益电压为 45.2 V 时采集到的图像

(b)Image with R2HV's high voltage operating at 45.2 V

图 8 不同增益电压下的图像对比

Fig. 8 Images at different R2HV's high voltages

利用不同光强情况下采集图像的方式测试了前端电路的线性度与动态范围。采用积分球作为光源,通过增加不同透过率的滤光片改变入射光强,从未加滤光片时开始记录,直到完全遮挡住光源,对特定图像区域进行计算,获得了不同光强下的像素平均灰度值,根据滤光片与光强的比例关系得到平均灰度值与光强关系的曲线,如图 9。测试结果表明,电子增益电压为 42.7 V 时,动态范围达到 3 000~5 000 倍(>70dB)。成像系统的

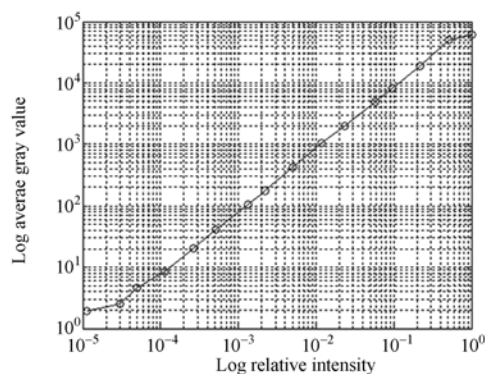


图 9 系统动态范围曲线

Fig.9 Dynamic of EMCCD imaging system

参考文献:

- [1] 张闻文,陈钱. 基于电子倍增 CCD 噪声特性的最佳工作模式[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10):1977-1981.
- ZHANG W W, CHEN Q. Optimum operation mode based on noise characteristics of electron multiplying CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1977-1981. (in Chinese)
- [2] DENVIRD, CONROYE. Electron multiplying CCDs [J]. *SPIE*, 2003, 4877:55-68.
- [3] e2v technologies inc. CCD201-20 Back Illuminated 2-Phase IMO Series Electron Multiplying CCD Sensor[OL]. <http://www.e2v.com> 2005.06.
- [4] 杨少华,郭明安,李斌康,等. 高速高灵敏光纤传输 EMCCD 相机设计[J]. 光电工程, 2009, 36(6):135-140.
- YANG SH H, GUO M A, LI B K, *et al.*. Design of the high speed high sensitivity fiber transmission EMCCD camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(6):135-140. (in Chinese)
- [5] 刘金国,余达,周怀得,等. 面阵 CCD 芯片 KAI-1010M 的高速驱动系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9):1623-1328.
- LIU J G, YU D, ZHOU H D, *et al.*. Design of high speed driver system for area-CCD KAI-1010M [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9):1623-1328. (in Chinese)
- [6] RAVI K G, VERN H, ANDREW C, *et al.*. New ultrahigh-speed CCD camera achieves sub-electron read noise using on-chip multiplication gain (EMCCD) technology[J]. *SPIE*, 2005, 5580:905-912.
- [7] de VREE, G A WESTRA, A H MOODY I, *et al.*. Photon-counting gamma camera based on an electron-multiplying CCD [J]. *IEEE transactions on Nuclear Science*, 2005, 52(3):580-588.
- [8] 杨少华,郭明安,李斌康,等. 高速图像传感器 CCD60 驱动电路设计[J]. 传感技术学报, 2009, 22(6):897-900.
- YANG SH H, GUO M A, LI B K, *et al.*. Design of the driving circuit on high speed image sensor CCD60 [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(6):897-900. (in Chinese)
- [9] ROBBINS M S, HADWEN B J. The noise performance of electron multiplying charge-coupled devices[J]. *IEEE transactions on Electron Devices*, 2003, 50(5):1227-1232.
- [10] 郭明安,李斌康. 高帧频 CMOS 摄像机控制驱动

动态范围与电子增益大小有很大关系,当电子增益增大时,成像系统动态范围会变小,等同于放大了视频信号,容易造成饱和,但此时灵敏度会相应变高,可获得较弱光强的图像。

5 结 论

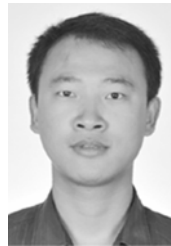
如何实现 EMCCD 的正常驱动与数字化是建立 EMCCD 数字化相机的关键,本文建立的 EMCCD 成像系统模拟前端电路具有较好的线性度与动态范围,适用于 EMCCD 成像系统。应用文中方案的成像系统参数如下:分辨率:1 024 pixel×1 024 pixel;线性动态范围:大于 66 dB;光动态范围:大于 70 dB;电子增益:100 档(38.5~46.9 V)步进可调(0~50 dB);数据传输方式:光纤远距离实时传输;数据采集方式:USB2.0 实时采集;镜头接口:C 型标准接口;图像成像面大小:13.3 mm×13.3 mm;测试图像使用的镜头为:25 mm/F1.4。该方法同样适用于其他高精度 CCD 成像系统的设计。

- 时序的设计与实现[J]. 电视技术, 2004(2): 88-89.
- GUO M A, LI B K. Design and implementation of driving timing for high frame rate video camera [J]. *TV Engineering*, 2004(2): 88-89. (in Chinese)
- [11] 田耘, 胡彬, 徐文波, 等. Xilinx ISE Design Suite 10. x FPGA 开发指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- TIAN Y, HU B, XU W B, *et al.*. *Design Manual of Xilinx ISE Design Suite 10. x FPGA* [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2008. (in Chinese)
- [12] Texas Instruments Incorporated. CCD ANALOG FRONT-END FOR DIGITAL CAMERAS[OL]. <http://www.ti.com> 2008.
- [13] 冉峰, 杨辉, 黄舒平. 面阵 CCD 彩色视频图像实时采集系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 273-280.
- RAN F, YANG H, HUANG SH P. Design of real-time color video capture system for area array CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 273-280. (in Chinese)
- [14] 夏惊涛, 杨少华, 郭明安, 等. HSIC-C60I 型高速相机 USB 采集方式的实现[J]. 通信技术, 2009, 42(1): 303-305.
- XIA J T, YANG SH H, GUO M A, *et al.*. Realization of USB2. 0 interface for HSIC-C60I high speed camera [J]. *Communications Technology*, 2009, 42(1): 303-305. (in Chinese)

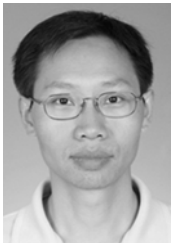
作者简介:



杨少华(1981—),男,安徽阜阳人,博士研究生,工程师,2005年于西北核技术研究所获硕士学位,主要从事高速成像系统研制、特种成像系统研制、高速数据采集方面的研究。E-mail: ysh_polaris@sohu.com



夏惊涛(1981—),男,湖北荆州人,博士研究生,工程师,2003年于中国人民解放军装备指挥技术学院获学士学位,主要从事图像采集与处理,三维图像重建等方面的研究与开发工作。E-mail: 1981xjt2004@163.com



郭明安(1969—),男,湖南石门人,硕士,高级工程师,1995年于电子科技大学获硕士学位,主要从事核电子学与高速成像方面的研究。E-mail: guomingan@163.com



孙凤荣(1972—),女,陕西凤县人,硕士,高级工程师,1995年于西北工业大学获学士学位,2007年于西北核技术研究所获硕士学位,主要从事X射线测量诊断及机械结构设计等方面的研究。E-mail: sunfengrong2004@126.com



李斌康(1966—),男,陕西岐山人,博士,研究员,硕士生导师,1989年于西安交通大学获学士学位,主要从事脉冲射线测量、图像诊断、高速成像系统研制等方面的研究。E-mail: Binkang.li@gmail.com